



Sviluppo e sperimentazione del sistema ERTMS/ATO per un veicolo ferroviario a guida autonoma

Development and testing of the ERTMS/ATO system for an autonomous driving railway vehicle

Fabio SENESI ^(*)

Arturo AMENDOLA ^(**)

Lorenzo BARRUFFO ^(**)

Salvatore DE SIMONE ^(**)

Domenico Ernesto GARRUBBA ^(***)

Sergio REPETTO ^(***)

Diana SERRA ^(**)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.04.2025.ART.1>)

Sommario - Questo articolo presenta il progetto ERTMS/ATO di Ricerca e Sviluppo di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) per un treno AV, implementato per l'applicazione specifica di un prototipo di veicolo ferroviario ispettivo a guida autonoma URV (*Unmanned Railway Vehicle*). Vengono analizzate le sfide tecniche e normative, con un focus sull'architettura di controllo per la guida autonoma. Il sistema integra funzionalità avanzate come la pianificazione in tempo reale e il controllo della traiettoria, garantendo sicurezza, efficienza e robustezza. Attraverso un approccio basato su modelli e metodi formali, il progetto ha seguito un rigoroso processo di test, culminando in sperimentazioni su linea presso il circuito di test di Bologna San Donato di RFI. In contesto di crescente attenzione per i treni a guida autonoma nel settore ferroviario, confermato dall'inserimento di ATO nelle STI CCS 2023, i risultati dimostrano il potenziale del prototipo di ERTMS/ATO per migliorare sicurezza, efficienza e sostenibilità nel settore ferroviario, aprendo la strada a ulteriori applicazioni e studi futuri.

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, i sistemi ferroviari, il trasporto urbano su rotaia e le nuove linee ad Alta Velocità (AV), hanno ricevuto un'attenzione sempre crescente, alimentata dalle trasformazioni richieste dai progressi tecnologici, dall'aumento delle velocità di viaggio e dalla necessità di offrire servizi di qualità sempre maggiori [1]. In particola-

Summary - This article presents the Italian Rete Ferroviaria Italiana (RFI) Research and Development ERTMS/ATO project for a HS train, implemented for the specific application of a prototype of an inspection URV (*Unmanned Railway Vehicle*) autonomous driving railway vehicle. Technical and regulatory challenges are analysed, with a focus on the control architecture for autonomous driving. The system integrates advanced features such as real-time planning and path control, ensuring safety, efficiency and robustness. Through an approach based on models and formal methods, the project followed a rigorous testing process, culminating in line trials at RFI's Bologna San Donato test circuit. In the context of increasing focus on autonomous driving trains in the railway sector, confirmed by the inclusion of ATO in the 2023 CCS (Control and command signalling) TSI, the results demonstrate the potential of the ERTMS/ATO prototype to improve safety, efficiency and sustainability in the railway sector, paving the way for further applications and future studies.

1. Introduction

In recent decades, railway systems, urban rail transport and new High Speed (HS) lines have received increasing attention, fuelled by the transformations required by technological advances, increased travel speeds and the need to offer increasingly higher quality services [1]. In particular, HS vehicles face new challenges related to operational safety, influenced by three fundamental components: the trackside infrastructure, the train movement and the signalling and control system.

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

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

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

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

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

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

re, i veicoli AV affrontano nuove sfide legate alla sicurezza operativa, influenzata da tre componenti fondamentali: l'infrastruttura di terra, il movimento del treno e il sistema di segnalamento e controllo.

Con l'avanzare delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione, il sistema ATO (*Automatic Train Operation*) si è affermato come una tecnologia innovativa per ottimizzare l'efficienza operativa del traffico ferroviario. Questo sistema consente di automatizzare in tempo reale decisioni relative a comandi di accelerazione, *coasting* e frenatura [1]. Tra le principali funzionalità dell'ATO troviamo, ad esempio, la guida autonoma tra stazioni, sfruttando dati in tempo reale come limiti di velocità, velocità attuale e posizione oltre a informazioni su direzione e destinazione, l'arresto automatico del treno nelle aree di fermata e l'apertura e chiusura automatica delle porte durante soste o partenze. Lo standard internazionale IEC 62290-1:2014 definisce cinque Gradi di Automazione (*Grades of Automation GoA*) [2] per i sistemi di guida dei treni. I livelli GoA0 e GoA1 prevedono una guida manuale da parte del macchinista a bordo. Con il GoA2, il treno è guidato in modo parzialmente o completamente automatico, con controllo della velocità e delle fermate, ma è ancora necessaria la prontezza del macchinista per eventuali interventi. Il GoA3 consente operazioni completamente automatizzate sotto la supervisione di un operatore a bordo. Infine, il livello GoA4, rappresenta il grado massimo di automazione, in cui il treno è completamente autonomo e in grado di adattarsi ai diversi scenari di guida.

Il progetto ERTMS/ATO GoA4 dalla Direzione di Ricerca e Sviluppo (R&S) di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) si concentra sulla progettazione di un sistema ATO integrato con lo standard ERTMS/ETCS (*European Rail Traffic Management System/European Train Control System*) per le linee ad Alta Velocità (AV). L'obiettivo è incrementare il livello di automazione dei sistemi di segnalamento nazionali, migliorandone prestazioni e affidabilità. Data l'eterogeneità dei componenti con cui il sistema si interfaccia e degli stessi moduli che lo compongono, sono state affrontate numerose sfide di natura ingegneristica, nonché di conformità alle normative.

La complessità tecnica è affrontata attraverso l'uso della progettazione basata su modelli, che consente una gestione efficace dei processi di sviluppo. Il lavoro si avvale di strategie di co-progettazione e di un approccio interdisciplinare in modo da facilitare il co-design e la sinergia tra team con competenze diversificate messe in campo dall'ente di ricerca Fondazione Bruno Kessler, dall'Università degli Studi di Napoli Federico II e dall'Università degli Studi di Salerno. Per garantire elevati standard di sicurezza e robustezza, vengono adottati metodi formali per la specifica e la progettazione del software, con l'utilizzo di strumenti avanzati come SCAD e MATLAB per la validazione e lo sviluppo. Questo articolo si concentra su uno degli aspetti cruciali del progetto: l'architettura di controllo progettata per la guida del veicolo, illustrando le scelte progettuali, le soluzioni adottate e le implicazioni

With the progress of information and communication technologies, the ATO (Automatic Train Operation) system has established itself as an innovative technology to optimise the operational efficiency of rail traffic. This system allows decisions relating to acceleration, coasting and braking commands to be automated in real time [1]. Among the main features of the ATO we find, for example, autonomous driving between stations, taking advantage of real-time data such as speed limits, current speed and position as well as information on direction and destination, automatic train stop in stop areas and automatic opening and closing of doors during stops or departures. The IEC 62290-1:2014 international standard defines five Grades of Automation GoA [2] for train driving systems. The GoA0 and GoA1 levels require manual driving by the driver on board. With the GoA2, the train is driven partially or fully automatically, with speed and stop control, but the driver's readiness for any interventions is still required. The GoA3 allows fully automated operations under the supervision of an on-board operator. Finally, the GoA4 level represents the maximum degree of automation, in which the train is fully independent and able to adapt to different driving scenarios.

The ERTMS/ATO GoA4 project by the Research and Development (R&D) Department of the Rete Ferroviaria Italiana (RFI) focuses on the design of an ATO system integrated with the ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System/European Train Control System) standard for High Speed (HS) lines. The aim is to increase the level of automation of national signalling systems, improving their performance and reliability. Numerous engineering challenges have been faced given the heterogeneity of the components with which the system interfaces and of the modules that compose it, as well as compliance with regulations. Numerous engineering challenges have been faced given the heterogeneity of the components with which the system interfaces and of the modules that compose it, as well as compliance with regulations.

Technical complexity is addressed through the use of model-based design, which allows effective management of development processes. The work makes use of co-design strategies and an interdisciplinary approach in order to facilitate co-design and synergy between teams with diverse expertise put in place by the Bruno Kessler Foundation, the University of Naples Federico II and the University of Salerno. Formal methods for software specification and design are adopted to ensure high safety and robustness standards, with the use of advanced validation and development tools such as SCAD and MATLAB. This article focuses on one of the crucial aspects of the project: the control architecture designed for driving the vehicle, illustrating the design choices, the solutions adopted and the implications on the overall operation of the system. From the review of literature on ATO systems, examples of control architectures developed for the GoA4 level of automation in HS trains operating with the ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System/European Train Control System) system are extremely limited, highlighting a research area that is still little explored.

Two main problems are mainly addressed in literature for the improvement of these systems [1]:

sul funzionamento complessivo del sistema. Dalla revisione della letteratura sui sistemi ATO, gli esempi di architetture di controllo sviluppate per il livello di automazione GoA4 nei treni AV che operano col sistema ERTMS/ETCS (*European Rail Traffic Management System/European Train Control System*) sono estremamente limitati, evidenziando un ambito di ricerca ancora poco esplorato.

In letteratura, si affrontano prevalentemente due problemi principali per il miglioramento di tali sistemi [1]:

1. l'ottimizzazione del profilo di velocità, un problema complesso con molteplici obiettivi e diversi vincoli, inclusi i limiti di velocità, la curvatura del tracciato e l'efficienza della trazione;
2. il controllo dell'inseguimento (*tracking*) della velocità del treno, reso difficile dai modelli dinamici complessi del treno, influenzati dall'alta velocità e da ambienti esterni complessi.

Per affrontare l'obiettivo dell'ottimizzazione del profilo di velocità, sono stati sviluppati nuovi algoritmi capaci di generare traiettorie di velocità ottimali in tempo reale, minimizzando il consumo energetico e soddisfacendo vincoli operativi e di sicurezza. Il secondo obiettivo, relativo al controllo dell'inseguimento della velocità, presenta difficoltà crescenti man mano che aumenta la velocità del treno, per la presenza di dinamiche non lineari e incerte.

Le soluzioni attuali si limitano ad analizzare scenari di guida specifici con un ristretto numero di manovre previste. Il livello GoA4, invece, richiede che i treni siano in grado di adattarsi dinamicamente a una vasta gamma di condizioni di guida reali, che includono numerose manovre [3]. Questo implica che il treno debba decidere autonomamente quale manovra eseguire in base alla situazione di guida, anche in presenza di eventi imprevisti che potrebbero richiedere una riprogrammazione della traiettoria, come un intervento del sistema ETCS. Inoltre, deve essere in grado di gestire le transizioni tra le diverse manovre e stabilire priorità tra di esse.

L'articolo è strutturato come segue: nelle sezioni 2, 3 vengono approfonditi rispettivamente progetti di treni autonomi sul panorama internazionale e l'evoluzione degli standard ERTMS/ATO. Il sistema ERTMS/ATO è stato implementato per l'applicazione specifica del prototipo di veicolo ispettivo URV (*Unmanned Railway Vehicle*) di Ricerca e Sviluppo di RFI che viene presentato con una breve descrizione nella sezione 4 con la relativa architettura del sistema ATO. Nella sezione 5 viene affrontato il problema della progettazione dell'architettura di controllo per la guida autonoma per un sistema ERTMS/ATO GoA4 e nella sezione 6 viene descritta la validazione sperimentale del sistema.

2. Progetti correlati

Il crescente interesse negli ultimi anni per i sistemi a guida autonoma nel settore ferroviario è confermato anche dai progetti correlati che in Europa e nel mondo stan-

1. *optimisation of the speed profile, a complex problem with multiple objectives and different constraints, including speed limits, track curvature and traction efficiency;*
2. *tracking control of train speed, made difficult by complex dynamic models of the train, influenced by high speed and complex external environments.*

New algorithms have been developed to address the objective of speed profile optimisation, capable of generating optimal speed trajectories in real time, minimising energy consumption and satisfying operational and safety constraints. The second objective, relating to speed tracking control, presents increasing difficulties as train speed increases, due to the presence of non-linear and uncertain dynamics.

The current solutions are limited to analysing specific driving scenarios with a limited number of planned manoeuvres. The GoA4 level, on the other hand, requires trains to be able to dynamically adapt to a wide range of real driving conditions, including numerous manoeuvres [3]. This implies that the train must independently decide which manoeuvre to perform based on the driving situation, even in the presence of unforeseen events that could require reprogramming of the trajectory, such as an intervention by the ETCS system. In addition, it must be able to manage the transitions between the different manoeuvres and establish priorities between them.

The article is structured as follows: in sections 2, 3, autonomous driving train projects on the international scene and the evolution of ERTMS/ATO standards are discussed respectively. The ERTMS/ATO system has been implemented for the specific application of the RFI Research and Development Unmanned Railway Vehicle (URV) prototype which is presented with a brief description in section 4 with the related ATO system architecture. Section 5 addresses the problem of designing the control architecture for autonomous driving for an ERTMS/ATO GoA4 system and section 6 describes the experimental validation of the system.

2. Related projects

The growing interest in recent years for self-driving systems in the railway sector is also confirmed by the related projects that are fuelling the development and consolidation of this technology in Europe and in the world. An example of an ETCS-based GoA2 ATO project is the Digital S-Bahn Amburg project, led by Deutsche Bahn which, together with Siemens, demonstrated the potential of self-driving trains, on 23 km of the S21 line between Berliner Tor and Auhmühle, during the ITS World Congress event in Hamburg in October 2021. In Australia, on the other hand, the AutoHaul project for Rio Tinto implements a fully autonomous mining freight train. Developed by Hitachi Rail STS, AutoHaul began commercial service in 2018 and is based on the ATO system alongside the European ERTMS/ETCS level 2 signalling system and a collision detection system. In Germany, Alstom recently presented the ARTE (Autonomous Regional Train Evolution) project, which aims to show how auto-

no alimentando lo sviluppo e il consolidamento di questa tecnologia. Un esempio di progetto di ATO GoA2 basato su ETCS è il progetto Digital S-Bahn Amburg, guidato da Deutsche Bahn che, insieme a Siemens, ha dimostrato, su 23 km della linea S21 tra Berliner Tor e Auhmühle, le potenzialità di treni a guida autonoma durante l'evento ITS World Congress di Amburgo nell'ottobre 2021. In Australia, invece, il progetto AutoHaul per Rio Tinto realizza un treno merci minerario a guida completamente autonoma. Sviluppato da Hitachi Rail STS, AutoHaul ha iniziato il servizio commerciale nel 2018 e si basa sul sistema ATO affiancato al sistema di segnalamento europeo ERTMS/ETCS di livello 2 e ad un sistema di rilevamento delle collisioni. In Germania, Alstom ha recentemente presentato il progetto ARTE (*Autonomous Regional Train Evolution*), che intende mostrare come l'operazione ferroviaria automatizzata e accompagnata può essere implementata mediante retrofit dei veicoli, sistemi di telecamere per il rilevamento degli ostacoli e, al posto delle apparecchiature ETCS a bordo, un sistema di riconoscimento delle immagini che elabora i segnali ferroviari esistenti. Il progetto è finanziato dal governo tedesco ed è sviluppato in collaborazione con l'ente di trasporto pubblico LNVGI, il centro aerospaziale tedesco DLR e l'Università di Berlino. Due interessanti progetti relativi a sistemi ATO GoA4 sono stati avviati in Francia, distinguendo i programmi di ricerca e sviluppo per treni merci o per servizio passeggeri. Lanciato nel 2018, *Autonomous Freight Train* è il progetto di ricerca relativo ai treni merci a guida autonoma, sviluppato dal consorzio composto da Alstom, Apsys, Altran, Hitachi, Railenium e SNCF. In parallelo, il progetto di ricerca per treni a guida autonoma per il servizio passeggeri riunisce Alstom, Bosch, Railenium, SNCF, Spirops e Thales e mira a realizzare un dimostratore prototipale attrezzando il treno passeggeri TER Regio 2N.

3. Evoluzione degli standard ERTMS/ATO

Le specifiche ATO sono state sviluppate per la prima volta nel progetto *Shift2Rail*, programma europeo di ricerca e sviluppo ferroviario. Questo sviluppo è stato suddiviso in due flussi di lavoro:

1. La prima fase di lavoro, incentrata su ATO GoA2 e sulle funzioni del *Driver Advisory System* GoA1, si è conclusa entro fine marzo 2022 con la consegna di una serie di specifiche stabili per il sistema ATO, pubblicate nella versione 2023 delle STI CCS (Specifiche Tecniche di Interoperabilità per Sistemi Comando e Controllo). Un'altra importante novità introdotta nella versione 2023 delle STI CCS e funzionale all'introduzione dei sistemi ATO, è la compatibilità ETCS per FRMCS (*Future Railway Mobile Communication Systems*), finalizzata a superare l'obsolescenza del GSM-R [5] (Fig. 1).
2. La seconda fase di lavoro di *Shift2Rail*, incentrata su ATO fino a GoA4 (e sulla compatibilità con le specifiche esistenti di GoA2), è stata completata nel 2023 con la consegna di un set di specifiche stabili per il sistema

mated and attended railway operation can be implemented through vehicle retrofits, camera systems for obstacle detection and, instead of on-board ETCS equipment, an image recognition system that processes existing railway signals. The project is funded by the German government and is developed in collaboration with the LNVGI public transport body, the German DLR aerospace centre and the University of Berlin. Two interesting projects related to ATO GoA4 systems have been launched in France, distinguishing research and development programmes for freight trains or passenger services. Launched in 2018, Autonomous Freight Train is the research project related to self-driving freight trains, developed by the consortium consisting of Alstom, Apsys, Altran, Hitachi, Railenium and SNCF. In parallel, the research project for autonomous driving trains for passenger service brings together Alstom, Bosch, Railenium, SNCF, Spirops and Thales and aims to create a prototype demonstrator by equipping the Regio 2N TER passenger train.

3. Evolution of ERTMS/ATO standards

The ATO specifications have been developed for the first time in the Shift2Rail project, a European railway research and development programme. This development has been divided into two workflows:

1. *The first work phase, focused on ATO GoA2 and the functions of the Driver Advisory System GoA1, ended by the end of March 2022 with the delivery of a series of stable specifications for the ATO system, published in version 2023 of the CCS TSIs (Technical Specifications for Interoperability for Command and Control Systems). Another important novelty introduced in version 2023 of the CCS TSIs and functional to the introduction of ATO systems, is the ETCS compatibility for FRMCS (Future Railway Mobile Communication Systems), aimed at overcoming the obsolescence of GSM-R [5] (Fig. 1).*
2. *The second work phase of Shift2Rail, focused on ATO up to GoA4 (and compatibility with the existing specifications of GoA2), was completed in 2023 with the delivery of a set of stable specifications for the ATO system up to GoA4. These specifications have been delivered to Europe's Rail Joint Undertaking programme, which can be considered the successor to Shift2Rail, for further development, with the ultimate goal of being included in an upcoming version of the CCS TSI.*

The reference ATO GoA2 architecture, shown in Fig. 2, describes how the interface between the on-board ATO system, its wayside counterpart, the ETCS system, the train systems and the related communication protocols is envisaged. This architecture highlights the presence of the Driver component, present on board the train, which interfaces with the ETCS DMI (Driver Machine Interface) functions also to stimulate the ATO functions.

On the other hand, the working hypothesis of the ATO GoA4 work group is to evolve the ERTMS/ETCS system, in order to supervise GoA4 operations. The decision-making

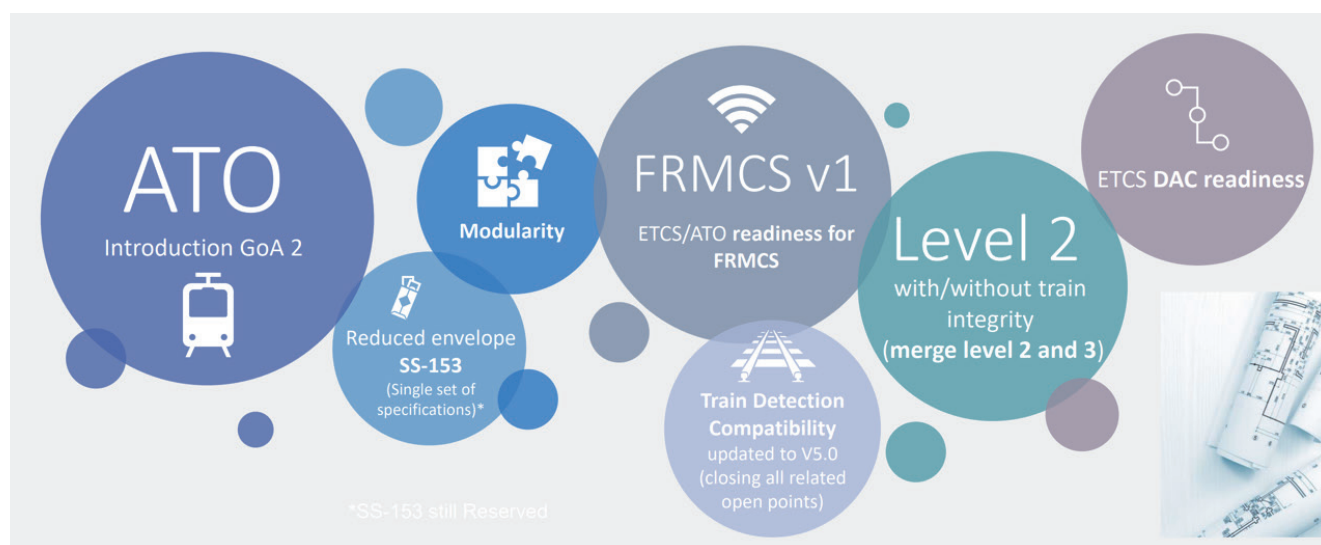


Figura 1 - CCS TSI Revision Package 2023 [4].
 Figure 1 - CCS TSI Revision Package 2023 [4].

ATO fino a GoA4. Queste specifiche sono state consegnate al programma *Europe's Rail Joint Undertaking*, che si può considerare il successore di *Shift2Rail*, per ulteriori sviluppi, con l'obiettivo finale di essere incluse in una prossima versione della STI CCS.

L'architettura ATO GoA2 di riferimento, mostrata in Fig. 2, descrive come viene previsto l'interfacciamento tra il sistema di bordo ATO, la sua controparte di terra, il sistema ETCS, i sistemi treno ed i relativi protocolli di comunicazione. In questa architettura si evidenzia la presenza del componente *Driver*, presente a bordo treno, che si interfaccia con le funzioni DMI (*Driver Machine Interface*) ETCS anche per stimolare le funzioni ATO.

D'altro canto, l'ipotesi di lavoro del gruppo di lavoro ATO GoA4 è quella di far evolvere il sistema ERTMS/ETCS, al fine di supervisionare le operazioni GoA4. Il sistema decisionale è collegato all'ERTMS/ETCS, in modo che applichi limitazioni alla guida in caso di pericolo (riduzioni di velocità, frenata di emergenza). Nell'architettura ATO GoA4, prodotta nell'ambito del progetto *X2Rail4* di *Shift2Rail* [7], il componente ADM (*Automatic Driving Module*) eredita la maggior parte delle funzioni ATO GoA2 e vengono introdotti componenti che automatizzano le azioni del macchinista come: *Perception*, che ha la funzione di percezione dell'ambiente esterno al treno, rilevando ostacoli o anomalie per la circolazione ferroviaria, e APM (*Automatic Processing Module*), che determina le azioni necessarie in base alle anomalie rilevate.

system is connected to the ERTMS/ETCS, so that it applies driving limitations in case of danger (speed reductions, emergency braking). In the ATO GoA4 architecture, produced as part of Shift2Rail's X2Rail4 project [7], the ADM (Automatic Driving Module) component inherits most of the ATO GoA2 functions and components are introduced that automate the driver's actions such as: Perception, which has the function of perceiving the environment outside the train, detecting obstacles or anomalies for rail traffic, and APM (Automatic Processing Module), which determines the necessary actions based on the anomalies detected.

The standardisation and testing work will continue within Europe's Rail Joint Undertaking [8] in the coming years, in particular with the R2DATO (Rail to Digital automated up to Autonomous Train Operation) project, the results of

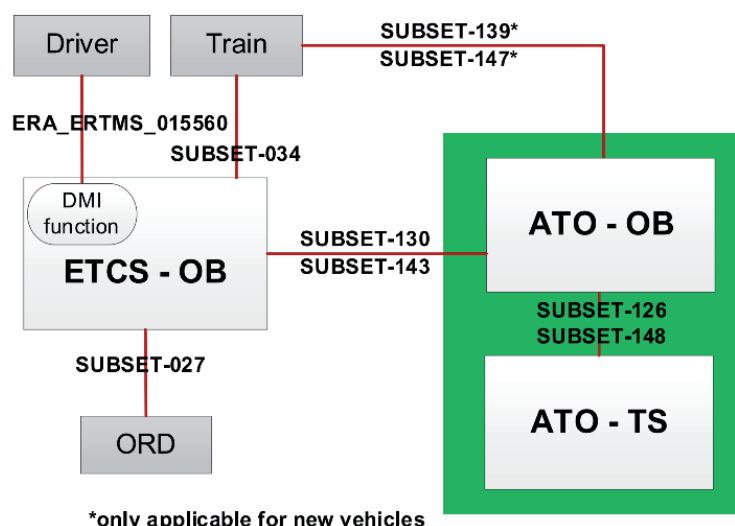


Figura 2 - Architettura di riferimento ERTMS/ATO fino a GoA2 [6].
 Figure 2 - ERTMS/ATO reference architecture up to GoA2 [6].

Il lavoro di standardizzazione e sperimentazione proseguirà nell'ambito di *Europe's Rail Joint Undertaking* [8] nei prossimi anni, in particolare con il progetto R2DATO (*Rail to Digital automated up to Autonomous Train Operation*), i cui risultati saranno disponibili entro il 2026. R2DATO presenta tra i principali obiettivi la digitalizzazione e l'automazione per lo sviluppo della nuova generazione di sistemi ATC (*Automatic Train Control*), tramite tecnologie come ATO, ETCS ibrido di livello 3, blocco mobile e lo sviluppo di tecnologie come connettività 5G.

4. Descrizione del sistema ERTMS/ATO GoA4 per URV

URV (*Unmanned Railway Vehicle*), in Fig. 3, presentato da RFI al pubblico ad Innotrans 2024 a Berlino [16], è il primo prototipo di veicolo ferroviario a guida autonoma attrezzato per viaggiare sulle linee Alta Velocità (AV) italiane e creato per svolgere attività ispettive in un contesto di sicurezza che consentirà di verificare lo stato delle linee AV in anticipo rispetto al passaggio del primo treno del giorno. Per poter raggiungere quest'obiettivo di monitorare lo stato delle linee AV in autonomia, RFI Ricerca e Sviluppo ha promosso l'iniziativa di realizzare un sistema ERTMS/ATO GoA4 per l'applicazione specifica URV, in collaborazione con diverse università italiane [9][10][11]. Il veicolo è stato sviluppato a partire da un carrello motore derivato dai treni ad alta velocità, conforme agli standard vigenti e alle norme di interoperabilità.

Data la sua struttura più compatta rispetto a un treno tradizionale, è stata adottata una soluzione a bassa tensione eliminando così la necessità di alimentazione tramite catenaria. Per garantire un'autonomia operativa fino a 400 km, il sistema di trazione è stato concepito in modalità ibrida, combinando due pacchi batteria con un motore diesel. Quest'ultimo non solo estende la percorrenza, ma contribuisce anche a ridurre il carico sulle batterie, ottimizzando le prestazioni complessive del veicolo.

Sul carrello è stata integrata una struttura in acciaio che supporta un'unità carenata, all'interno della quale sono alloggiati tutti i componenti del sistema di trazione, ad eccezione dei motori, oltre alla strumentazione per il monitoraggio della linea. Per garantire maggiore stabilità, l'unità è sostenuta da un sistema di sospensioni secondarie, progettato per ridurre le vibrazioni e migliorare la precisione delle misurazioni, prolungando al contempo la durata dei componenti.

URV è equipaggiato con un ERTMS/ATO GoA4 ed un sistema di visione progettato per garantire la sicurezza infrastrutturale rilevando, riconoscendo e tracciando gli ostacoli lungo il percorso dei treni. Nello specifico, sono presenti sensori a rilevamen-

which will be available by 2026. R2DATO presents among the main objectives the digitalisation and automation for the development of the new generation of ATC (Automatic Train Control) systems, through technologies such as ATO, level 3 hybrid ETCS, moving block and the development of technologies such as 5G connectivity.

4. Description of the ERTMS/ATO GoA4 system for URV

URV (Unmanned Railway Vehicle), see Fig. 3, presented by RFI to the public at Innotrans 2024 in Berlin [16], is the first prototype of a autonomous driving railway vehicle equipped to travel on Italian High Speed (HS) lines and created to carry out inspection activities in a safety context that will allow the conditions of the HS lines to be verified in advance of the transit of the first train of the day. In order to achieve this objective of monitoring the conditions of the HS lines independently, RFI Research and Development has promoted the initiative to create an ERTMS/ATO GoA4 system for the URV specific application, in collaboration with several Italian universities [9][10][11]. The vehicle has been developed from a motor bogie derived from high-speed trains, complying with current standards and interoperability regulations.

Given its more compact structure compared to a traditional train, a low voltage solution was adopted, thus eliminating the need for catenary power supply. To guarantee an operating range of up to 400 km, the traction system has been conceived in hybrid mode, combining two battery packs with a diesel engine. The latter not only extends the distance covered but also contributes to reducing the load on the batteries, optimising the overall performance of the vehicle.

A steel structure has been integrated on the bogie that supports a streamlined unit, inside which all the components of the traction system are housed, with the exception of the engines, as well as the instrumentation for monitoring the line. To ensure greater stability, the unit is supported by a secondary suspension system, designed to reduce vibrations



Figura 3 – Foto di URV di RFI.
Figure 3 – RFI URV picture.

to 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, poi, 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. Ad esempio, in Fig. 4, è possibile apprezzare immagini sincronizzate nello spettro *infrared* e *near-infrared*, catturate durante l'esecuzione di una corsa prova eseguita in notturna. Tali acquisizioni evidenziano come la scelta dello spettro consenta di rilevare diverse tipologie di informazioni presenti sulla scena come lo stato dei deviatori o i segnali lungo il tracciato. Ulteriori dettagli sul veicolo sono disponibili in [16].

Il sistema ATO di RFI 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 dati essenziali per l'operatività autonoma dei treni. Questo sistema raccoglie informazioni in tempo reale riguardanti le condizioni della linea ferroviaria, inclusi segnali, limiti di velocità, caratteristiche del tracciato come curve o pendenze, e le condizioni generali dei binari. Inoltre, si occupa della gestione e dell'aggiornamento degli orari, garantendo che il treno riceva informazioni precise sui tempi di fermata e di partenza previsti lungo il percorso. Il sistema ATO-TS, attraverso un'interazione continua con sistemi di controllo come ERTMS/ETCS (*European Rail Traffic Management System/European Train Control System*), si pone l'obiettivo di ottimizzare il traffico ferroviario, coordinando la circolazione dei treni in maniera efficiente e sicura. Uno dei suoi compiti principali è fornire al treno il profilo del viaggio, che include il percorso pianificato, i segmenti specifici della linea e le istruzioni operative. In sostanza, ATO-TS agisce come un centro di supervisione terrestre, garantendo che ogni treno riceva le informazioni necessarie per muoversi in sicurezza e secondo i piani prestabiliti.

Dall'altro lato, 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 localizzazione del treno avviene grazie a un continuo monitoraggio della posizione mediante odometri e altri sensori, garantendo che il treno sia sempre localizzato



Figura 4 – A sinistra, immagine infrared; a destra immagine near-infrared.
Figure 4 – On the left, infrared image; on the right, near-infrared image.

and improve the accuracy of measurements, while extending the life of the components.

The URV is equipped with an ERTMS/ATO GoA4 and a vision system designed to ensure infrastructure safety by detecting, recognising and tracking obstacles along the route of the trains. Specifically, there are 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. For example, in Fig. 4, synchronised images in the infrared and near-infrared spectrum can be observed, captured during the execution of a test run performed at night. These acquisitions highlight how the choice of spectrum allows detecting different types of information on the scene such as the conditions of the turnouts or the signals along the route. Further vehicle details can be found in [16].

RFI's ATO system consists of two cooperating systems: ATO *Track-Side* (TS) and ATO *On-Board* (OB). The ATO-TS represents the component of the automation system located along the railway line and has the task of managing and transmitting data essential for the autonomous operation of trains. This system collects real-time information regarding the conditions of the railway line, including signals, speed limits, track characteristics such as curves or slopes, and the general conditions of the tracks. In addition, it handles the management and updating of schedules, ensuring that the train receives precise information on the expected stop and departure times along the route. The ATO-TS system aims to optimise rail traffic, through continuous interaction with control systems such as ERTMS/ETCS (*European Rail Traffic Management System/European Train Control System*), coordinating the circulation of trains in an efficient and safe way. One of its main tasks is to provide the train with the journey profile, which includes the planned route, the specific segments of the line and the operating instructions. In essence, ATO-TS acts as a trackside supervision centre, ensuring that each train receives the information necessary to move safely and according to pre-established plans.

On the other hand, ATO-OB is the system installed on

in modo preciso sulla linea ferroviaria. Inoltre, ATO-OB si integra col sistema ETCS di bordo, assicurandosi che tutte le operazioni vengano eseguite nel rispetto dei limiti di sicurezza previsti, evitando ad esempio l'attivazione di frenate di emergenza o il superamento di velocità critiche. Nella progettazione del sistema è posta particolare attenzione agli aspetti di *cyber security*, implementando misure volte a garantire la protezione del sistema da accessi non autorizzati e attacchi esterni, al fine di preservarne l'integrità e la sicurezza operativa.

Quando tutte le condizioni operative sono soddisfatte, come la corretta localizzazione del treno e l'assenza di freni d'emergenza in funzione, ATO-OB assume il controllo completo, permettendo al treno di operare in modalità autonoma. In questa configurazione, il treno procede verso la destinazione finale rispettando i punti di fermata e l'orario assegnato, senza la necessità di un intervento umano diretto. Il sistema è inoltre in grado di gestire scenari complessi o non nominali, adattandosi a situazioni impreviste come il soccorso di un veicolo in avaria su una linea ad alta velocità. In sintesi, ATO-OB non solo esegue le istruzioni ricevute da ATO-TS, ma svolge un ruolo critico nell'automazione della guida, controllando ogni aspetto del movimento del treno con un alto livello di autonomia e sicurezza.

L'architettura logica di alto livello del sistema ATO RFI è descritta in Fig. 5.

L'Interface Manager permette ad ATO di interfacciarsi con i vari componenti, come ATO-TS, ETCS, SMO (*Speed Monitoring and Odometry*), SCS (*Sistema di Controllo e Sorveglianza*) e TIU (*Train Interface Unit*). Il Controller implementa la principale Macchina A Stati Finiti (MASF) per i diversi modelli operativi funzionali di ATO. Il Track Database Manager della linea utilizza i dati dell'odometro per localizzare il treno sulla linea e convalida il viaggio ricevuto dal lato binario prima dell'inizio della missione.

Il modulo *Autonomous Driving Function* riceve i dati del profilo della linea e del viaggio dal Track Database Manager della linea e li utilizza per generare un profilo di velocità ottimale e i relativi comandi di frenatura e trazione da inoltrare al TIU. L'Energy Manager utilizza i dati della batteria, del carburante e lo stato del sistema di trazione per monitorare il livello di energia e valutare il consumo necessario per completare la missione corrente.

Ad esempio, consideriamo lo scenario nominale con un treno fermo in un'area di rifornimento, destinata alla ricarica delle batterie e/o al rifornimento di carburante. Quando il veico-

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 concerning 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 train is located thanks to continuous position monitoring by odometers and other sensors, ensuring that the train is always precisely located on the railway line. In addition, ATO-OB integrates with the on-board ETCS system, ensuring that all operations are carried out in compliance with the safety limits provided, avoiding, for example, the activation of emergency braking or exceeding of critical speeds. Particular attention is paid to cybersecurity aspects in the design of the system, implementing measures aimed at ensuring the protection of the system from unauthorised access and external attacks, so as to preserve its integrity and operational safety.

When all operating conditions are met, such as the correct location of the train and the absence of emergency brakes in operation, ATO-OB assumes complete control, allowing the train to operate in autonomous mode. In this configuration, the train proceeds towards the final destination respecting the stop points and the assigned schedule, without the need for direct human intervention. The system is also able to manage complex or non-nominal scenarios, adapting to unforeseen situations such as the rescue of a damaged vehicle on a high-speed line. In summary, ATO-OB not only executes the instructions received from ATO-TS but plays a critical role in the automation of driving, controlling

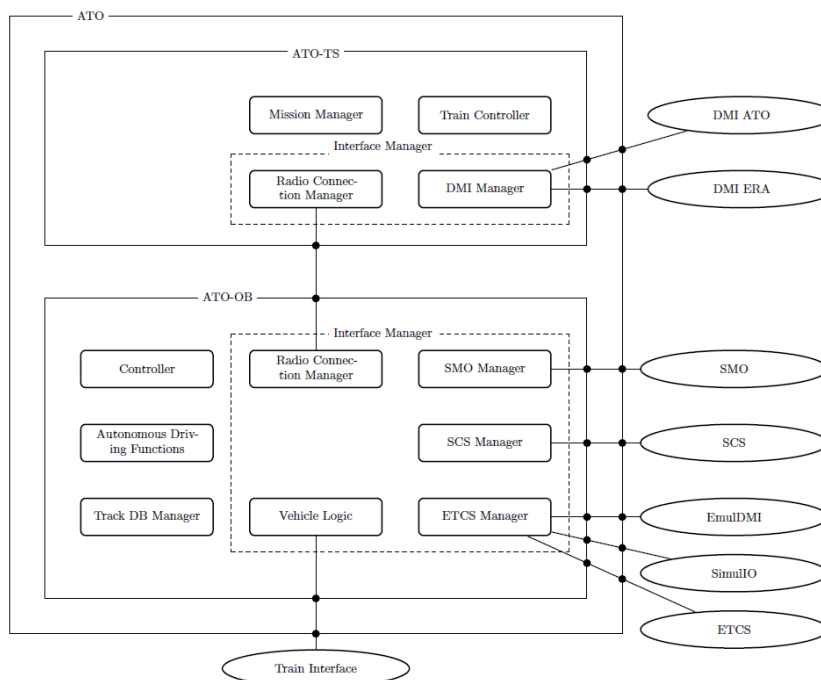


Figura 5 - Architettura logica di alto livello di ATO RFI.
Figure 5 - ATO RFI high-level logic architecture.

lo viene selezionato da un macchinista remoto attraverso l'interfaccia dedicata di ATO-TS, ATO-OB verifica che la sua versione del database corrisponda a quella di terra ed esegue alcuni test interni del sistema. Il macchinista remoto pianifica il profilo del viaggio, o *Journey Profile*, da inviare a bordo e attende un riscontro. Quando la modalità ETCS evolve nella modalità *Full Supervision* (FS) [12] e altre condizioni di ingaggio sono soddisfatte il macchinista remoto può abilitare la guida autonoma. In tale modalità di guida, il veicolo raggiunge la destinazione finale del *Journey Profile*, rispettando l'orario e i punti di fermata assegnati.

Durante la progettazione e lo sviluppo del sistema sono state affrontate numerose problematiche di natura ingegneristica, tra cui aspetti legati alla sicurezza, alla comunicazione e all'interazione con gli altri componenti di bordo e dell'infrastruttura esistente. Tuttavia, in questo articolo l'attenzione si focalizza su una delle sfide più significative del progetto: la progettazione dell'architettura di controllo per la guida autonoma. La trattazione si concentra sulle soluzioni adottate per affrontare le principali difficoltà riscontrate nella definizione dell'algoritmo, con un focus particolare sull'ottimizzazione delle prestazioni e sulla gestione di scenari complessi.

5. L'architettura di controllo per la guida autonoma di un sistema ERTMS/ATO

In un contesto GoA4, in cui sono richieste funzionalità completamente autonome e un sistema di funzionamento non presidiato [3], ATO deve svolgere tre compiti principali:

- a) pianificazione della traiettoria definendo le fasi di accelerazione, *cruising*, *coasting* o frenatura per soddisfare il programma orario e rispettare i vincoli imposti dal sistema di terra;
- b) inseguimento della traiettoria, ovvero assicurare, in tempo reale, che il treno segua il comportamento pianificato;
- c) adattabilità, ovvero rispondere a vincoli imposti in tempo reale dal sistema ETCS (*European Train Control System*) o da eventi imprevisti, come variazioni della *Movement Authority* (MA), per garantire puntualità, sicurezza ed efficienza energetica.

Pertanto, la guida di veicoli ferroviari ad alta velocità (AV) in tale contesto rappresenta una sfida complessa poiché ATO deve soddisfare:

1. la conformità al profilo del viaggio rispetto del programma orario per i punti di passaggio e di arresto previsti dal profilo di viaggio e dei limiti di velocità disposti lungo il tragitto;
2. la conformità ai vincoli imposti dal sistema ETCS, come il rispetto dei limiti di supervisione, delle curve di frenatura, dell'EoA e dei limiti di velocità per garantire la sicurezza del viaggio;

every aspect of the movement of the train with a high level of autonomy and safety.

The high-level logical architecture of the ATO RFI system is described in Fig. 5.

The Interface Manager allows ATO to interface with the various components, such as ATO-TS, ETCS, SMO (Speed Monitoring and Odometry), SCS (Control and Surveillance System) and TIU (Train Interface Unit). The Controller implements the main Finite State Machine (FSM) for the different ATO functional operating models. The line Track Database Manager uses the odometer data to locate the train on the line and validates the trip received from the track side before the start of the mission.

The Autonomous Driving Function module receives the line and journey profile data from the line Track Database Manager and uses them to generate an optimal speed profile and the related braking and traction commands to be forwarded to the TIU. The Energy Manager uses battery, fuel and traction system status data to monitor the energy level and assess the consumption needed to complete the current mission.

For example, consider the nominal scenario with a stationary train in a refuelling area, intended for recharging batteries and/or refuelling. When the vehicle is selected by a remote driver through the dedicated ATO-TS interface, ATO-OB verifies that its version of the database corresponds to the trackside version and performs some internal system tests. The remote driver plans the Journey Profile, to be sent on board and waits for a response. When the ETCS mode evolves into the Full Supervision (FS) mode [12] and other engagement conditions are met, the remote driver can enable autonomous driving. In this driving mode, the vehicle reaches the final destination of the Journey Profile, respecting the schedule and the assigned stop points.

Numerous engineering issues were addressed during the design and development of the system, including aspects related to safety, communication and interaction with the other on-board components and the existing infrastructure. However, in this article the focus is on one of the most significant challenges of the project: the design of the control architecture for autonomous driving. The discussion focuses on the solutions adopted to address the main difficulties encountered in defining the algorithm, with a particular focus on optimising performance and managing complex scenarios.

5. The control architecture for autonomous driving of an ERTMS/ATO system

In a GoA4 context, where fully autonomous functionality and an unattended operating system are required [3], ATO must perform three main tasks:

- a) *trajectory planning defining the phases of acceleration, cruising, coasting or braking to meet the schedule and comply with the constraints imposed by the trackside system;*

3. la conformità ai vincoli fisici del treno, come, ad esempio, velocità massima, tempo minimo di intervallo tra i treni (*headway time*) e tempo di reazione della frenatura;
4. la gestione di eventi anomali improvvisi, come la presenza di ostacoli sulla linea ferroviaria o nuove restrizioni imposte dal sistema ETCS;
5. la ripianificazione in tempo reale in base alle condizioni del veicolo e della linea durante il viaggio;
6. il comfort, la sicurezza e l'efficienza energetica, garantendo un inseguimento accurato della posizione e della velocità di riferimento in conformità con il profilo del viaggio (*Journey Profile*);
7. la robustezza, ovvero la capacità di far fronte alle non linearità della dinamica del veicolo e ai fattori ambientali esogeni.

L'obiettivo è stato dunque progettare un'architettura di controllo per ATO che soddisfi i requisiti del livello GoA4, ovvero garantendo l'esecuzione dei compiti di pianificazione, inseguimento e adattabilità, oltre a rispettare i requisiti sopra elencati.

Per affrontare il problema, è stata proposta un'architettura denominata *Autonomous Driving Function (ADF)*, progettata utilizzando l'approccio *Model-Based Control Design (MBCD)* con un modello dinamico non lineare del secondo ordine per la dinamica longitudinale di un veicolo ferroviario.

Nel MBCD, il modello del sistema è al centro dell'intero processo di sviluppo, dalla definizione dei requisiti fino ai test. Grazie alla simulazione in ogni fase, è possibile analizzare il comportamento del sistema in tempo reale e valutare diversi scenari evitando rischi e ritardi nella validazione del sistema.

Nell'analisi e nel controllo della dinamica di un veicolo ferroviario, è fondamentale disporre di un modello matematico che descriva il comportamento del sistema in funzione delle forze in gioco e delle condizioni operative. Questo modello si basa sulle equazioni del moto, che rappresentano l'equilibrio dinamico tra le forze esterne e la risposta del veicolo. Tuttavia, la complessità intrinseca del sistema ferroviario impone una serie di semplificazioni volte a rendere il modello trattabile sia dal punto di vista analitico che computazionale. In particolare, si adottano ipotesi che permettono di trascurare fenomeni di secondaria importanza rispetto agli obiettivi dell'analisi, come gli effetti di gioco tra gli organi meccanici o delle interazioni complesse con l'infrastruttura. Questo consente di ottenere una rappresentazione sufficientemente accurata della dinamica del veicolo, pur mantenendo una formulazione che ne permetta lo studio efficace e la progettazione di strategie di controllo. Questo tipo di modello in letteratura prende il nome di modello *control-oriented*.

Il moto di un veicolo ferroviario è un problema multidimensionale e lo stato dinamico del sistema è descritto da grandezze quali posizione, velocità e accelerazione, che

- b) *trajectory tracking*, i.e. ensuring, in real time, that the train follows the planned behaviour;
- c) *adaptability*, i.e. responding to constraints imposed in real time by the ETCS (European Train Control System) or by unforeseen events, such as changes in the Movement Authority (MA), to ensure punctuality, safety and energy efficiency.

Therefore, driving high-speed (HS) railway vehicles in this context represents a complex challenge since ATO must meet:

1. compliance with the journey profile in accordance with the timetable for the passing and stopping points provided for by the journey profile and the speed limits set along the route;
2. compliance with the constraints imposed by the ETCS system, such as compliance with supervision limits, braking curves, the EoA and speed limits to ensure the safety of the journey;
3. compliance with the physical constraints of the train, such as, for example, maximum speed, minimum interval time between trains (*headway time*) and braking reaction time;
4. the management of sudden anomalous events, such as the presence of obstacles on the railway line or new restrictions imposed by the ETCS system;
5. real-time rescheduling based on the conditions of the vehicle and the line during the journey;
6. comfort, safety and energy efficiency, ensuring an accurate tracking of the reference position and speed in accordance with the journey profile;
7. robustness, i.e. the ability to cope with the non-linearity of vehicle dynamics and exogenous environmental factors.

The objective was therefore to design a control architecture for ATO that meets the requirements of the GoA4 level, i.e. ensuring the execution of the planning, tracking and adaptability tasks, in addition to complying with the requirements listed above.

To address the problem, an architecture called *Autonomous Driving Function (ADF)* was proposed, designed using the *Model-Based Control Design (MBCD)* approach with a second-order non-linear dynamic model for the longitudinal dynamics of a railway vehicle.

In MBCD, the system model is at the heart of the entire development process, from requirements definition to testing. Thanks to the simulation in each phase, the behaviour of the system in real time and evaluation of the different scenarios can be analysed avoiding risks and delays in the validation of the system.

In the analysis and control of the dynamics of a railway vehicle, it is essential to have a mathematical model that describes the behaviour of the system as a function of the forces in play and the operating conditions. This model is

variano nel tempo in risposta alle forze applicate. Dunque, la dinamica longitudinale di un veicolo ferroviario AV *control-oriented*, inteso come unico corpo rigido, può essere descritta dal seguente sistema non lineare del secondo ordine, come modellato in [11]:

$$\begin{aligned} \dot{p}(t) &= v(t) \\ M\dot{v}(t) &= u(t) - F_r(v(t)) - F_{grad}(p(t)) - F_{curve}(p(t)), \end{aligned}$$

dove $p(t)$ [m] e v [m/s] sono la posizione e la velocità longitudinale del treno mentre M [kg] è la massa del rotabile. $F_r(v(t))$ [N] rappresenta la forza resistente dovuta alla resistenza al rotolamento e all'aerodinamica

$$F_r(t) = \gamma + v(t)\eta + v^2(t)\iota,$$

in cui γ, η e ι sono parametri fisici del modello empirico di Davis, ampiamente utilizzato per la simulazione dinamica dei treni e per l'ottimizzazione del consumo energetico. Tale modello suddivide la resistenza totale in tre componenti principali: una parte costante legata agli attriti interni indipendenti dalla velocità del veicolo (γ), una parte proporzionale alla velocità (η), dovuta principalmente all'attrito meccanico, e una componente quadratica (ι), che descrive la resistenza aerodinamica. $F_{grad}(p(t))$ [N] e $F_{curve}(p(t))$ [N] rappresentano le forze dovute alla pendenza del tracciato e al raggio di curvatura, calcolate come:

$$\begin{aligned} F_{grad}(p(t)) &= Mg \sin(\alpha(p(t))), \\ F_{curve}(p(t)) &= Mg \sin\left(\frac{\kappa(p(t))}{\rho(p(t))}\right), \end{aligned}$$

dove g [m/s²] è l'accelerazione di gravità, $\alpha(p(t))$ e $\rho(p(t))$ gli angoli di pendenza e il raggio di curvatura e $\kappa(p(t))$ è un parametro empirico che dipende dal raggio di curvatura e dallo scartamento ferroviario.

Infine, $u(t)$ [N] è il comando di controllo che fornisce la forza di trazione/frenata desiderata.

Per una rappresentazione compatta e generalizzabile di tali equazioni, è conveniente l'uso del formalismo vettoriale e matriciale, che consente di esprimere in maniera sintetica le relazioni tra le forze agenti, le accelerazioni e le velocità del sistema. Dunque, considerando $x(t) = [p(t) \ v(t)]^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ il vettore di stato del sistema, composto dalle variabili di posizione e velocità, la dinamica non lineare può essere scritta nello spazio di stato da $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$ e dunque

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} v(t) \\ \varphi(p(t), v(t)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u(t)$$

Dove $b = 1/M$ e $\varphi(p(t), v(t))$ è il campo vettoriale non lineare che rappresenta le forze esterne definito come

$$\varphi(p(t), v(t)) = -\frac{1}{M}(F_r(v(t)) - F_{grad}(p(t)) - F_{curve}(p(t))).$$

Il campo vettoriale è una funzione che associa a ogni punto dello spazio di stato un vettore che rappresenta una grandezza fisica variabile. In questo contesto, $\varphi(p(t), v(t))$ rappresenta il campo vettoriale non lineare che descrive le forze esterne agenti sul sistema in funzione della posizione $p(t)$ e della velocità $v(t)$. Questo significa che, per ogni

based on motion equations, which represent the dynamic balance between external forces and the response of the vehicle. However, the inherent complexity of the railway system imposes a number of simplifications aimed at making the model manageable from both an analytical and computational point of view. In particular, hypotheses are adopted that allow neglecting phenomena of secondary importance with respect to the objectives of the analysis, such as the effects of backlash between the mechanical components or complex interactions with the infrastructure. This allows obtaining a sufficiently accurate representation of the vehicle dynamics, while maintaining a formulation that allows the effective study and design of control strategies. This type of model in literature is called a control-oriented model.

The motion of a railway vehicle is a multidimensional problem, and the dynamic condition of the system is described by quantities such as position, speed and acceleration, which vary over time in response to the forces applied. Therefore, the longitudinal dynamics of a control-oriented HS railway vehicle, understood as a single rigid body, can be described by the following non-linear system of the second order, as modelled in [11]:

$$\begin{aligned} \dot{p}(t) &= v(t) \\ M\dot{v}(t) &= u(t) - F_r(v(t)) - F_{grad}(p(t)) - F_{curve}(p(t)), \end{aligned}$$

where $p(t)$ [m] and v [m/s] are the position and longitudinal speed of the train while M [kg] is the mass of the rolling stock. $F_r(v(t))$ [N] represents the resisting force due to rolling resistance and aerodynamics

$$F_r(t) = \gamma + v(t)\eta + v^2(t)\iota,$$

where γ, η e ι are physical parameters of Davis' empirical model, widely used for the dynamic simulation of trains and for the optimisation of energy consumption. This model divides the total resistance into three main components: a constant part linked to internal frictions independent of vehicle speed (γ), a part proportional to speed (η), mainly due to mechanical friction, and a quadratic component (ι), which describes aerodynamic resistance. $F_{grad}(p(t))$ [N] and $F_{curve}(p(t))$ [N] represent the forces due to the slope of the track and the radius of curvature, calculated as:

$$\begin{aligned} F_{grad}(p(t)) &= Mg \sin(\alpha(p(t))), \\ F_{curve}(p(t)) &= Mg \sin\left(\frac{\kappa(p(t))}{\rho(p(t))}\right), \end{aligned}$$

where g [m/s²] is the acceleration of gravity, $\alpha(p(t))$ and $\rho(p(t))$ the angles of inclination and the radius of curvature e $\kappa(p(t))$ is an empirical parameter that depends on the radius of curvature and the railway gauge.

Finally, $u(t)$ [N] is the control command that provides the desired traction/braking force.

For a compact and generalisable representation of these equations, it is convenient to use the vector and matrix formalism, which allows the relations between the acting forces, accelerations and speeds of the system to be expressed in a synthetic way. Therefore, considering $x(t) = [p(t) \ v(t)]^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ the state vector of the system, composed of the variables

stato del sistema, il campo vettoriale fornisce l'intensità e la direzione delle forze che influenzano il moto.

Definito il modello dinamico, si procede alla sintesi del controllore, il cui scopo è garantire il rispetto dei requisiti prestazionali, come stabilità, sicurezza e comfort, compensando le perturbazioni e le variazioni delle condizioni operative.

Come illustrato in Fig. 6, il sistema ATO-TS e il Track DataBase forniscono i dati del veicolo, la modalità operativa di ATO e il profilo di viaggio da seguire; il sistema di visione acquisisce ed elabora in tempo reale le immagini dell'ambiente circostante, influenzando la guida in base alle condizioni operative; il sistema ETCS di bordo fornisce dati odometrici, limiti di velocità e distanza da rispettare. L'Autonomous Driving Function (ADF) raccoglie e processa tali informazioni per calcolare opportunamente l'Optimal Dynamic Profile (ODP) da imporre al treno nel rispetto dei requisiti di cui sopra e si occupa di inseguire la traiettoria ODP fornendo così gli input di controllo al basso livello per la guida del veicolo.

of position and speed, the non-linear dynamics can be written in the state space with $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$ and therefore

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} v(t) \\ \varphi(p(t), v(t)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u(t)$$

Where $b = 1/M$ e $\varphi(p(t), v(t))$ is the non-linear vector field representing the external forces defined as

$$\varphi(p(t), v(t)) = -\frac{1}{M}(F_r(v(t)) - F_{grad}(p(t)) - F_{curve}(p(t))).$$

The vector field is a function that associates each point of the state space with a vector that represents a variable physical quantity. In this context, $\varphi(p(t), v(t))$ represents the non-linear vector field that describes the external forces acting on the system as a function of position $p(t)$ and speed $v(t)$. This means that, for each state of the system, the vector field provides the intensity and direction of the forces that influence the motion.

Once the dynamic model has been defined, the controller is summarised, the purpose of which is to ensure compli-

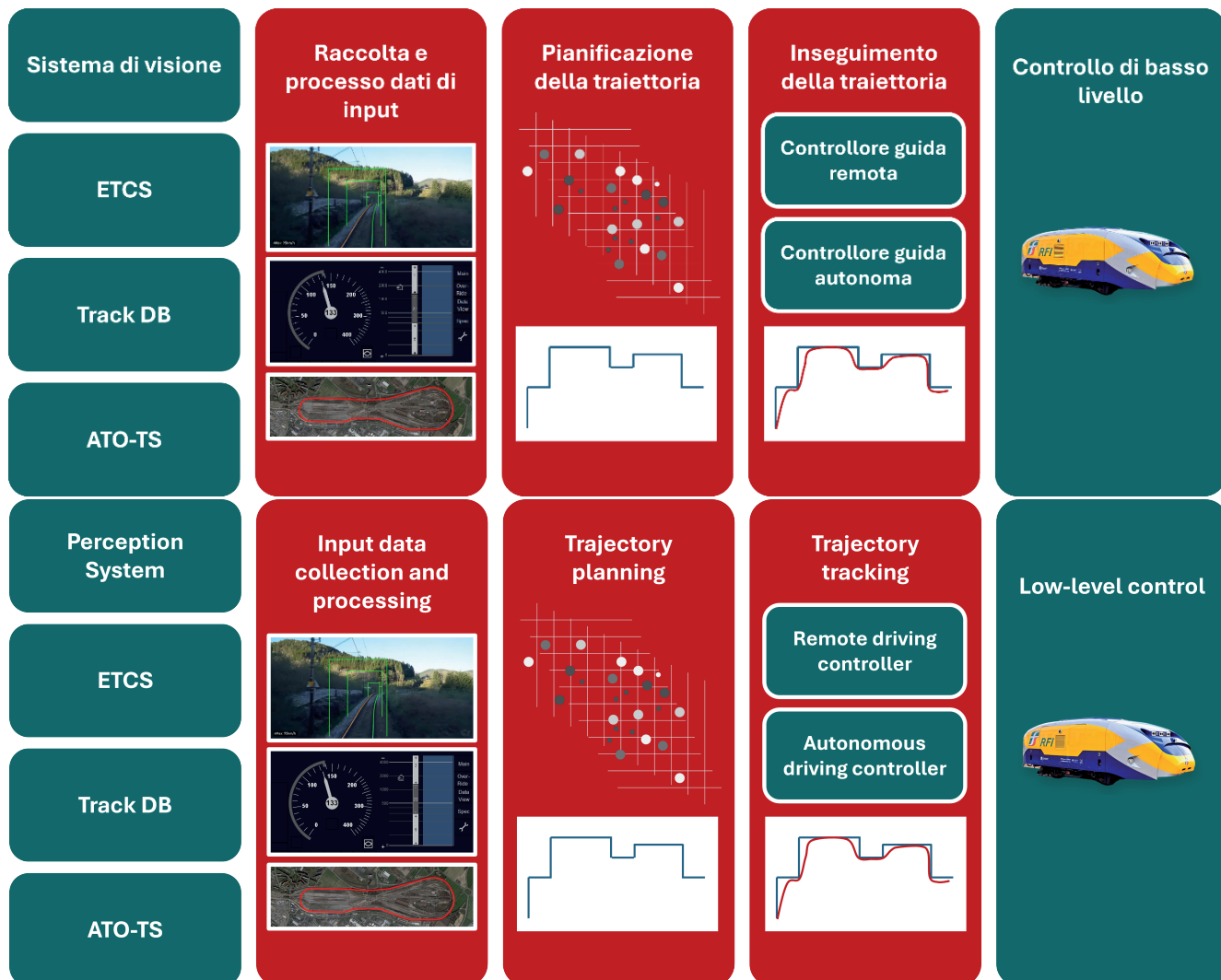


Figura 6 - Schema illustrativo delle funzioni a supporto del sistema di guida autonoma.
 Figure 6 - Illustrative diagram of the functions supporting the autonomous driving system.

URV è stato progettato per poter offrire due modalità di guida:

- guida remota (*Remote Driving, RD*), utilizzata quando un macchinista remoto, attraverso un sistema di visione in tempo reale e un'interfaccia operatore dedicata, può guidare il veicolo come se fosse a bordo
- guida autonoma (*Autonomous Driving, AD*), attivata quando tutte le operazioni di guida vengono gestite in modo automatico.

Ogni modalità di guida ha il suo controllore che calcola l'azione di controllo $u(t)$ da applicare al veicolo, sulla base del riferimento. Questo tiene conto dei vincoli in tempo reale e delle problematiche di robustezza rispetto a eventi imprevisi o anomalie. L'abilitazione dell'opportuno controllore di guida, nonché l'elaborazione e la pianificazione delle traiettorie è affidata ad un componente chiamato *Supervisory Controller (SC)* che non è altro che il cervello dell'architettura ADF. Il componente SC calcola in tempo reale i diversi profili ODP per le varie situazioni di guida, anche in presenza di eventi critici o situazioni inattese. Inoltre, gestisce l'abilitazione o la disabilitazione delle modalità di guida remota/autonoma, ottimizzando la transizione tra le due logiche di controllo. In particolare:

- quando viene ricevuto un segnale di velocità desiderata costante da un operatore esterno, il componente SC calcola la velocità di riferimento temporale $v_{ref}(t)$ e abilita la modalità di guida remota RD, garantendo l'inseguimento della velocità obiettivo a partire dal valore corrente di riferimento di velocità, che può essere sia a veicolo fermo che in movimento in guida autonoma, in conformità coi vincoli del tracciato;
- in guida autonoma AD, basandosi sul profilo del viaggio e sui dati della linea, SC calcola il profilo ODP $x_{ref}(t)$, espresso in termini di posizione e velocità temporali, a partire dal valore corrente di riferimento di velocità, che può essere sia a veicolo fermo che in movimento in guida remota.

5.1. Guida remota

Nella modalità di guida remota, ricevuto il riferimento di velocità $v_d(t)$ assegnato dall'operatore remoto tramite l'interfaccia dedicata, l'obiettivo di controllo è progettare un'azione di controllo $u(t)$ tale per cui $\lim_{t \rightarrow \infty} \|v_{ref}(t) - v(t)\| = 0$, compensando tutti i disturbi esterni e le incertezze sulla dinamica del veicolo. Questa condizione è fondamentale per garantire la stabilità asintotica del sistema controllato, ovvero che l'errore di velocità si annulli nel lungo periodo, indipendentemente dalle condizioni iniziali. Senza questa condizione sul limite, il sistema potrebbe presentare errori residui, oscillazioni persistenti o instabilità, compromettendo la precisione e l'affidabilità del controllo. Considerare il comportamento per $t \rightarrow \infty$ è quindi necessario per dimostrare che il sistema, una volta sottoposto all'azione di controllo $u(t)$,

ance with performance requirements, such as stability, safety and comfort, compensating for disturbances and variations in operating conditions.

As illustrated in Fig. 6, the ATO-TS system and the Track DataBase provide the vehicle data, the ATO operating mode and the journey profile to be followed; the vision system acquires and processes the images of the surrounding environment in real time, influencing driving according to the operating conditions; the on-board ETCS system provides odometric data, speed and distance limits to be observed. The Autonomous Driving Function (ADF) collects and processes this information to properly calculate the Optimal Dynamic Profile (ODP) to be imposed on the train in compliance with the above requirements and is responsible for following the ODP trajectory thus providing the control inputs at the low level for driving the vehicle.

The URV has been designed to offer two driving modes:

- remote Driving (RD), used when a remote driver can drive the vehicle as if it were on board, through a real-time vision system and a dedicated operator interface.
- autonomous driving (AD), activated when all driving operations are managed automatically.

Each driving mode has its own controller that calculates the control action $u(t)$ to be applied to the vehicle, based on the reference. This takes into account real-time constraints and robustness issues with respect to unforeseen events or anomalies. The enabling of the appropriate driving controller, as well as the processing and planning of trajectories is entrusted to a component called Supervisory Controller (SC) which is none other than the brain of the ADF architecture. The SC component calculates the different ODP profiles for the various driving situations in real time, even in the presence of critical events or unexpected situations. In addition, it manages the enabling or disabling of remote/autonomous driving modes, optimising the transition between the two control logics. In particular:

- when a constant desired speed signal is received from an external operator, the SC component calculates the time reference speed $v_{ref}(t)$ and enables the RD remote driving mode, guaranteeing the odometric of the target speed starting from the current speed reference value, which can be either when the vehicle is stationary or in motion in autonomous driving, in accordance with the constraints of the track;
- in AD autonomous driving, based on the journey profile and the line data, the SC calculates the ODP profile $x_{ref}(t)$, expressed in terms of position and time speeds, starting from the current speed reference value, which can be either with the vehicle stationary or in motion in remote driving.

5.1. Remote driving

In remote driving mode, having received the speed reference $v_d(t)$ assigned by the remote operator via the dedicated interface,

raggiunga e mantenga nel tempo il comportamento desiderato.

Per fare ciò, il controllore di RD è progettato con una strategia di controllo Proporzionale-Integrale-Derivativa Gain-Scheduling (PIDGS) con in aggiunta un'azione in avanti (*feedforward*):

$$u_{RD}(t) = k_p(t)e(t) + k_i(t) \int_0^t e(s)ds + k_d(t)\dot{e}(t) + Mgsin(\bar{\alpha}(t)) + Mf_v \cos(\bar{\alpha}(t)),$$

dove $e(t) = v_{ref}(t) - v(t)$ è l'errore di inseguimento (*tracking*), f_v e M sono rispettivamente il coefficiente di resistenza al rotolamento e la massa del veicolo; $k_p(t)$, $k_i(t)$ e $k_d(t)$ sono i guadagni di controllo adattivi proporzionale, integrale e derivativo; $\bar{\alpha}(t) = f(p_{ref}(t))$ è il profilo di gradiente, calcolato come funzione della posizione relativa al profilo di riferimento di posizione $p_{ref}(t)$.

Per la taratura dei guadagni di controllo proporzionale, integrale e derivativo, è stato individuato $v_{ref}(t)$ come variabile di *scheduling* σ . In questo modo, i guadagni riflettono i cambiamenti del comportamento del riferimento e questo consente di guidare il movimento non lineare del treno per tutte le differenti condizioni operative imposte, assicurando quindi un buon inseguimento del riferimento nonostante le non linearità dovute alla resistenza aerodinamica.

L'azione in avanti (*feedforward*), invece, consente di compensare disturbi noti come i fattori legati alla linea, che agiscono sul moto del veicolo. Pertanto, mitiga la possibile differenza tra la posizione desiderata del veicolo $p_{ref}(t)$, ovvero la posizione desiderata in relazione alla velocità $v_{ref}(t)$, e la misura di posizione $p(t)$ che conduce alla $\alpha(t) = f(p(t)) \neq \bar{\alpha}(t) = f(p_{ref}(t))$.

5.2. Guida autonoma

Per la guida autonoma (*Autonomous Driving, AD*), dato il comportamento imposto da SC $x_{ref}(t) = [p_{ref}(t) v_{ref}(t)]^T$, calcolato in base al *Journey Profile* e sui vincoli imposti dalla linea e dal sistema ETCS, la strategia di controllo deve mirare ad ottimizzare il profilo di guida e i consumi energetici e garantire un inseguimento ottimo del riferimento. Dunque, l'obiettivo di controllo è progettare un'azione di controllo $u(t)$ tale per cui $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_{ref}(t) - x(t)\| = 0$. Come per il caso precedente, se imponessimo l'uguaglianza del riferimento e della variabile di stato in un tempo finito T , non potremmo garantire che il sistema non si allontani dall'equilibrio dopo T . Per ottenere ciò, soddisfacendo i vincoli del moto del veicolo in tempo reale, il controllore di guida autonoma è stato progettato con una strategia di controllo *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) come soluzione del seguente problema di ottimizzazione:

$$u_{AD}(t) = arg \left(\min_u J \right) \Leftrightarrow \min_{u_{AD}} J = \int_t^{t+T} L(x(\tau, t), x_{ref}(\tau, t), u_{AD}(\tau, t)) d\tau$$

the control objective is to design a control action $u(t)$ such that $\lim_{t \rightarrow \infty} \|v_{ref}(t) - v(t)\| = 0$, thus compensating all external disturbances and uncertainties on the vehicle dynamics. This condition is fundamental to guarantee the asymptotic stability of the controlled system, that is, that the speed error is cancelled in the long run, regardless of the initial conditions. Without this condition on the limit, the system could have residual errors, persistent oscillations or instability, compromising the accuracy and reliability of the control. Considering the behaviour for $t \rightarrow \infty$ it is therefore necessary to demonstrate that, once subjected to the control action $u(t)$, the system achieves and maintains the desired behaviour over time.

To do this, the RD controller is designed with a Proportional-Integral-Derivative Gain-Scheduling (PIDGS) control strategy with a feedforward action:

$$u_{RD}(t) = k_p(t)e(t) + k_i(t) \int_0^t e(s)ds + k_d(t)\dot{e}(t) + Mgsin(\bar{\alpha}(t)) + Mf_v \cos(\bar{\alpha}(t)),$$

where $e(t) = v_{ref}(t) - v(t)$ is the tracking error, f_v and M are the rolling resistance coefficient and vehicle mass, respectively; $k_p(t)$, $k_i(t)$ and $k_d(t)$ are the proportional, integral, and derivative adaptive control gains; $\bar{\alpha}(t) = f(p_{ref}(t))$ is the gradient profile, calculated as a function of position relative to the position reference profile $p_{ref}(t)$.

For the calibration of proportional, integral and derivative control gains, $v_{ref}(t)$ was identified as a scheduling σ variable. In this way, the gains reflect the changes in the behaviour of the reference, and this allows guiding the non-linear movement of the train for all the different imposed operating conditions, thus ensuring a good tracking of the reference despite the non-linearities due to the aerodynamic resistance.

The feedforward action, on the other hand, allows compensating for disturbances known as line-related factors, which act on the movement of the vehicle. Therefore, it mitigates the possible difference between the desired position of the vehicle $p_{ref}(t)$, i.e. the desired position in relation to the speed $v_{ref}(t)$, and the position measurement $p(t)$ leading to the $\alpha(t) = f(p(t)) \neq \bar{\alpha}(t) = f(p_{ref}(t))$.

5.2. Autonomous driving

For autonomous driving (AD), given the behaviour imposed by the SC $x_{ref}(t) = [p_{ref}(t) v_{ref}(t)]^T$, calculated based on the Journey Profile and the constraints imposed by the line and the ETCS system, the control strategy must aim to optimise the driving profile and energy consumption and ensure an excellent tracking of the reference. Therefore, the control objective is to design a control action $u(t)$ such that $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_{ref}(t) - x(t)\| = 0$. As with the previous case, if we imposed the equality of the reference and the condition variable at a finite time T , we would not be able to guarantee that the system moves away from equilibrium after T . To achieve this, satisfying the constraints of vehicle motion in real time, the autonomous driving controller has been designed with a Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) control strategy as a solution to the following optimisation problem:

considerando

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u_{AD}(t)) \\ v_{min} &\leq v(\tau, t) \leq v_{max} \\ u_{min} &\leq u_{AD}(\tau, t) \leq u_{max}\end{aligned}$$

dove $u_{AD}(\tau, t)$ rappresenta l'ingresso di controllo che deve essere ottimizzato, $x(\tau, t)$ è lo stato attuale del veicolo v_{min} , v_{max} e u_{min} , u_{max} rappresentano rispettivamente i limiti inferiori e superiori ammissibili della velocità e dell'ingresso di controllo. La parte integrale del funzionale di costo J , dunque L , è progettata come

$$L = \omega_1 (p(t) - p_{ref}(t))^2 + \omega_2 (v(t) - v_{ref}(t))^2 + \omega_3 u(t)^2 + \omega_4 \Delta u(t)^2,$$

dove ω_1 , ω_2 , ω_3 , e ω_4 sono pesi positivi. Il primo e il secondo termine di L garantiscono che il veicolo insegue il riferimento $x_{ref}(t)$, mentre gli ultimi due assicurano che l'ingresso di controllo eviti variazioni repentine.

5.3. Supervisory Controller

Il *Supervisory Controller* (SC) calcola il profilo ODP e gestisce l'abilitazione/disabilitazione dei controllori guida remota ed autonoma in funzione dei diversi modi operativi di ATO. Inoltre, deve garantire una gestione adeguata delle fasi di transizione tra i due controllori, evitando che durante queste fasi si verifichino variazioni improvvise nell'accelerazione del veicolo.

Per la generazione della traiettoria di riferimento, nel caso del modo AD, l'ODP, definito come $x_{ref}(t)$, viene calcolato a partire dal *Journey Profile* (JP) ricevuto. Il JP è strutturato come una lista di punti significativi lungo il tracciato, ciascuno dei quali specifica tempi di partenza e di arrivo (t_d e t_a) e indica se il punto è di arresto (*Stopping Point*) o di transito (*Passing Point*). Per generare l'ODP, viene utilizzato il metodo di pianificazione di traiettorie punto-punto (*Point-To-Point*, PTP) basato su segmenti lineari con curve paraboliche (*Linear Segments with Parabolic Blends*, LSPB). Questo metodo consente di creare una traiettoria che collega due punti, iniziale e finale, rispettando vincoli specifici sui tempi di arrivo e i limiti di velocità del tratto in questione.

Dato l'intero spazio delle configurazioni di tutti i possibili ODP chiamato X , $x_{ref}(t) \rightarrow X$, è una funzione parametrica rispetto al tempo, generata dalla minimizzazione del consumo energetico totale lungo il segmento del tracciato considerando i vincoli da applicare.

Questa procedura è eseguita anche per la generazione dell'ODP in guida remota RD con la sola differenza che il profilo di riferimento di velocità $v_{ref}(t)$ è definito da un macchinista remoto e, di conseguenza, il processo di ottimizzazione genera una manovra di accelerazione/decelerazione che porta il veicolo dal valore di velocità corrente verso il valore di velocità obiettivo. È importante notare che la traiettoria pianificata x_{ref} rimane invariata fino a quando non si verifica un cambiamento

$$u_{AD}(t) = \arg(\min_u J) \Leftrightarrow \min_{u_{AD}} J = \int_t^{t+T} L(x(\tau, t), x_{ref}(\tau, t), u_{AD}(\tau, t)) d\tau$$

considering

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u_{AD}(t)) \\ v_{min} &\leq v(\tau, t) \leq v_{max} \\ u_{min} &\leq u_{AD}(\tau, t) \leq u_{max}\end{aligned}$$

where $u_{AD}(\tau, t)$ represents the control input that must be optimised, $x(\tau, t)$ is the current state of the vehicle v_{min} , v_{max} and u_{min} , u_{max} respectively represent the lower and upper permissible limits of the speed and the control input. The integral part of the cost function J , therefore L , is designed as

$$L = \omega_1 (p(t) - p_{ref}(t))^2 + \omega_2 (v(t) - v_{ref}(t))^2 + \omega_3 u(t)^2 + \omega_4 \Delta u(t)^2,$$

where ω_1 , ω_2 , ω_3 , and ω_4 are positive weights. The first and second terms of L ensure that the vehicle pursues the reference $x_{ref}(t)$, while the last two ensure that the control input avoids sudden changes.

5.3. Supervisory Controller

The *Supervisory Controller* (SC) calculates the ODP profile and manages the enabling/disabling of the remote and autonomous driving controllers according to the different ATO operating modes. In addition, it must ensure adequate management of the transition phases between the two controllers, avoiding sudden variations in the acceleration of the vehicle during these phases.

For the generation of the reference trajectory, in the case of AD mode, the ODP, defined as $x_{ref}(t)$, is calculated from the *Journey Profile* (JP) received. The JP is structured as a list of significant points along the track, each of which specifies departure and arrival times (t_d and t_a) and indicates whether the point is a *Stopping Point* or a *Passing Point*. To generate the ODP, the *Point-To-Point* (PTP) trajectory planning method based on *Linear Segments with Parabolic Blends* (LSPB) is used. This method allows creating a trajectory that connects two starting and ending points, respecting specific constraints on arrival times and speed limits of the section in question.

Given the entire space of the configurations of all the possible ODPs X , $x_{ref}(t) \rightarrow X$, it is a parametric function with respect to time, generated by minimising the total energy consumption along the segment of the path considering the constraints to be applied.

This procedure is also performed for the generation of the ODP in remote driving RD with the only difference that the speed reference profile $v_{ref}(t)$ is defined by a remote driver and, consequently, the optimisation process generates an acceleration/deceleration manoeuvre that brings the vehicle from the current speed value towards the target speed value. It is important to note that the planned trajectory x_{ref}

nella modalità di guida. Quando viene comandata una transizione tra i controllori (ad esempio, da RD ad AD o viceversa), diventa necessario aggiornare l'ODP. Le soluzioni vengono calcolate attraverso metodi di programmazione non lineare, avvalendosi delle diverse tecniche descritte in [13].

Per la selezione dell'ingresso di controllo da applicare alla dinamica del treno $u(t)$ e per la gestione della transizione tra i controllori RD e AD, è stata definita una Macchina a Stati Finiti (MASF) composta da cinque stati e le cui transizioni sono strettamente correlate ai possibili stati operativi di ATO, come mostrato in Fig. 7:

- OFF: il sistema di guida è inattivo e SC non abilita alcun controllore;
- AD: SC abilita il controllore di guida autonoma AD, e quindi $u(t)$ viene posto uguale a $u_{AD}(t)$ come definito nella sezione 5.2.
- RD: SC abilita il controllore di guida remota RD, e quindi $u(t)$ viene posto uguale a $u_{RD}(t)$, come definito nella sezione 5.1.
- HRD2AD: stato di gestione per la transizione da guida remota RD a guida autonoma AD. SC impone al veicolo un'azione di controllo senza discontinuità (*bumpless transfer*), garantendo la continuità del segnale di controllo durante il passaggio ad AD.
- HAD2RD: stato di gestione per la transizione da guida autonoma AD a guida remota RD, con un'azione di controllo senza discontinuità analoga a quella descritta per HRD2AD.

La MASF permette di adattare il comportamento del SC in base ai modi operativi di ATO descritti sopra. In particolare, l'utilizzo di strategie di trasferimento senza discontinuità è fondamentale per evitare comportamenti indesiderati o effetti destabilizzanti causati dai transitori durante il cambio di strategia di controllo. La commutazione tra controllori può generare segnali di controllo discontinui con improvvisi picchi, che possono compromettere le prestazioni dinamiche del sistema e, in applicazioni pratiche, risultare dannosi. Per evitare questi effetti, è essenziale adottare un segnale di controllo continuo durante le fasi di transizione. In tali stati, poiché generalmente $u_{RD}(t_k) \neq u_{AD}(t_k)$, dove t_k rappresenta l'istante di tempo in cui SC seleziona lo stato HRD2AD o HAD2RD, l'obiettivo è modificare la strategia di controllo per assicurare la continuità del segnale senza compromettere le prestazioni complessive del sistema. Tra le diverse strategie proposte in letteratura per il trasferimento senza discontinuità, è stata adottata un approccio in cui entrambi i controllori (RD e AD) funzionano contemporaneamente durante gli istanti di commutazione. Per maggiori dettagli sulle progettazioni, sulla pianificazione dell'ODP e sulle dimostrazioni della stabilità a ciclo chiuso delle soluzioni proposte si rimanda a [11].

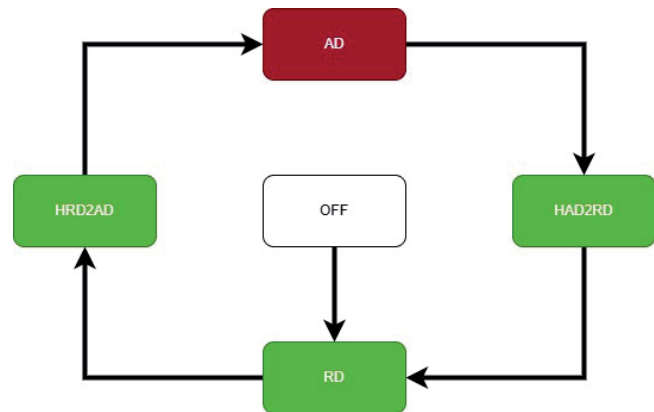


Figura 7 - MASF di ADF di alto livello.
Figure 7 - FSM of high-level ADF.

remains unchanged until a variation in the driving mode occurs. When a transition between controllers is ordered (for example, from RD to AD or vice versa), it becomes necessary to update the ODP. The solutions are calculated through non-linear programming methods, using the different techniques described in [13].

For the selection of the control input to be applied to the train dynamics $u(t)$ and for the management of the transition between the RD and AD controllers, a Finite State Machine (FSM) has been defined consisting of five conditions and whose transitions are closely related to the possible ATO operating conditions, as shown in Fig. 7:

- OFF: the driving system is disabled, and the SC does not enable any controller;
- AD: the SC enables the AD autonomous driving controller, and therefore $u(t)$ is set equal $u_{AD}(t)$ to as defined in section 5.2.
- RD: the SC enables the remote driving controller RD, and therefore $u(t)$ is set equal $u_{RD}(t)$, as defined in section 5.1.
- HRD2AD: management status for the transition from RD remote driving to AD autonomous driving. The SC imposes a non-discontinuous control action (*bumpless transfer*) on the vehicle, guaranteeing the continuity of the control signal during the transition to AD.
- HAD2RD: management status for the transition from AD autonomous driving to RD remote driving, with a continuous control action similar to that described for HRD2AD.

The FSM allows the behaviour of the SC to be adapted according to the ATO operating modes described above. In particular, the use of seamless transfer strategies is essential to avoid unwanted behaviour or destabilising effects caused by transients during the change of control strategy. Switching between controllers can generate discontinuous control signals with sudden spikes, which can compromise the dynamic performance of the system and can be harmful in practical applications. To avoid these effects, it is essential to adopt a continuous control signal during the tran-

6. Validazione sperimentale in laboratorio e in campo

Lo sviluppo del sistema ATO ha richiesto un approccio collaborativo e interdisciplinare e per tale motivo, è stata adottata una metodologia basata su modelli, in modo da facilitare il co-design e la sinergia tra team con competenze eterogenee. Per ciascuno dei partner accademici e industriali che hanno contribuito allo sviluppo del sistema ATO e degli altri sistemi del prototipo URV, è stato necessario definire accuratamente e successivamente condividere, requisiti di interfaccia e protocolli di comunicazione. Questo lavoro di cooperazione ha consentito di assicurare la compatibilità e il corretto funzionamento sia a livello di singoli sottosistemi che a livello dell'intero sistema integrato.

L'evoluzione del progetto ha seguito un percorso strutturato in diverse fasi con un progressivo incremento dell'integrazione e della complessità delle prove. Per validare la progettazione software e hardware di ATO per URV, sono stati definiti diversi ambienti di prova [14]:

1. Ambiente di test *Software in the Loop* (SiL) per integrazione software ATO: tali test sono finalizzati a testare le logiche di sottosistema ed emulare i sottosistemi esterni con modelli software. Vengono utilizzati ambienti come SCADE e Matlab/Simulink per mettere in esecuzione scenari di test per inizializzazione del sistema, configurazione missione, eseguire scenari di guida autonoma e remota, di rilevazione di anomalie e attivazione di differenti strategie di guida. Tali ambienti consentono preliminari integrazioni a livello funzionale tra sistemi di terra e di bordo.
2. Ambiente di test *Hardware in the Loop* (HiL) per integrazione tra ATO e il materiale rotabile: in tali ambienti i sottosistemi di gestione apparati treno emulati sono rimpiazzati con quelli reali, mentre rimangono emulati i dispositivi di basso-livello (come la centralina freni e la piastra pneumatica).
3. Ambiente di test di integrazione tra ATO col sistema ETCS: in questo ambiente il sottosistema ETCS emulato viene rimpiazzato con quello reale, mentre rimangono emulati i dispositivi di basso-livello, questi test sono eseguiti su host stimolando il software ETCS reale, oppure con piattaforme ATO ed ETCS target mediante generazione di telegrammi BTM (*Balise Transmission Module*) e messaggi RBC (*Radio Block Center*) di prova.
4. Ambiente di test di integrazione dinamica: in questo ambiente, tutti i sistemi di bordo sono quelli reali. Viene utilizzato un banco a rulli progettato per contenere il veicolo reale ed eseguire i primi test di accettazione. Questo banco emula un binario senza fine con rulli motorizzati ed è controllato per simulare coppie di resistenza. La missione è gestita da personale tecnico RFI tramite apposite interfacce operatore, simulando i sistemi ERTMS/ETCS di terra.

sition phases. In such conditions, since generally $u_{RD}(t_k) \neq u_{AD}(t_k)$, where t_k represents the time instant in which the SC selects the HRD2AD or HAD2RD condition, the objective is to modify the control strategy to ensure the continuity of the signal without compromising the overall performance of the system. Among the different strategies proposed in literature for seamless transfer, an approach was adopted in which both controllers (RD and AD) operate simultaneously during the switching moments. For more details on the designs, the planning of the ODP and the demonstrations of the closed-cycle stability of the proposed solutions, please refer to [11].

6. Experimental validation in the laboratory and in the field

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. It was necessary to accurately define and subsequently share, interface requirements and communication protocols for each of the academic and industrial partners that contributed to the development of the ATO system and the other systems of the URV prototype. This cooperative work has ensured compatibility and proper functioning both at individual subsystems level and at the entire integrated system level.

The evolution of the project followed a structured path in different phases with a progressive increase in the integration and complexity of the tests. Several test environments have been defined to validate the software and hardware design of ATO for URV [14]:

1. *Software in the Loop* (SiL) test environment for ATO software integration: these tests are aimed at testing subsystem logic and emulating external subsystems with software models. Environments such as SCADE and Matlab/Simulink are used to implement test scenarios for system initialisation, mission configuration, autonomous and remote driving scenarios, anomaly detection and activation of different driving strategies. These environments allow preliminary functional integrations between trackside and on-board systems.
2. *Hardware in the Loop* (HiL) test environment for integration between ATO and rolling stock: in such environments the emulated train equipment management subsystems are replaced with the real ones, while low-level devices (such as the brake control unit and the pneumatic plate) remain emulated.
3. *ATO integration test environment with the ETCS system*: in this environment the emulated ETCS subsystem is replaced with the real one, while the low-level devices remain emulated, these tests are performed on hosts by stimulating the real ETCS software, or with target ATO and ETCS platforms by generating BTM (*Balise Tran-*

L'ambiente di test di integrazione dinamica ha permesso di condurre una campagna di test esaustiva volta a simulare condizioni operative realistiche e a individuare potenziali problematiche. I test hanno esplorato diversi aspetti critici, tra cui la capacità di inseguimento dei riferimenti di velocità e posizione, la stabilità del sistema a velocità sempre crescenti e la sua integrazione con altri sottosistemi, come il sistema di segnalamento.

L'analisi dei risultati dei test, documentata in specifici report, ha portato a una serie di interventi migliorativi, tra cui si citano la revisione di alcuni requisiti funzionali del sistema ATO RFI, la ritaratura dei guadagni e dei pesi degli algoritmi di controllo per la guida e l'introduzione di un sistema di filtraggio delle misure per ottimizzare la robustezza e l'accuratezza. Questo processo iterativo di test e ottimizzazione ha consentito di anticipare le sfide operative e di affinare il sistema, garantendo prestazioni affidabili in condizioni reali e ponendo solide basi per il suo utilizzo in linea. Tali test in laboratorio consentono il raggiungimento di un livello di maturità tecnologica del sistema equivalente a TRL (*Technology Readiness Level*)¹ [15].

Per i test in linea, è stato utilizzato il circuito di RFI di Bologna San Donato Fig. 8, 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. Le prime prove avevano l'obiettivo di testare in campo diverse funzioni di ATO, in particolare le funzioni di guida autonoma e remota, di localizzazione e filtraggio delle misure, di gestione dati ETCS e della logica di veicolo e della diagnostica di bordo, nonché la comunicazione radio terra/bordo.

Data la natura innovativa del progetto, ovvero la marcia autonoma di un veicolo ferroviario senza personale a bordo, è stato necessario definire un processo strutturato e dettagliato per regolamentare questa tipologia di test e assicurare la sicurezza durante le prove. Il



Figura 8 - URV sul circuito di Bologna San Donato di RFI.
Figure 8 - URV on RFI's Bologna San Donato circuit.

mission Module) telegrams and RBC (Radio Block Center) test messages.

4. *Dynamic Integration test environment: in this environment, all on-board systems are the real ones. A roller bench designed to contain the actual vehicle and perform the first acceptance tests is used. This bench emulates an endless track with motorised rollers and is controlled to simulate drag torques. The mission is managed by RFI technical personnel through special operator interfaces, simulating the trackside ERTMS/ETCS systems.*

The dynamic integration test environment allowed conducting a comprehensive test campaign aimed at simulating realistic operating conditions and identifying potential problems. The tests explored several critical aspects, including the ability to track speed and position references, the stability of the system at ever-increasing speeds, and its integration with other subsystems, such as the signalling system.

The analysis of the test results, documented in specific reports, has led to a number of improvements, including the review of some functional requirements of the ATO RFI system, the adjustment of the gains and weights of the control algorithms for driving and the introduction of a measurement filtering system to optimise robustness and accuracy. This iterative testing and optimisation process has allowed anticipating operational challenges and refining the system, ensuring reliable performance in real-world conditions and laying a solid foundation for its use online. These laboratory

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.

circuito è stato predisposto per l'esecuzione di test con ETCS L1 con la configurazione di opportuni telegrammi per regolare e proteggere la marcia del veicolo. La campagna di test preliminare di agosto 2024 è stata quindi impostata con movimenti a bassa velocità in modo da valutare il comportamento in un ambiente operativo reale. Inoltre, per aumentare la sicurezza durante l'esecuzione delle prove, gli azionamenti di basso livello sono stati configurati in modo da saturare richieste di trazione positiva superiori ad una soglia predefinita. Lo scenario prevedeva di avanzare in guida remota a 30 km/h col bordo ETCS in modalità *Staff Responsible* (SR) finché non venisse captato il gruppo di balise che abilita la transizione in modalità *Full Supervision* (FS). A quel punto, il veicolo è stato arrestato attraverso l'interfaccia operatore dedicata e sono stati forniti i dati del *Journey Profile* (JP) al bordo. Il profilo di viaggio è stato realizzato in modo da pianificare delle traiettorie di velocità che non superino i 40 km/h e prevedeva un giro completo dell'anello di circa 5.7 km con tre punti di arresto. In fase preliminare, lo scenario di test è stato eseguito in ambiente HiL per poi essere riprodotto sul circuito. Di seguito in Fig. 9 e Fig. 10 si riporta un confronto tra i risultati ottenuti in laboratorio e quelli raccolti da una prova in campo.

In un unico scenario, è possibile apprezzare il comportamento dei due algoritmi di controllo, il primo di guida remota e successivamente quello di guida autonoma. In simulazione Fig. 9, il primo risulta attivo fino all'istante 2.110^4 s e successivamente viene attivato quello di guida autonoma mediante la procedura di ingaggio ATO attraverso l'interfaccia operatore remota. Nella prova sul circuito, la guida remota viene attivata fino a 1.710^4 s e poi si passa alla guida autonoma come nel caso precedente. Dai grafici di velocità delle prove in campo, si apprezza che il comportamento degli algoritmi è conforme alle attese. Si rileva un ritardo nell'inseguimento del riferimento di velocità durante i transitori in accelerazione dovuti alla succitata saturazione sulla trazione positiva imposta agli azionamenti di basso livello.

7. Conclusioni

Le campagne di test, sia in ambienti simulati che su linea, hanno fornito risultati incoraggianti sulla validità della proposta e delle soluzioni ingegneristiche adottate. L'architettura del sistema ERTMS/ATO GoA4, progettata per treni AV e adattata al prototipo URV, ha soddisfatto i requisiti di pianificazione, controllo e gestione delle transizioni operative, dimostrando robustezza e sicurezza durante la marcia. Sebbene ci siano ancora margini per ulteriori miglioramenti, come l'ottimizzazione delle strategie di controllo o l'integrazione di funzionalità aggiuntive, il prototipo rappresenta un passo importante verso l'implementazione su larga scala di veicoli ferroviari autonomi. I test in campo consentono il raggiungimento di un livello di maturità tecnologica del sistema equivalente a TRL 7 (Fig. 11).

tests allow achieving a level of system technological maturity equivalent to TRL (Technology Readiness Level)¹ [15].

For in line tests, the RFI circuit of Bologna San Donato was used (Fig. 8), 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. The first tests were aimed at field testing several ATO functions, in particular the autonomous and remote driving, measurement location and filtering, ETCS data management and vehicle logic and on-board diagnostics functions, as well as trackside/on-board radio communication.

It was necessary to define a structured and detailed process to regulate this type of test and ensure safety during the tests, given the innovative nature of the project, i.e. the autonomous operation of a railway vehicle without personnel on board. The circuit has been prepared for testing with ETCS L1 with the configuration of appropriate telegrams to adjust and protect the running of the vehicle. The August 2024 preliminary test campaign was then set up with low-speed movements in order to evaluate behaviour in a real operating environment. In addition, the low-level activations have been configured so as to saturate positive traction requests above a predefined threshold, to increase safety during the execution of the tests. The scenario involved advancing in remote driving at 30 km/h with the ETCS on-board system in Staff Responsible (SR) mode until the group of balises that enables the transition into Full Supervision (FS) mode was captured. At that point, the vehicle was stopped through the dedicated operator interface and the Journey Profile (JP) data was provided to the on-board system. The journey profile was made in order to plan speed trajectories that do not exceed 40 km/h and included a complete turn of the ring of about 5.7 km with three stopping points. In the preliminary phase, the test scenario was executed in a HiL environment and then reproduced on the circuit. A comparison between the results obtained in the laboratory and those collected from a field test is shown below in Fig. 9 and Fig. 10.

In a single scenario, the behaviour of the two control algorithms, the first of remote driving and subsequently that of autonomous driving can be observed. In simulation (Fig. 9), the first is active until 2.110^4 s and then the autonomous driving is activated by the ATO engagement procedure through the remote operator interface. In the circuit test, remote driving is activated up to 1.710^4 s and then switches to autonomous driving as in the previous case. From the speed graphs of the field tests, the behaviour of the algorithms complying with expectations can be observed. A delay is detected in the tracking of the reference speed during acceleration transients due to the aforementioned saturation

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 research and industrial development fields. The scale consists of nine levels, ranging from initial concept to implementation and operational use.

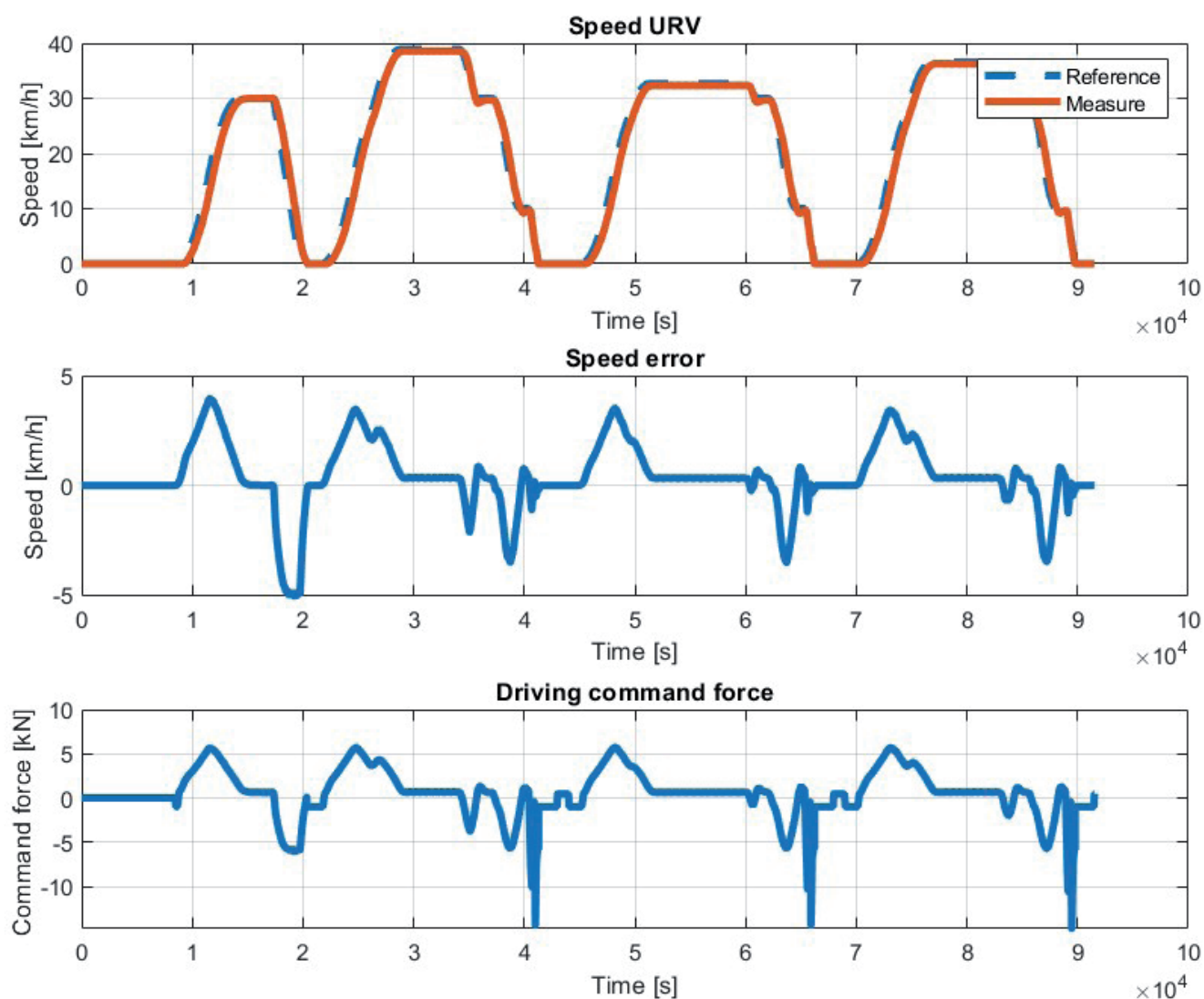


Figura 9 – SIMULAZIONE 1) grafico della velocità in funzione del tempo; 2) grafico dell'errore di velocità; 3) grafico del profilo di trazione generato da ATO.

Figure 9 – SIMULATION 1) graph of speed as a function of time; 2) graph of speed error; 3) graph of the traction profile generated by ATO

A partire da agosto 2024, sono state pianificate delle sessioni di test con cadenza mensile, in base alle disponibilità del circuito. Il piano di test consente di validare il sistema, schedando per ogni sessione le funzioni obiettivo da collaudare ed incrementando progressivamente la velocità massima compatibilmente coi limiti imposti dal circuito di prova e dall'infrastruttura di segnalamento disponibile, valutando la reazione del sistema anche in condizioni degradate.

Nell'ambito di tali attività, si inseriscono corse prova finalizzate sia ad ottimizzare le performance degli algoritmi di guida e di localizzazione, sia a migliorare la configurazione del sistema di visione. Risultano in corso acquisizioni di misure dai sensori installati sul mezzo, immagini per l'addestramento degli algoritmi di visione (Fig. 4) e veri-

7. Conclusions

The test campaigns, both in simulated and on field environments, have provided encouraging results on the validity of the proposal and the engineering solutions adopted. The architecture of the ERTMS/ATO GoA4 system, designed for HS trains and adapted to the URV prototype, has met the planning, control and management of operational transitions requirements, proving robustness and safety during travel. Although there is still room for further improvements, such as optimising control strategies or integrating additional functionalities, the prototype represents an important step towards the large-scale deployment of autonomous railway vehicles. Field tests allow the achievement of a level of technological maturity of the system equivalent to TRL 7 (Fig. 11).

Starting from August 2024, test sessions have been planned

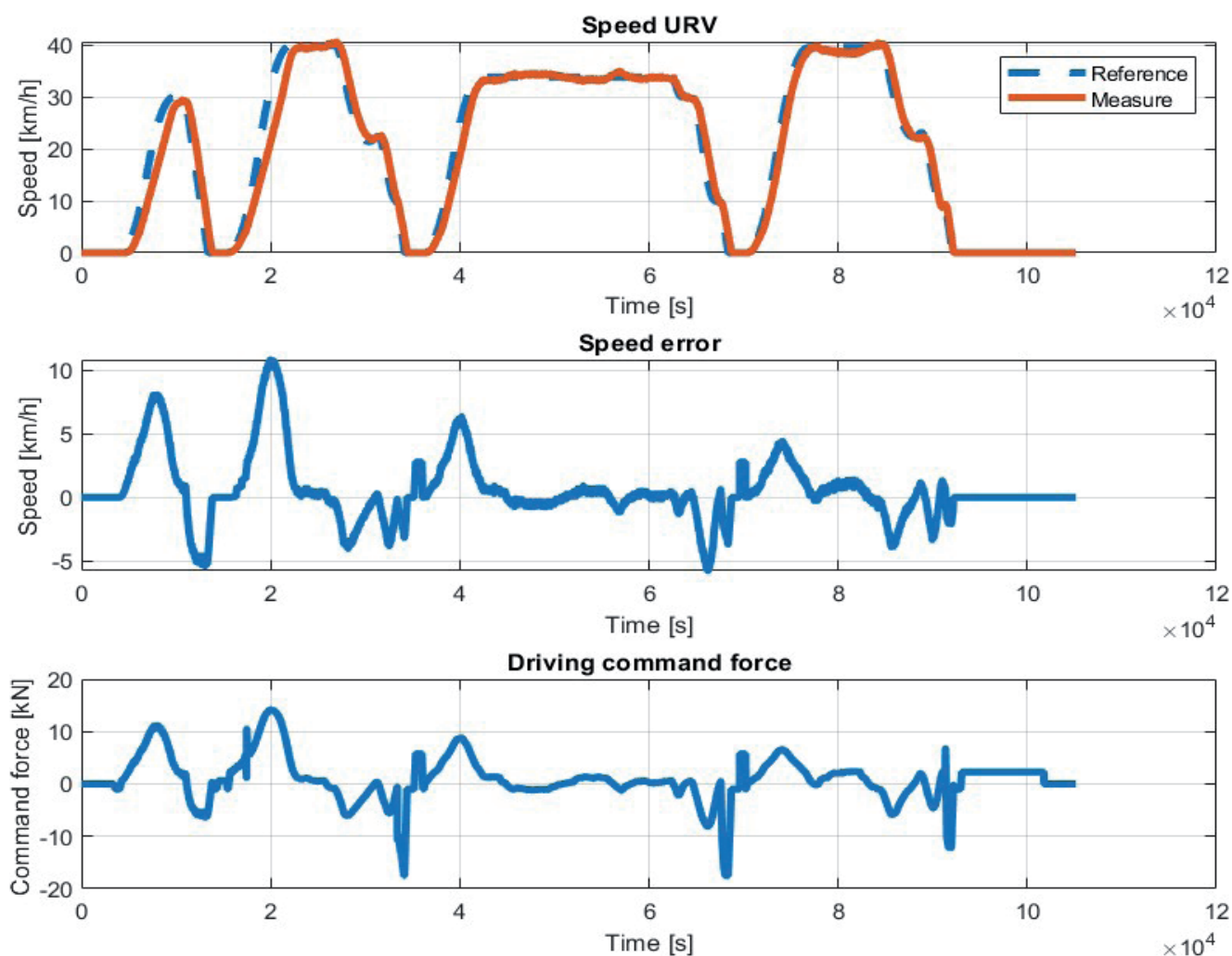


Figura 10 – PROVA SUL CIRCUITO 1) grafico della velocità in funzione del tempo; 2) grafico dell'errore di velocità; 3) grafico del profilo di trazione generato da ATO.
 Figure 10 – TEST ON THE CIRCUIT 1) graph of speed as a function of time; 2) graph of speed error; 3) graph of the traction profile generated by ATO.

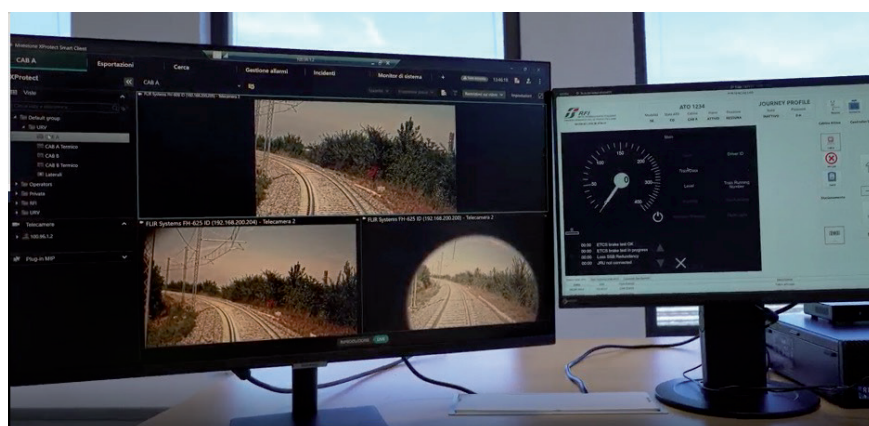


Figura 11 - Piattaforma di ATO di terra nella sala circolazione del circuito di Bologna San Donato (RFI).
 Figure 11 - Trackside ATO platform in the circulation room of the Bologna San Donato circuit (RFI).

on a monthly basis, based on the availability of the circuit. The test plan allows the system to be validated, scheduling the objective functions to be tested for each session and progressively increasing the maximum speed compatible with the limits imposed by the test circuit and the available signalling infrastructure, evaluating the reaction of the system even in degraded conditions.

As part of these activities, test runs are included aimed both at optimising the performance of the driving and location algorithms, and at improving the configuration of the vision system. Acquisitions of measurements from the sensors installed on the vehicle, images for the training of vision algorithms

fiche di connettività terra/bordo. Una volta disponibile il livello di segnalamento ERTMS L2, per il quale il veicolo è stato progettato, il collaudo potrà validare completamente le funzioni di segnalamento.

(Fig. 4) and trackside/on board connectivity checks are in progress. Once the ERTMS L2 signalling level is available, for which the vehicle has been designed, the test can fully validate the signalling functions.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] YIN J., TANG T., YANG L., XUN J., HUANG Y., GAO Z. (2017), "Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey" *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 85, pp. 548-572.
- [2] RAJABALINEJAD M., FRUNT L., KLINKERS J., VAN DONGEN L. A., (2019), "Systems integration for railways advancement" in *Transportation Systems*. Springer, pp. 27-40.
- [3] CARAMIA P., LAURO G., PAGANO M., NATALE P. (2017), "Automatic train operation systems: A survey on algorithm and performance index" in 2017 AEIT International Annual Conference. IEEE, pp. 1-6.
- [4] DOPPELBAUER J., DEFOSSEZ A., MARTOS O., FERNANDEZ J. H. (2023), "TSI Revision Package 2023 - Key Changes (Part I - Rolling stock and CCS)".
- [5] MASCHIETTI F., BARBARESI A., RAGO S., MAMMUCARI S., CLEMENZA G. (2024), "Reti mobili di nuova generazione per le linee ferroviarie del futuro", *Ingegneria Ferroviaria*, ottobre.
- [6] ERA, UNISIG, ERTMS/ATO System Requirements Specification SUBSET 125.
- [7] GoA3/4 Specification – Progetto X2Rail4, "Advanced signaling and automation system – Completion of activities for enhanced automation systems, train integrity, traffic management evolution and smart object controllers".
- [8] Europe's Rail Joint Undertaking - Master Plan, 10/2021.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] BARRUFFO L., CAIAZZO B., PETRILLO A., SANTINI S. (2024), "A GoA4 Control Architecture for the Autonomous Driving of High-Speed Trains over ETCS: Design and Experimental Validation" *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, June.
- [12] ERA, UNISIG, SUBSET-026-2. 3.6.0 Cap 3-4.
- [13] MANGASARIAN O. L. (1994), "Nonlinear programming". SIAM.
- [14] 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.
- [15] HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2018-2020 General Annexes, G. Technology readiness levels (TRL).
- [16] SENESI F., AMENDOLA A., BARRUFFO L., DE SIMONE S., D'AVINO D., DE VITA G., GARRUBBA D. E., MUNGIELLO I., REPETTO S., SERRA D. (2024), "Sviluppo e sperimentazione di URV: prototipo di veicolo ferroviario a guida autonoma per il monitoraggio dell'infrastruttura", *Ingegneria Ferroviaria*, dicembre.