



Prima esperienza tram-treno sulle linee ferroviarie spagnole convenzionali: il tram-treno della Baia di Cadice

First tram-train experience on Spanish conventional railway lines: Cádiz Bay tram-train

Dott. Ing. Margarita NOVALES(*)
Dott. Ing. Emilio CONLES(**)

1. Introduzione

Come noto i sistemi tram-treno sono un'evoluzione dei sistemi "ferroviari leggeri" in cui il veicolo può circolare su binari tramviari appositamente realizzati per il sistema, ma può anche immettersi, in un dato punto, sulle linee ferroviarie convenzionali pre-esistenti, che sono state costruite per (e sono utilizzate da) i treni convenzionali.

In questo modo i servizi "ferroviari leggeri" possono essere estesi ancora più lontano dal centro urbano, offrendo una connessione senza soluzione di continuità tra il centro città e le aree metropolitane e suburbane, risparmiando al contempo una parte significativa dei costi d'investimento necessari per la realizzazione di nuove infrastrutture.

Il primo sistema tram-treno realizzato al mondo è quello di Karlsruhe (Germania), che è entrato in servizio il 27 settembre 1992. Da allora diverse città e paesi hanno implementato, o stanno pianificando, l'utilizzo di questa soluzione di trasporto, come è ad esempio il caso, tra gli altri, di Saarbrücken, Nordhausen, Kassel e Heilbronn (Germania), Mulhouse, Bordeaux, Nantes e Strasbourg (Francia), Sheffield-Rotherham (Regno Unito) e Aarhus (Danimarca).

I vantaggi, le sfide tecniche e tecnologiche, gli aspetti negativi o la complessità dell'implementazione dei sistemi tram-treno sono stati approfonditamente studiati negli ultimi due decenni e su questo argomento sono stati pubblicati diversi articoli e documenti [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Per quanto attiene ai principali vantaggi del sistema, si possono menzionare i seguenti [4]:

1. Introduction

As known, tram-train systems are an evolution of light rail transit in which the vehicle can run on the tramway tracks implemented specifically for the system, but it can enter, at a given point, into pre-existing conventional railway tracks that were constructed for (and are employed by) conventional trains. In this way, light rail services can be extended further away from the urban centre, offering a seamless link between the central city and the metropolitan or suburban areas while saving a significant part of the investment cost required by new infrastructures.

The first tram-train system developed in the world was the one of Karlsruhe (Germany), which entered service on September 27th, 1992. Since then, several cities and countries have implemented or are planning the use of this transit solution, as is the case, among others, of Saarbrücken, Nordhausen, Kassel and Heilbronn (Germany), Mulhouse, Bordeaux, Nantes and Strasbourg (France), Sheffield-Rotherham (United Kingdom) and Aarhus (Denmark).

The advantages, technical and technological challenges, drawbacks or complexities of implementing tram-train systems have been deeply studied during the last two decades, and several papers and documents have been published in relation to this subject [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

As the main advantages of the system, the following can be cited [4]:

□ Financial advantages:

- Existing conventional railway infrastructure can be used, thereby reducing the amount of investment required by new infrastructure. In this way, the need

(*) Professore Associato presso l'Università de La Coruña, Spagna.

(**) Ricercatore presso l'Università de La Coruña, Spagna.

(*) Associate Professor, University of A Coruña, Spain.

(**) Researcher, University of A Coruña, Spain.

□ Vantaggi finanziari:

- Possono essere utilizzate le infrastrutture ferroviarie convenzionali, riducendo quindi l'entità degli investimenti richiesti per nuove infrastrutture. In tal modo si evita parzialmente la necessità di costruire lunghi tratti di nuovi binari per le nuove linee, consentendo quindi una considerevole riduzione dei costi, se confrontati con quelli dei sistemi ferroviari leggeri completamente nuovi.
- L'incremento del numero di passeggeri garantisce un extra reddito, riducendo quindi i sussidi per i costi operativi annui. L'incremento del numero di passeggeri è il risultato, da un lato, di stazioni aggiuntive, di migliori connessioni con il sistema urbano e di relazioni più dirette da/per le aree residenziali e finanziarie, che evitano spesso la necessità di trasferimenti tra differenti modi di trasporto (come invece avveniva nella situazione precedente all'implementazione del sistema tram-treno). D'altro canto, l'incremento del numero di passeggeri è dovuto anche alle migliorate qualità e immagine del sistema tram-treno, che incoraggiano gli utenti delle quattro ruote a passare a questo nuovo modo di trasporto senza alcuna sensazione di "perdita".
- La composizione dei convogli può essere modificata durante i periodi di bassa intensità di traffico (a sera, di sabato e di domenica), riducendo quindi i costi totali di circolazione.
- I costi di esercizio del veicolo tram-treno sono più bassi se confrontati con quelli del materiale rotabile convenzionale. Nel caso specifico dell'Italia, tale aspetto è corroborato dalle norme ferroviarie che stabiliscono che il macchinista non può operare da solo su treni convenzionali. Si suppone che questa situazione possa cambiare per il sistema tram-treno, che sarebbe quindi ammesso all'esercizio con un singolo macchinista, determinando ulteriori risparmi operativi.

□ Vantaggi per i passeggeri:

- Gli utenti del trasporto pubblico risparmiano tempo dato che il tram-treno può raggiungere velocità doppie di quelle degli autobus. Il tempo di viaggio "porta a porta" è comparabile con quello di una macchina privata in quanto i tempi di percorrenza tra stazioni si riducono grazie a migliori valori di frenatura e accelerazione dei veicoli tram-treno in rapporto a quelli dei treni convenzionali. I tempi di sosta nelle stazioni sono inferiori grazie ad un miglior accesso dei passeggeri legato al numero di porte laterali. Infine i tempi di attesa tra differenti modi di trasporto sono eliminati se comparati con un viaggio integrato basato su diverse modalità di trasporto ed un trasferimento.

to build long sections of new track necessary for new lines is partially avoided, thereby offering considerable cost savings compared with completely new light rail systems.

- *Increases in passenger numbers provide extra income, thereby reducing subsidies on annual operational costs. The increase in passenger numbers is the result, on the one hand, of additional stations, improved links with the urban system and more direct journeys from/to residential and business areas, often avoiding the need for a transfer among different transport modes (in relation to the situation previous to the implementation of the tram-train system). On the other hand, this increase is also due to the improved quality and image of the tram-train system, encouraging private car users to change to this mode without any sensation of "loss".*
- *Vehicle composition may be adjusted during periods of low traffic density (evenings, Saturdays and Sundays), thereby reducing total running costs.*
- *Operational costs for tram-train vehicles are lower in comparison with traditional rolling stock. In the case of Italy this fact is reinforced due to the railway regulations, which state that the driver cannot operate alone in conventional trains. It is supposed that this situation would change for a tram-train system, which would be allowed to run with a unique driver, in such a way that additional savings will be derived from the operational point of view.*

□ Advantages for passengers:

- *Public transport users save time, as the tram-train can reach speeds double those of buses. Door to door travelling time is comparable with that of the private car, as running times between stations are reduced thanks to the braking and acceleration values of tram-train vehicles in comparison with conventional trains. Stopping times at stations are also shorter, thanks to improved passenger access due to the number of side access doors. Finally, waiting times between different modes of transport are eliminated if compared with an integrated journey in several modes with a transfer.*
- *Direct access from the region to the main business and shopping centres, without the need to change to another mode of transport, as occurred before the introduction of these services.*
- *Punctuality rates are extremely high, as this means of transport is not affected by road traffic incidents.*
- *Greater comfort, due to an increased number of larger seats in each car and the improved dynamic performance, which lead to a smoother journey.*
- *The system is easy to use, as its introduction is usually accompanied by improved passenger information systems with dynamic information at stops.*

- Accesso diretto dalla regione ai principali centri commerciali e finanziari senza la necessità di cambiare modo di trasporto come accadeva prima dell'introduzione di questi servizi.
 - I tassi di puntualità sono estremamente elevati in quanto questo mezzo di trasporto non risente delle situazioni di traffico stradale.
 - Maggior comfort dovuto ad un maggior numero di sedili più ampi in ogni carrozza e ad accresciute prestazioni dinamiche che producono un viaggio più confortevole.
 - Il sistema è facile da utilizzare poichè la sua introduzione è solitamente accompagnata da migliori sistemi d'informazione ai passeggeri a diffusione dinamica alle fermate.
 - Un sistema di tariffazione integrato, in quanto un singolo gestore è solitamente incaricato della pianificazione e del coordinamento degli orari e delle tariffe di entrambi i sistemi di trasporto pubblico, urbano e regionale, al fine di renderlo *user-friendly*.
 - Nella maggior parte dei casi, incrementare il numero delle fermate sui percorsi precedentemente coperti esclusivamente dai treni convenzionali significa stazioni più vicine ai potenziali utenti, il che rende il sistema più accessibile.
 - Nella maggior parte dei casi si hanno frequenze superiori dei servizi tram-treno se comparate con le frequenze dei servizi ferroviari tradizionali, e quindi minori tempi d'attesa alle fermate.
- *Vantaggi per i non-utenti (derivanti da un maggior utilizzo atteso del mezzo di trasporto pubblico, da parte degli utenti delle quattro ruote, quando la qualità del trasporto pubblico migliora):*
- ridotta congestione delle autostrade e delle strade locali;
 - riduzione della necessità d'investimenti nella costruzione e manutenzione di strade;
 - minore impatto ambientale;
 - risparmi sui costi di parcheggio;
 - risparmi sui costi derivanti dagli incidenti.
- D'altro canto, le principali sfide tecnologiche che devono essere affrontate quando si pianifica un nuovo sistema tram-treno sono le seguenti [4]: alimentazione della trazione, scartamento, sagoma limite, interfaccia ruota-rottaia, resistenza strutturale, sistemi di sicurezza e comunicazione, accesso dei passeggeri e compatibilità funzionale del veicolo (pantografo, accoppiamento e segnalamento).
- In aggiunta a queste sfide tecniche vi sono altri problemi che devono essere risolti quando ci si accinge ad implementare un sistema tram-treno. Questi problemi
- *Integrated pricing, due to the fact that an operating company is normally set up to take charge of planning and co-ordinating the timetables and prices of both urban and regional public transport in order to make it user-friendly.*
 - *In most cases, an increase in the number of stops on the routes previously covered exclusively by conventional trains means that stations are now closer to potential users, which makes the system more accessible.*
 - *In most cases, greater frequency of tram-train services compared with conventional rail services, thereby reducing waiting times at stops.*
- *Advantages for non-users (derived from an expected higher use of public transport, due to the change of mode made by former car-users when the public transport quality is improved):*
- *reduced congestion on motorways and local roads;*
 - *Reduction in the need for investment in road building and maintenance;*
 - *lower environmental impact;*
 - *savings on parking costs;*
 - *savings on costs arising from accidents.*
- On the other hand, the main technological challenges that need to be faced when a new tram-train system is planned are the following [4]: traction power supply, track gauge, structure gauge, wheel-rail interface, structural strength, safety and communication systems, passenger access, and vehicle functional compatibility (pantograph, coupling and signalling).*
- In addition to these technical challenges, there are other problems that need to be solved when a tram-train system is going to be implemented. These additional problems are, on the one hand, related to the need of getting an agreement with the railway infrastructure management agency to run on its lines. On the other hand, an agreement has to be got among the local governments of the different city councils through which the tram-train runs, the national and the regional governments, in order to establish the administrative mechanism for sharing the responsibilities derived from the tram-train construction and operation.*
- The aim of this paper is to describe how the main technical and technological challenges has been overcome by the Cádiz Bay tram-train (which is planned to be partially put in operation by end of 2013). The metropolitan area of Cádiz Bay - Jerez (644000 inhabitants in 6 municipalities) is located in the Andalusia autonomous region (South of Spain). The Cádiz Bay tram-train project has been promoted and is managed by Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía (public works agency of the regional government of Andalusia).*
- This is the first tram-train allowed to run on the Spanish conventional railway tracks that are under ownership*

aggiuntivi riguardano, da un lato, la necessità di stipulare accordi con l'ente gestore dell'infrastruttura ferroviaria per poter effettuare l'esercizio sulle sue linee. Dall'altro lato, un accordo deve essere siglato tra i governi locali delle amministrazioni comunali, attraversate dal tram-treno, e i governi nazionali e regionali, al fine di stabilire il meccanismo amministrativo per la ripartizione delle responsabilità legate alla costruzione e all'esercizio del tram-treno.

Lo scopo di questo articolo è descrivere come siano state superate le principali sfide tecniche e tecnologiche dal tram-treno della Baia di Cadice (la cui entrata in servizio parziale è prevista per la fine del 2013). L'area metropolitana della Baia di Cadice - Jerez (644000 abitanti in 6 circoscrizioni) è situata nella regione autonoma dell'Andalusia (Sud della Spagna). Il progetto tram-treno della Baia di Cadice è stato promosso ed è oggi gestito dalla *Agenzia de Obra Pública de la Junta de Andalucía* (Agenzia per i Lavori Pubblici del Governo Regionale dell'Andalusia).

Questo è il primo tram-treno ammesso all'esercizio sulle linee ferroviarie tradizionali Spagnole che sono di proprietà e gestione di Adif (*Administrador de Infraestructuras Ferroviarias*).

Esso rappresenta quindi un riferimento per futuri simili casi in altre aree metropolitane di tutto il paese, dato che Adif è la l'azienda statale incaricata della gestione dell'intera rete ferroviaria Spagnola (costituita cioè dalle linee che non sono state trasferite ai governi regionali). Tale carattere di avanguardia, unito ad altri interessanti aspetti e singole soluzioni adottate, rende quindi questo progetto del tram-treno meritevole di uno studio approfondito.

2. Descrizione generale del sistema tram-treno della Baia di Cadice

2.1. Infrastruttura

Il diagramma generale della rete tram-treno della Baia di Cadice è mostrato in fig. 1. Esso comprende due tipologie di tratte:

- *Le nuove tratte urbane-extraurbane dal centro della città di Chiclana fino al bivio con la linea ferroviaria convenzionale presso La Ardila.*

Questa parte della linea è composta da tratte urbane con armamento metropolitano (in Chiclana e San Fernando) e da tratte interurbane in cui si è impiegato armamento ferroviario convenzionale (da Chiclana a San Fernando e da San Fernando al bivio di La Ardila). La lunghezza complessiva di queste tratte è di 13.5 km, con un costo totale previsionale [10] di circa 225 milioni di euro che significa un costo medio di 16.67 milioni di €/km.

- *Le tratte ferroviarie convenzionali esistenti, parte della linea ferroviaria Siviglia-Cadice (a doppio binario).*

and management of Adif (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, Administrator of Railway Infrastructures). In this way, it is a reference for future similar cases in other metropolitan areas throughout the country, inasmuch as Adif is the state-owned company in charge of the whole Spanish national railway network (that is, the lines that have not been transferred to regional governments). Therefore, such trailblazing character, along with some other interesting features and singular solutions adopted, makes this tram-train project deserve a detailed study.

2. General description of the Cádiz Bay tram-train system

2.1. Infrastructure

The general scheme of the Cádiz Bay tram-train network is shown in fig. 1. It comprises two kinds of stretches:

- *The new urban-suburban stretches from Chiclana town centre to the junction with the conventional railway line in La Ardila.*

This part of the line is comprised by urban stretches with urban track superstructure (in Chiclana and San Fernando), and by interurban stretches where conventional railway track superstructure has been used (from Chiclana to San Fernando and from San Fernando to the junction located in La Ardila). The overall length of these stretches is 13.5 km, with a forecast total cost [10] around €225 million, which means an average cost of €16.67 million/km.

- *The existing conventional railway tracks, being part of the Seville-Cádiz railway line (with double-track).*

The tram-train accesses this line through the La Ardila junction (shown in fig. 2), by means of a fly-over and new switches (which were not built yet in the figure). The tram-train runs on this conventional railway track to Cádiz for 10.3 km (where the last 3.5 km are underground).

The current frequency of conventional railway services on this stretch is quite low (intervals about 1 hour, from 5 am to 11 pm).

The overall length of the initial network is 23.7 km, and it has a total of 22 stops/stations, including 5 existing stations in the conventional railway stretch. This configuration results in a population covered within a distance of 1000 m from/to the stops/stations quantified at 233483 inhabitants.

As concerns to the new stretches of the network, the main reference parameters for the horizontal and vertical alignment of the line were as follows:

- *limit value for gradients of unlimited length: 4.0%; for sustained gradients with limited length of 750 m: 6.5%; for only exceptional cases: 8.0%;*
- *minimum horizontal curve radius: 50 m (in urban stretches);*



(Fonte: Predisposta dagli autori sulla base dell'immagine di Google Earth)
(Source: Prepared by the authors on the basis of a Google Earth image)

Fig. 1 - Rete tram-treno della Baia di Cadice.
Fig. 1 - Cádiz Bay tram-train network.

Il tram-treno entra in linea dal bivio di La Ardilla (mostrato in fig. 2) per mezzo di un sovrappassaggio e di nuovi scambi (che in figura non sono presenti in quanto al tempo non ancora costruiti). Il tram-treno percorre questo tratto di binario ferroviario convenzionale fino a Cadice per 10.3 km (di cui gli ultimi 3.5 km in galleria).

La frequenza attuale dei servizi ferroviari convenzionali su questa tratta è molto bassa (cadenzamenti di circa 1 ora d alle 5 del mattino alle 11 della sera).

La lunghezza complessiva della rete iniziale è di 23.7 km, con un totale di 22 fermate/stazioni, comprese 5 stazioni esistenti della tratta ferroviaria convenzionale. Questa configurazione produce una popolazione coperta dal servizio, entro una distanza di 1000 m dalle fermate/stazioni, quantificabile in 233.483 abitanti.

Per quanto attiene alle nuove tratte della rete, i principali parametri di riferimento per il tracciato pianoaltimetrico della linea sono di seguito riportati:

- valore limite per pendenze senza limitazioni di lun-

- maximum superelevation: 150 mm (in suburban stretches); recommended superelevation rate of change: 2 mm/m; exceptional superelevation rate of change: 3 mm/m.

2.2. Rolling stock

The vehicles selected for the operation are 7 tram-train vehicles manufactured by the Spanish company CAF (one of them is shown in fig. 3). The total procurement cost for the seven units was €43.3 million. This high cost (€6.19 million/unit) was due to the small order size and because the vehicle design had to be customized in every detail in order to fulfil compatibility conditions to run on conventional railway tracks as well as on the new urban-suburban stretches.

Each vehicle is composed of three cars, with a total length of 37700 mm, a width of 2650 mm and an unladen weight of 67.79 tonnes. The maximum capacity of these tram-trains (considering 6 standees/m²) is 299 passengers (92 seated).

ghezza: 4.0%; per pendenze prolungate con lunghezza limite di 750 m: 6.5%; solo in casi eccezionali: 8.0%;

- raggio di curvatura orizzontale minimo: 50 m (nelle tratte urbane);
- sopraelevazione massima: 150 mm (nelle tratte suburbane); tasso di variazione raccomandato della sopraelevazione: 2 mm/m; tasso di variazione eccezionale della sopraelevazione: 3 mm/m.

2.2. Materiale rotabile

I veicoli scelti per l'esercizio sono 7 veicoli tram-treno costruiti dalla Società Spagnola CAF (uno di questi è illustrato in fig. 3). Il costo totale di fornitura per le sette unità è stato di 43.3 milioni di euro. Tale costo elevato (6.19 milioni di €/unità) si è determinato per effetto delle ridotte dimensioni dell'ordine e per la necessità di personalizzare in ogni dettaglio il progetto del veicolo al fine di soddisfare le condizioni di compatibilità richieste dall'esercizio su binari ferroviari tradizionali come pure su nuove tratte urbane-suburbane.

Ogni veicolo è composto da tre carrozze con una lunghezza totale di 37700 mm, una larghezza di 2650 mm e un peso a vuoto di 67.79 tonnellate. La massima capacità di questi tram-treni (considerando 6 posti in piedi/m²) è di 299 passeggeri (92 posti a sedere).

Le prestazioni di accelerazione e frenatura del veicolo sono simili a quelli dei tram tradizionali e ciò al fine di garantire buone velocità commerciali nonostante le ridotte distanze tra stazioni/fermate come pure una maggiore sicurezza attiva. I valori sono di seguito riportati:

- accelerazione massima con veicolo a pieno carico (considerando il valore limite di 8 posti in piedi/m²): 1.06 m/s² nell'intervallo di velocità 0-40 km/h, 0.78 m/s² nell'intervallo di velocità 40-70 km/h, e 0.50 m/s² nell'intervallo di velocità 70-100 km/h;
- massima decelerazione con freno di servizio e veicolo pieno (8 posti in piedi/m²): 1.10 m/s²;
- massima decelerazione con freno di emergenza e veicolo pieno (8 posti in piedi/m²): 2.50 m/s².



(Fonte: Gentile concessione di Via Libre e dell'Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía appartenente alla Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía).
(Source: Courtesy of Via Libre and Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía belonging to the Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía).

Fig. 2 – Connessione di La Ardila tra linea tram-treno e linea ferroviaria convenzionale esistente.

Fig. 2 - La Ardila link between new tram-train line and existing conventional railway line.

The acceleration and braking performance of the vehicle is similar to the one of conventional trams, in order to guarantee good commercial speeds in spite of the short distance among stations/stops, as well as an improved active safety. The values are as follows:

- maximum acceleration for the vehicle full of passengers



(Fonte: Gentile concessione di CAF (Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles))
(Source: Courtesy of CAF (Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles))

Fig. 3 – Vista esterna del veicolo tram-treno della Baia di Cadice.

Fig. 3 - Exterior view of the Cádiz Bay tram-train vehicle.

2.3. Esercizio

Si prevede che la domanda per il sistema tram-treno della Baia di Cadice raggiunga i 6.14 milioni di passeggeri/anno.

La massima velocità di esercizio è di 100 km/h sui binari ferroviari convenzionali, di 70 km/h sulle tratte suburbane della nuova linea e di 20 km/h nelle zone urbane.

L'intera linea, tra i due terminal (*La Hoya* – stazione di *Cádiz*), è coperta in 28 minuti, il che si traduce in una velocità commerciale molto competitiva (di circa 50 km/h). Per quanto riguarda la frequenza del servizio tram-treno, il cadenzamento pianificato è di 15 minuti.

2.4. Piani di futura estensione

Esiste un piano per la futura estensione del servizio tram-treno fino a *Puerto Real*. Questo progetto si avvantaggerebbe della costruzione di un secondo ponte sopra la baia (denominato *Puente de La Pepa*) con sovrastruttura di tipo tram-treno. Inoltre questa linea potrebbe essere estesa fino a *Jerez de la Frontera*, fornendo così al suo aeroporto un servizio tram-treno. Ciononostante, la realizzazione di questo piano in un prossimo futuro appare piuttosto improbabile a causa della contrazione degli investimenti nell'economia spagnola.

3. Sfide tecniche per il sistema tram-treno della Baia di Cadice

3.1. Scartamento

Esistono diverse soluzioni per consentire ad un tram-treno di circolare su reti urbane e ferroviarie esistenti a diverso scartamento, come riscontrabile in [5]. Tuttavia, quando lo sviluppo del sistema tram-treno richiede la costruzione di una nuova rete urbana (cioè nuovi binari per l'esercizio nell'area urbana), l'approccio raccomandato è quello di progettare il tram-treno con lo stesso scartamento dei binari ferroviari esistenti.

Ciò è naturalmente il modo migliore per garantire un'agevole compatibilità tra il tram-treno e la rete ferroviaria in relazione a questo aspetto.

Poiché gli unici binari esistenti nel sistema tram-treno della Baia di Cadice erano quelli della rete ferroviaria convenzionale di Adif, il loro scartamento (1668 mm, solitamente noto come scartamento Iberico) è stato adottato per la costruzione dei nuovi binari. Tale scelta significa che questo è il primo sistema ferroviario leggero (e tram-treno) in Spagna (ed almeno anche in Europa Occidentale) con uno scartamento così ampio (1668 mm), poiché tutti i sistemi ferroviari leggeri precedenti sono stati costruiti con scartamento metrico (1000 mm) o con scartamento standard (1435 mm).

Comunque quella dello scartamento è una questione complicata nella Spagna di oggi. Mentre la rete ferroviaria

(considering the extreme value of 8 standees/m²): 1.06 m/s² for 0-40 km/h, 0.78 m/s² for 40-70 km/h, and 0.50 m/s² for 70-100 km/h;

- maximum deceleration with service brake and full vehicle (8 standees/m²): 1.10 m/s²;
- maximum deceleration with emergency brake and full vehicle (8 standees/m²): 2.50 m/s².

2.3. Operation

The demand of the Cádiz Bay tram-train system is expected to reach 6.14 million passengers/year.

The maximum speed in operation is 100 km/h on the conventional railway track, 70 km/h on the suburban stretches of the new line, and 20 km/h on the urban zones. The whole line, between both terminuses (La Hoya - Cádiz station), is covered in 28 minutes, resulting in a very competitive commercial speed (around 50 km/h). As regards to the frequency of the tram-train service, its planned headway is 15 minutes.

2.4. Future extension plans

There is a future plan to extend the tram-train service to Puerto Real. This project would take advantage from the construction of a second bridge (named Puente de La Pepa) over the bay with tram-train superstructure. Furthermore this line could be extended to Jerez de la Frontera, thus providing its airport with a tram-train service. Nevertheless, the realization of this plan in the near future seems rather unlikely because of the investment constraints suffered by the Spanish economy.

3. Technical challenges for the Cádiz Bay tram-train

3.1. Track gauge

There are several solutions for the case that a tram-train has to run on existing urban and railway networks with different track gauge, as can be seen in [5]. However, when the tram-train system development requires the construction of a new urban network (that is, new tracks for operating in the urban zone), the recommended approach is to design the tram-train with the same track gauge as the existing railway tracks. This is of course the best way to ensure an easy compatibility between the tram-train and the railway network in regard to this subject.

As the only existing tracks in the Cádiz Bay tram-train system were the ones of the Adif's conventional railway network, their gauge (1668 mm, usually known as Iberian gauge) has been adopted for the construction of the new tracks. This choice means that this is the first light rail (and tram-train) system in Spain (and at least in Western Europe too) with a track gauge so broad (1668

convenzionale è in generale costituita da linee a scartamento Iberico, tutte le nuove linee ad Alta Velocità sono costruite con scartamento standard. Tale disparità ha introdotto diversi “confini di scartamento” (discontinuità di scartamento) in alcuni siti della rete ferroviaria Spagnola.

Poichè queste discontinuità di scartamento stanno diventando un inconveniente sempre più importante per l'esercizio ferroviario, la vecchia idea di modificare lo scartamento di tutta la rete nazionale è tornata ad essere attuale negli ultimi anni. Conseguentemente, al fine di rendere più agevole, più veloce e meno costosa un'eventuale futura conversione di scartamento, sono state utilizzate traverse polivalenti negli ammodernamenti delle linee principali eseguiti negli ultimi due decenni. Questo tipo di traversa è specificamente progettato per consentire il cambio di scartamento mediante il semplice riposizionamento delle rotaie e degli attacchi, senza la loro sostituzione.

La linea ferroviaria Siviglia-Cadice (che è parte del percorso tram-treno della Baia di Cadice) non costituisce un'eccezione al problema dello scartamento. Questa è oggi una linea a scartamento Iberico ma la possibilità di una futura conversione di scartamento nel breve o medio termine non può essere esclusa. Questa circostanza ha condotto ad un'unica e articolata soluzione per il sistema tram-treno della Baia di Cadice: sebbene essa sia in costruzione con scartamento Iberico, il suo progetto ha tenuto in considerazione l'opzione della modifica dello scartamento dell'intero sistema per l'adozione dello scartamento standard in una fase successiva, di modo che l'esercizio del tram-treno sia garantito anche nel caso in cui la conversione di scartamento venga effettivamente attuata sulla linea Siviglia-Cadice.

L'opzione per la futura modifica dello scartamento del tram-treno ha implicazioni progettuali che riguardano diversi elementi del sistema:

- il veicolo tram-treno, che doveva essere progettato per consentire tale modifica e per circolare correttamente con entrambe le opzioni di scartamento, in relazione anche a tutte le apparecchiature in prossimità delle sue sale montate;
- le tratte suburbane della nuova linea tram-treno (fig. 4a), la cui sovrastruttura (basata su una sovrastruttura ferroviaria convenzionale per binari a scartamento Iberico) è stata costruita con traverse polivalenti per consentire la futura conversione di scartamento;
- la struttura del binario in queste tratte è composta da rotaie tipo 54 E1, traverse polivalenti (tipo PR-01), uno strato di massiccata di 30 cm di spessore minimo e uno strato sub-ballast (25 cm di spessore);
- le tratte urbane della nuova linea tram-treno, la predisposizione per la conversione di scartamento deve essere effettuata in anticipo.

Questa modifica sarebbe l'operazione più costosa e ciò per effetto del tipo di sovrastruttura di cui sono dotate le tratte urbane tram-treno, come illustrato in fig. 4b. Come mostra la figura, la sovrastruttura ferroviaria è composta

(mm), as all of the earlier Spanish light rail systems have been built either for metre (1000 mm) or standard (1435 mm) gauge.

However, track gauge is a complicated issue nowadays in Spain. While the conventional railway network is in general composed of lines with Iberian track gauge, all the new high-speed lines are constructed for standard gauge. This disparity has led to several track gauge borders (breaks of gauge) in some locations of the Spanish railway network. As these breaks of gauge are becoming an increasingly important inconvenience for railway operations, the old idea of changing the track gauge of the whole national network has come to the fore again in the last years. Consequently, in order to make an eventual future track gauge conversion easier, faster and cheaper, polyvalent sleepers have been used in the renewals of the main lines for about the last two decades. This type of sleepers is specifically designed to allow the track gauge change by only relocating the rails and the fastenings, without replacing the sleepers of the track.

The Seville-Cádiz railway line (which is a part of the Cádiz Bay tram-train route) is not an exception to the track gauge problem. This is an Iberian gauge line now, but the possibility of a future track gauge conversion in the short or mid term cannot be ruled out. This circumstance has led to a unique and complex solution for the Cádiz Bay tram-train: although it is being constructed for Iberian track gauge, its design has taken into consideration the option of changing the track gauge of the whole system to the standard one at a later time, so that the tram-train operation is ensured even if the gauge conversion will actually take place in the Seville-Cádiz railway line.

The option of changing tram-train gauge in the future has design implications concerning several elements of the system:

- the tram-train vehicle, which had to be designed to allow this change and to run properly for both gauge alternatives, including any equipment in the proximity of its wheelsets;
- the suburban stretches of the new tram-train line (see fig. 4a), whose superstructure (based on a conventional railway superstructure for Iberian gauge tracks) has been constructed with polyvalent sleepers to allow the future track gauge conversion;
- the track structure in these stretches is composed of rails type 54 E1, polyvalent sleepers (type PR-01), a ballast layer with minimum thickness of 30 cm, and sub-ballast (25 cm thick);
- the urban stretches of new tram-train line, whose preparation for the track gauge conversion must be carried out beforehand.

This change would be the most expensive operation on account of the kind of superstructure that the tram-train urban stretches have, which is depicted in fig. 4b.

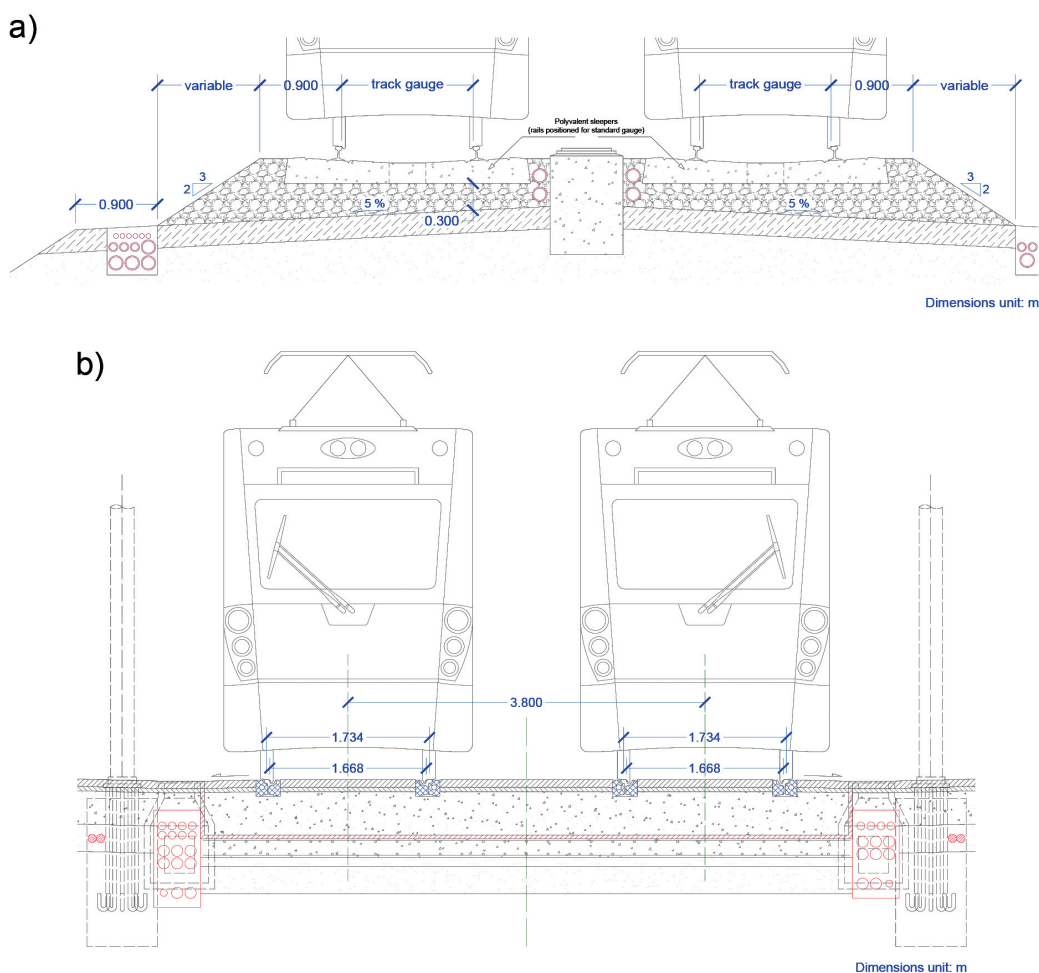


Fig. 4 - Sovrastruttura della linea: a) nuove tratte suburbane; b) nuove tratte urbane.
Fig. 4 - Track superstructure: a) new suburban stretches; b) new urban stretches.

da uno strato di calcestruzzo con le rotaie fissate nel canaletto o "condotto rotaie" mediante un materiale elastomerico. Per la modifica dello scartamento, deve essere rimosso lo strato di ricoprimento stradale (grandi lastre di pietra), quindi deve essere anche eliminato l'elastomero (operazione di difficile realizzazione) ed infine devono essere ri-posate le rotaie con scartamento standard.

Questa sequenza di operazioni comporterebbe costi elevati. Inoltre, le rotaie potrebbero risultare permanentemente deformate come conseguenza di questa rimozione che le potrebbe rendere inutilizzabili (e così si dovrebbero acquistare nuove rotaie).

As the figure shows, the track superstructure is composed of a concrete layer, with the rails fixed in the trough or "rail duct" by an elastomeric material. For changing the track gauge, the covering layer of the street (large stone slabs) must be removed, then the elastomer has to be eliminated as well (which will be a difficult work), and finally the rails can be relocated into the standard gauge position. This sequence of operations would entail high costs. Moreover, the rails may remain permanently deformed as a result of this extraction, which can make them unusable (and so, new rails would have to be purchased).

Another option for solving the question of the possible

Un'altra possibilità per risolvere la questione della possibile futura conversione di scartamento della linea ferroviaria convenzionale poteva essere l'utilizzo di un armamento urbano a scartamento doppio o misto (a tre rotaie). Questa possibilità alternativa fu scartata a causa dell'impatto che la presenza di sei rotaie a gola avrebbe avuto sulle superfici stradali, specialmente in considerazione dell'utilizzo di rotaie a gola profonda (vedi paragrafo 3.4).

3.2. Accesso passeggeri (ingresso/uscita)

Un'importante questione nell'implementazione di un sistema tram-treno (o di un altro servizio di trasporto) è garantire per tutti i tipi di passeggeri un sicuro, veloce e agevole ingresso e uscita dal veicolo indipendentemente dalla stazione o fermata in cui i passeggeri accedono al sistema o abbandonano lo stesso. Ciononostante, per i progetti tram-treno questa non è una questione banale a causa delle differenze di altezza del pianale e di larghezza della carrozza tra i veicoli ferroviari leggeri per il trasporto urbano ed i treni convenzionali.

Queste differenze conducono ad importanti diversità nel progetto delle stazioni ferroviarie e delle fermate urbane o su "ferro leggero", e riguardano in particolare l'altezza della banchina e la sua distanza dall'asse del binario adiacente.

In generale i moderni sistemi ferroviari urbani Europei non ammettono l'utilizzo di fermate a banchina rialzata nelle aree cittadine in quanto ciò implicherebbe rilevanti problemi d'integrazione urbana e maggiore occupazione di spazio. Così la questione della compatibilità fermata/stazione tra sistemi tram-treno e sistemi ferroviari deve essere risolta sia nelle stazioni ferroviarie sia a bordo dei veicoli.

Una possibile soluzione nelle stazioni ferroviarie è l'aggiunta di nuove banchine, in parallelo o in serie a quelle esistenti [7]. Queste nuove banchine devono essere progettate con un'appropriata geometria in modo da adattarsi ai veicoli urbani, garantendo così valori idonei di *gap* orizzontale e verticale tra banchina e pianale del veicolo.

Ciononostante poichè le stazioni della linea ferroviaria utilizzata dal tram-treno della Baia di Cadice sono sotterranee, l'opzione di costruire nuove banchine sarebbe estremamente onerosa ed è stata pertanto scartata.

Pertanto la sola alternativa rimanente è risolvere il problema dell'accesso a bordo veicolo e così questa è stata l'opzione adottata sul tram-treno della Baia di Cadice. Per ottenere un facile ingresso e uscita in ogni tipologia di fermata/stazione, il veicolo della Baia di Cadice è a pianale parzialmente ribassato, con due doppie porte per ogni lato, situate nell'area rialzata del pianale, e altre due nella sua area ribassata. Così l'altezza di accesso (rispetto al piano del ferro) è di 760 mm per le stazioni nelle tratte ferroviarie e 380 mm per il resto delle fermate. La luce della porta d'ingresso è di 1.300 mm e l'altezza è di 2.010 mm.

In ogni caso il progetto del tram-treno deve consentire

future track gauge conversion of the conventional railway line could have been the use of an urban dual or mixed gauge track (with three rails). This alternative was dismissed because of the impacts that the presence of six grooved rails would have on the streets surfaces, especially considering the use of wide-grooved rails (see Section 3.4).

3.2. Passengers access (boarding/alighting)

One important question in the implementation of a tram-train system (or any other transit service) is to guarantee for all sort of passengers a safe, quick and easy boarding and alighting from the vehicle, regardless the station or stop in which they access or leave the system. Nevertheless, for tram-train projects this is not a trivial issue owing to differences between urban light rail vehicles and conventional trains in floor height and car-body width. These differences lead to important dissimilarities in the design of railway stations and urban or light rail stops, specifically regarding the platform height and its separation from the centre line of the adjacent track.

In general, modern European urban rail systems do not approve the use of high-platform stops in the city environment, as they imply important problems of urban integration and larger space occupation. So, the question of stop/station compatibility between tram-train and railway systems has to be solved either in the railway stations or in the vehicles.

A possible solution in the railway stations is the addition of new platforms, either parallel or in series to the existing ones [7]. These new platforms must be designed with the appropriate geometry for fitting the urban vehicles, thus providing suitable values of horizontal and vertical gaps between platform and vehicle floor. Nevertheless, as the stations of the conventional railway line used by the Cádiz Bay tram-train are located underground, the option of building new platforms would be extremely expensive, so it was rejected.

Therefore the only remaining alternative is to solve the access problem in the vehicle, so this was the option adopted in the Cádiz Bay tram-train. To get an easy boarding and alighting in every kind of stop/station, the Cádiz Bay vehicle is partially low-floor, having two double doors in each side, located in the high-floor area, and another two in its low-floor zone. So, the access height (above top of rail) is 760 mm for stations in the railway stretches and 380 mm for the rest of the stops. The clear doorway width is 1,300 mm and the height is 2,010 mm.

In any case, the tram-train design must enable a passenger with reduced mobility to board the vehicle through the low-floor area (suited to the new urban and suburban stretches) and alight from it through the high-floor zone (suited to the existing conventional railway stretches of the

ai passeggeri con ridotta mobilità di salire a bordo del veicolo attraverso l'area ribassata del pianale (idonea per le nuove tratte urbane e suburbane) e scendere dal veicolo attraverso l'area rialzata del pianale (idonea per le tratte ferroviarie convenzionali esistenti della linea) o viceversa.

Poichè la distanza verticale tra le due quote del pianale è troppo elevata, l'opzione di installare una rampa interna al veicolo avrebbe creato diversi problemi. Così si è dovuto equipaggiare il veicolo tram-treno con un ascensore elettrico interno (mostrato in fig. 5). Ovviamente questa soluzione ha un certo impatto sulla capacità del veicolo tram-treno, in quanto tale area del veicolo (circa 2 m²) non è disponibile per lo stazionamento dei passeggeri quando l'ascensore viene utilizzato da una persona con ridotta mobilità.

Tale circostanza determina una riduzione della capacità minima del veicolo di 12 passeggeri (con 6 posti in piedi/m²) su un totale di 299. Peraltro, l'utilizzo di una rampa interna avrebbe comportato effetti di pari entità o anche peggiori, in quanto la rampa non è una zona confortevole per lo stazionamento dei passeggeri ed occupa un'area anche superiore dell'ambiente interno del veicolo.

D'altro canto il veicolo tram-treno è più stretto dei treni

(line), or vice versa. As the vertical distance between both floor levels is too high, the option of setting an interior ramp in the vehicle would have been a source of trouble, so the tram-train vehicle has had to be equipped with an internal electric elevator (shown in fig. 5). Obviously this solution has a certain impact on the tram-train capacity, as this zone of the vehicle (about 2 m²) is not available for standing passengers whenever the elevator is being used by a person with reduced mobility. This fact leads to a decrease in the maximum vehicle capacity of 12 passengers (with 6 standees/m²) on a total of 299. However, the use of an internal ramp would have entailed a similar or worse effect, as the ramp is not a comfortable zone for standing passengers and occupies an even larger area of the vehicle interior.

On another hand, the tram-train vehicle is narrower than conventional trains (2.65 m wide in contrast to 2.90 m). Thus, in order to cover the excessive horizontal gap between the tram-train floor and the platform in conventional railway stations, the vehicle is provided with a folding ramp which is deployed before the doors open (fig. 6).



(Fonte: Gentile concessione di CAF (Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles)).
(Source: Courtesy of CAF (Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles)).

Fig. 5 – Ascensore interno del tram-treno di Cadice: a) quota superiore del pianale; b) posizione intermedia; c) quota inferiore del pianale; d & e) sistema di comando.

Fig. 5 - Cádiz tram-train interior elevator: a) high-floor level; b) intermediate position; c) low-floor level; d & e) control device.

convenzionali (2,65 m di larghezza contro 2,90 m). Così, al fine di coprire l'eccessivo *gap* orizzontale tra pianale del veicolo tram-treno e banchina nelle stazioni ferroviarie convenzionali, il veicolo è stato dotato di una rampa retrattile che si attiva prima dell'apertura delle porte (fig. 6).

3.3. Carrelli

I veicoli tram-treno della Baia di Cadice hanno quattro carrelli, tre dei quali sono carrelli motori (ognuno dei

3.3. Bogies

The Cádiz Bay tram-train vehicles have four bogies, three of them are powered bogies (each one with a total weight of 6.26 tonnes) and the other one is a carrying bogie (4.97 tonnes), which is located under the central car. There are six engines in the vehicle (two per each powered bogie), with an overall power of 900 kW.

The primary suspension uses rubber-metal springs, whereas the secondary suspension consists of coil



(Fonte: Gentile concessione di CAF (Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles)).
(Source: Courtesy of CAF (Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles)).

Fig. 6 – Rampa retrattile per un agevole accesso al veicolo tram-treno nelle stazioni ferroviarie convenzionali: a) vista generale delle porte; b) apertura della rampa; c) posizione finale della rampa prima dell'apertura delle porte; d) porte aperte con rampa retrattile dischiusa.
Fig. 6 - Retractable ramp for easy access to tram-train in conventional railway stations; a) general view of the doors; b) ramp deployment; c) final position of the ramp before opening doors; d) doors opened with retractable ramp unfolded.

quali di peso totale pari a 6.26 tonnellate) mentre il quarto è un carrello portante (4.97 tonnellate), che è situato sotto la carrozza centrale. Il veicolo è dotato di sei motori (due per ogni carrello motore) con una potenza totale di 900 kW.

La sospensione primaria utilizza molle in gomma-metallo, mentre la sospensione secondaria consiste di molle a spirale. Il primo e l'ultimo carrello del tram-treno sono equipaggiati con lubrificatore del bordino e spargi sabbia.

Tutti i carrelli hanno ruote elastiche. I dischi dei freni sono montati sull'asse e la loro dimensione non può essere molto grande a causa dei vincoli imposti da una possibile futura conversione allo scartamento di 1435 mm.

3.4. Interfaccia ruota-rotaia

Come precedentemente spiegato, i veicoli tram-treno della Baia di Cadice devono percorrere i binari ferroviari convenzionali esistenti come pure i binari "leggeri" urbani e suburbani di nuova costruzione. I nuovi binari tramviari sono stati costruiti con rotaie a gola profonda (tipo Ri Ph 37N) idonee a consentire al veicolo tram-treno di utilizzare lo stesso profilo di ruota dei treni pendolari convenzionali (fig. 7). L'unica differenza risiede nel diametro della ruota, che è di 640/580 mm per le ruote nuove/usurate dei veicoli tram-treno, a fronte degli 890/790 mm per i treni pendolari (o suburbani) convenzionali.

L'Unione Ferroviaria Internazionale (UIC) definisce i valori minimi dell'altezza del bordino delle ruote in relazione al diametro delle stesse nella Fiche UIC 510-2 [11].

Per diametri delle ruote tra 330 mm e 630 mm l'altezza minima del bordino è di 32 mm mentre per diametri tra 630 e 760 mm è raccomandato un valore di altezza del bordino compreso tra 30 e 32 mm (preferibilmente 30 mm). Poiché l'altezza del bordino delle ruote del veicolo tram-treno della Baia di Cadice (29 mm) non soddisfa tale raccomandazione, sono stati effettuati studi approfonditi e prove per la verifica delle prestazioni di marcia sugli scambi dei binari ferroviari tradizionali.

Tali studi sono stati effettuati per verificare la compatibilità geometrica tra sale montate del nuovo veicolo tram-treno e gli scambi esistenti della linea ferroviaria tradizionale Siviglia-Cadice, in modo tale da verificare che la marcia dei carrelli del nuovo materiale rotabile in corrispondenza della punta reale e del cuore avvenga, in ogni sezione trasversale, conformemente alle seguenti condizioni principali:

- a) assenza di sollevamento (con sovrapposizione dei profili) del bordino della ruota - o della faccia interna della ruota, a seconda del tipo di sezione trasversale - rispetto ad un qualsiasi componente dello scambio, sia in corrispondenza della punta sia in particolar modo nella zona del cuore;
- a) in quelle sezioni trasversali dello scambio in cui può o deve verificarsi il contatto tangenziale tra bordino della ruota ed alcune componenti della punta o del cuore,

springs. The first and the last bogies of the tram-train are equipped with flange lubricator and sand-dispensers. All the bogies have elastic wheels, which are rigidly connected by axles. The brake disks are mounted on the axle and their size cannot be very large owing to requirements derived from an eventual future track gauge conversion to 1435 mm.

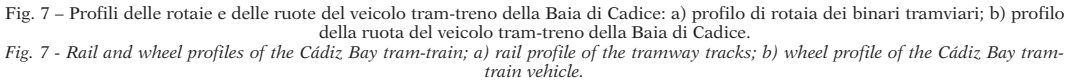
3.4. Wheel-rail interface

As previously explained, the tram-train vehicles of Cádiz Bay have to run on existing conventional railway tracks as well as on newly-built urban and suburban light rail tracks. The new tramway tracks have been constructed with wide-grooved rails (type Ri Ph 37N) in order to enable the tram-train vehicle to use the same wheel profile as the conventional commuter trains (fig. 7). The only difference is the wheel diameter, which is 640/580 mm for new/worn wheels of tram-train vehicles, in contrast to 890/790 mm for conventional commuter (or suburban) trains.

The International Union of Railways (UIC) states the minimum values of wheel flange height according to the wheel diameter in its leaflet 510-2 [11]. For wheel diameters between 330 and 630 mm the minimum flange height is 32 mm, while for diameters from 630 to 760 mm a value between 30 and 32 mm is recommended (being 30 mm preferable). As the wheel flange height of the Cádiz Bay tram-train (29 mm) does not fulfil this recommendation, detailed studies and tests have been carried out about the running performance over the turnouts of conventional railway tracks.

These studies were intended to check the geometric compatibility between the wheelsets of the new tram-train and the existing turnouts of the conventional railway line Sevilla-Cádiz, in such a way that it should be verified that the running of the bogies of the new rolling stock on the switches and crossings takes place, in every relevant cross-section, according to the following main conditions:

- a) absence of hit (with profiles overlapping) of the wheel flange - or the inner face of the wheel, depending on the type of cross-section - against any component of the turnout, both in the switches area and, especially, in the crossing zone;*
- a) in those cross-sections of the turnout where the tangential contact between the wheel flange and some components of the switch or of the crossing may or have to occur, certain restrictions concerning the flange-rail contact angle must be observed. Thus, if the contact point is located between the straight edge of the flange profile and its tip (that is, in the convex curve), it should be guaranteed that the contact angle (measured with respect to the track plane) is not lower than the calculated limit angle. Otherwise, there would be possibilities of flange climbing over some turnout components (such as the point blades or the tip of the frog) and therefore a serious derailment risk.*



devono essere osservate certe restrizioni riguardanti l'angolo di contatto bordino-rotaia. Così se il punto di contatto è localizzato tra lo spigolo retto del profilo del bordino e la punta (cioè nella curva convessa), dovrebbe essere garantito che l'angolo di contatto (misurato rispetto al piano del ferro) non sia inferiore all'angolo limite calcolato. Altrimenti vi sarebbe la possibilità che il bordino sormonti alcuni componenti dello scambio (quali ad esempio gli aghi o la punta del cuore) con un conseguente serio rischio di deragliamento.

Gli studi di compatibilità sono stati eseguiti attraverso quattro principali fasi procedurali.

La prima fase riguarda il calcolo dell'angolo limite che garantisce un sicuro contatto bordino-rotaia e non consente il sormonto del bordino. Questo calcolo è basato sulla teoria di Nadal e dipende dal coefficiente di attrito ruota-rotaia e dal rapporto tra forze laterali e verticali applicate alla ruota. A tal riguardo, le condizioni più sfavorevoli per il rischio di deragliamento nascono dalla combinazione dei possibili limiti superiori di entrambi i fattori. D'altro canto, l'angolo limite risultante, quando applicato alla curva di transizione tra profili del bordino e della superficie di rotolamento, sarà anche utilizzato come fattore principale per lo sviluppo dell'analisi nella fase successiva.

La seconda fase fornisce un'approssimazione dello spostamento laterale massimo della sala montata che può verificarsi rispetto all'asse del binario (sia verso sinistra sia verso destra) in ogni sezione trasversale particolare dello scambio. La procedura generale assume l'angolo limite precedentemente calcolato come condizione geometrica che determina i punti omologhi nei profili della ruota e della rotaia il cui angolo di contatto rispetta tale angolo limite. Questi punti definiscono l'effettiva luce laterale della sala montata nei casi più semplici. Ciò nonostante, in molte sezioni trasversali dello scambio lo spostamento laterale massimo è vincolato dall'azione delle controrotaie o dal contatto guidato tra bordino e rotaia dello scambio.

Così si è dovuto analizzare separatamente lo spostamento laterale massimo in tutte queste sezioni trasversali particolari.

La terza fase si prefigge di calcolare il massimo angolo di attacco possibile tra la direzione istantanea di avanzamento della sala montata e l'asse del binario (o la direzione tangente a questo asse nel caso nel caso di binario in curva) per ognuna delle sezioni trasversali particolari. Quattro differenti configurazioni di sezioni trasversali - di crescente complessità - devono essere distinte in questo processo: sezioni di binario in rettilineo (solitamente il binario principale) senza controrotaie, sezioni di binario in rettilineo con controrotaie, sezioni di binario in curva (solitamente binario in deviata) senza controrotaie e sezioni di binario in curva con controrotaie.

Nella configurazione più semplice il massimo angolo di attacco possibile dipende esclusivamente dai possibili spostamenti laterali della sala montata e del carrello. Comunque la risoluzione delle configurazioni più complesse

The compatibility studies were carried out through four major procedural stages.

The first stage concerns the calculation of the limit angle that ensures a safe flange-rail contact and does not allow the flange climbing. This calculation is based on the Nadal's theory, so that it depends on the wheel-rail friction coefficient and on the ratio between the lateral and vertical forces applied on the wheel. In this regard, the most unfavourable conditions for derailment risks arise from the combination of the possible upper bounds of both factors. On another hand, the resulting limit angle, when it is applied to the transition curve between the tread and flange profiles, will be also used as a main factor for the development of the next stage.

The second stage provides an approximation of the maximum lateral displacement of the wheelset that can take place with respect to the track axis (either towards left or towards right) in each relevant cross-section of the turnout. The general procedure takes the limit angle previously calculated as the geometrical condition that determines the homologous points in the wheel and rail profiles whose contact angle matches such limit angle. These points define the effective lateral clearance of the wheelset in the simplest cases. Nevertheless, in many cross-sections of the turnout the maximum lateral displacement is constrained by the action of the check rails or by the guidance contact between the flange and the switch rail. Thus, the maximum lateral displacement in all these particular cross-sections has had to be analyzed separately.

The third stage is aimed to calculate the maximum feasible angle of attack between the instantaneous forward direction of the wheelset and the track axis (or the tangential direction to this axis in case of curved track) for every one of the relevant cross-sections. Four different configurations of cross-sections - with increasing complexity - have to be distinguished in this process: straight track sections (usually the main track) without check rails, straight track sections with check rails, curved track sections (usually the diverging track) without check rails, and curved track sections with check rails. In the simplest configuration the maximum feasible angle of attack depends only on the possible lateral displacements and the bogie wheelbase. However, the resolution of the most complex configurations incorporates factors such as the curve radius, the nominal wheel radius, the radius of the inner face of the wheels, the check rails elevation, etc.

The last of these stages consists in the final repositioning of a three-dimensional model of the wheelset on every analyzed cross-section of the turnout, with the application of the maximum lateral displacements. This step has to be carried out after having rotated the wheelset with the corresponding angle of attack and in accordance with a set of geometrical constraints (tangency of wheel and rail profiles in the contact points, readjustment of the wheelset rotation around the axis perpendicular to the

include fattori come il raggio di curvatura, il raggio nominale delle ruote, il raggio della faccia interna delle ruote, l'elevazione delle controrotaie, ecc.

L'ultima di queste fasi consiste nel riposizionamento finale di un modello tridimensionale di sala montata su ogni sezione trasversale dello scambio analizzata con l'applicazione degli spostamenti laterali massimi. Questo passo deve essere effettuato dopo aver ruotato la sala montata del corrispondente angolo di attacco ed in accordo con un insieme di vincoli geometrici (tangenza dei profili della ruota e della rotaia nei punti di contatto, riaggiustamento della rotazione della sala montata attorno all'asse perpendicolare alla sezione trasversale, possibile esistenza di un contatto ruota-rotaia a due punti in alcune sezioni trasversali, ecc.).

Questa fase consente la definitiva verifica della conformità alle condizioni sopra descritte, considerando le situazioni più sfavorevoli per ogni sezione trasversale.

Gli studi eseguiti sono concentrati sull'analisi delle prestazioni delle sale montate negli scambi di tipo Semplice - 60 - 318 - 1:9 - negli scambi di tipo semplice e ad intersezione semplice in curva - 60 - 1500 - 1:24 - negli scambi ad intersezione semplice in rettilineo, dove il primo numero rappresenta il tipo di rotaia (UIC60), il secondo è il raggio di curvatura del binario in deviata e il terzo numero denota la tangente dell'angolo di deviata (o angolo del cuore). Questi tipi di scambio presentano i valori estremi dei parametri geometrici caratteristici tra tutti gli scambi presenti sulla linea ferroviaria Siviglia-Cadice, così che i rimanenti scambi possono essere considerati come configurazioni intermedie.

Le sezioni trasversali analizzate per ognuno di questi tipi di scambio sono:

- nella zona degli aghi: la punta degli aghi dello scambio, come pure le sezioni trasversali in cui lo spessore delle rotaie dello scambio (misurato alla quota di 14 mm al di sotto del piano di rotolamento del contrago) sono, rispettivamente, 3, 5, 15, 30, 54 e 62 mm;
- nella zona del cuore: l'inizio della controrotaia, l'inizio del gap non guidato, la punta del cuore, la sezione trasversale intermedia dell'intersezione semplice o cuore (scanalature cuore - zampe di lepre e rotaia - controrotaia) e l'estremità della controrotaia.

Per quanto riguarda il rodiggio, sono state considerate ed analizzate due forme di profilo di ruota: il profilo delle ruote nuove (senza usura) ed il profilo corrispondente alle ruote ritornite (dopo aver raggiunto l'usura massima consentita). Nelle sale montate, si sono dovute tenere in considerazione anche le tolleranze dello scartamento delle facce interne dei bordini (+2 / -0 mm) in aggiunta al valore nominale (1594 mm). Queste tolleranze sono state applicate in conformità alla geometria più sfavorevole della sala montata per il tipo di condizione esaminata in ogni sezione trasversale.

I nuovi studi sono giunti alla conclusione che la circolazione dei nuovi carrelli tram-treno sugli scambi esistenti avverrebbe in condizioni di sicurezza (sia nella zona degli aghi sia in quella del cuore) senza particolari caute-

cross-section, possible existence of two-point contact in some cross-sections, etc.). This stage allows the definitive checking of the compliance with the above described conditions, considering the most unfavourable situations for each cross-section.

The developed studies were finally focused on analyzing the performance of the wheelsets in the turnout types Single Switch - 60 - 318 - 1:9 - Curved Common Crossing and Single Switch - 60 - 1500 - 1:24 - Straight Common Crossing, where the first figure stands for the rail type (UIC60), the second one is the radius of the diverging track and the third number denotes the tangent of the crossing angle (or frog angle). These turnout types present the extreme values of the characteristic geometric parameters among all those turnouts included in the Sevilla-Cádiz railway line, so that the rest of them could be treated as intermediate configurations.

The cross-sections analyzed for each of these turnout types were:

- in the switch area: tip of the point blades, as well as cross-sections where the thickness of the switch rails (measured at a level located 14 mm below the rolling surface of the stock rail) are, respectively, 3, 5, 15, 30, 54 and 62 mm;
- in the crossing zone: beginning of the check rail, beginning of the unguided gap, point of crossing, intermediate cross-section of the common crossing or frog (flangeways between frog - wing rails and between rail - check rail), and end of the check rail.

As regards to the running gears, two shapes of wheel profile were considered and analyzed: the profile of new wheels (without wear), and that contour corresponding to re-profiled wheels (after maximum allowed wear). In the wheelsets, the tolerances in the wheels inside gauge (+2 / -0 mm) also had to be taken into account in addition to the nominal value (1594 mm). These tolerances were applied according to the most unfavourable wheelset geometry for the kind of condition examined in each cross-section.

The performed studies concluded that the running of the new tram-train's bogies on the existing turnouts would take place in safe conditions (both in the switch and in the crossing areas), without significant additional cautions with respect to some other trains that currently use the line (for example, the CIVIA suburban trains). Furthermore, it is expected that the running of the tram-train does not entail for the turnouts higher maintenance requirements than the conventional vehicles currently in use.

3.5. Structural strength

The Cádiz Bay tram-train vehicle has been designed to withstand a compressive force of 600 kN in buffers, which is the usual strength for tram-train systems. This value is

le aggiuntive rispetto agli altri treni che attualmente utilizzano la linea (ad esempio i treni suburbani CIVIA).

Inoltre ci si attende che la circolazione del tram-treno non comporti per gli scambi maggiori prescrizioni manutentive rispetto a quanto previsto per la circolazione dei veicoli convenzionali ad oggi utilizzati.

3.5. Resistenza strutturale

Il veicolo tram-treno della Baia di Cadice è stato progettato per resistere ad una forza di compressione di 600 kN sui respingenti, che è la resistenza usuale per i sistemi tram-treno. Questo valore è inferiore al valore richiesto nell'ultima versione della Norma Europea EN 12663-1 [12] per i veicoli ferroviari di tipo convenzionale P-II (carrozze passeggeri e unità fisse). Tuttavia il tipo di veicolo tram-treno non è coperto da questa Norma cosicché il valore di 600 kN è stato stabilito da un accordo del gruppo di certificazione (vedi la Sezione 4 di questo articolo) tenendo in considerazione l'esperienza di altri veicoli tram-treno Europei come pure i risultati di simulazioni e analisi di rischio.

Comunque quando il veicolo tram-treno percorre le linee ferroviarie convenzionali, condividendo i binari con i treni convenzionali, deve essere garantito lo stesso livello di sicurezza come se lo sforzo respingente fosse di 1500 kN.

Per soddisfare questo requisito sono state effettuate numerose simulazioni con gli scenari d'incidente definiti nella Norma Europea EN 15227 [13], sia per il veicolo tram-treno reale sia per un veicolo ipotetico simile a quello reale ma con uno sforzo respingente di 1500 kN.

I risultati di queste simulazioni hanno evidenziato che la deformazione del veicolo reale sarebbe superiore rispetto a quella del veicolo ipotetico, sebbene le decelerazioni sarebbero inferiori. In ogni caso tutti i valori ottenuti rispettano i limiti definiti nella Norma Europea EN 15227.

3.6. Alimentazione della trazione

Le linee ferroviarie convenzionali Spagnole, quando elettrificate, hanno un sistema di alimentazione della trazione a 3000 V c.c. (come nel caso della linea Siviglia-Cadice) mentre la tipologia usuale di elettrificazione per i sistemi ferroviari leggeri è quella a 750 V c.c. (che è la tipologia scelta per le nuove tratte del tram-treno della Baia di Cadice).

Al fine di consentire al veicolo di percorrere entrambe le tipologie di linea, esso è stato progettato come un veicolo bi-tensione, avendo con ciò la possibilità di circolare con entrambe le tipologie di elettrificazione (750/3000 V c.c.). L'approccio bi-tensione è la soluzione più usuale per i sistemi tram-treno Europei, sebbene diversi tipi di alimentazione della trazione siano presenti nelle linee ferroviarie di ogni singolo paese (1500 V c.c., 3000 V c.c., 15 kV c.a., 25 kV c.a., tra gli altri).

Tra le due tipologie di alimentazione della trazione sono state introdotte opportune zone di transizione, nelle quali il cambio di alimentazione viene eseguito automaticamente

lower than the one required in the last version of the European Standard EN 12663-1 [12] for P-II type conventional railway vehicles (passenger cars and fixed units). But the tram-train type of vehicle is not covered within this standard, so that the 600 kN value had to be established through the agreement of the certification group (see Section 4 of this paper) by considering the experience of other European tram-trains as well as the results of simulations and risk analyses.

Anyway, when the tram-train vehicle runs on conventional railway lines, sharing the tracks with conventional trains, the same level of safety as if it had a buffer strength of 1500 kN must be guaranteed. For meeting this requirement, numerous simulations have been performed with the crash scenarios defined in the European Standard EN 15227 [13], for both the real tram-train vehicle and a hypothetical vehicle similar to the real one but with a buffer strength of 1500 kN. The results of these simulations have shown that the deformation of the real vehicle would be larger than for the hypothetical one, although the decelerations would be lower. In any case, every obtained value complies with the limits stated in the European Standard EN 15227.

3.6. Traction power supply

Spanish conventional railway lines, when electrified, have a traction power supply of 3000 V dc (as is the case of the Seville-Cádiz line), whereas the usual electrification type for light rail systems is 750 V dc (which has been the type selected for the new stretches of the Cádiz Bay tram-train). In order to allow the vehicle to use both kinds of stretches, it has been designed as a dual-voltage one, having the ability to run under both electrification types (750/3000 V dc). The dual-voltage approach is the most usual solution for European tram-train systems, although different types of traction power supply are present in the railway lines of each country (1500 V dc, 3000 V dc, 15 kV ac, 25 kV ac, among other types).

Appropriate transition zones between the two types of traction power supply have to be inserted, in which the change is made automatically by the vehicle while the driver only has to open the circuit-breaker. These transition segments are arranged with a downwards slope in the direction of travel, in such a way that even in the case that the vehicle has to stop in this zone it will keep moving forward once the brake is released.

On another hand, the vertical contact force applied by the pantograph to the catenary is different for conventional trains and for light rail vehicles, being 100 ± 10 N for the former and usually around 80 N for the latter. Anyway, as designing the new urban and suburban stretches of Cádiz Bay for a contact force of 100 N does not entail significant problems, this value has been used as the single one for the tram-train vehicle.

dal veicolo mentre il macchinista deve solo aprire l'interruttore di macchina. Queste zone di transizione sono posizionate lungo tratte in discesa nel senso di marcia, in modo tale che anche nel caso in cui il veicolo si debba fermare in tale zona, esso potrà riprendere, dopo la sfrenatura, il moto.

D'altro canto, la forza verticale di contatto applicata dal pantografo sulla catenaria è differente per i treni convenzionali e per i veicoli ferroviari leggeri, risultando nell'intervallo di 100 ± 10 N per i primi e solitamente di circa 80 N per i secondi. Comunque, poichè progettare le nuove tratte urbane e suburbane della Baia di Cadice per una forza di contatto di 100 N non pone problemi significativi, tale valore è stato utilizzato come singolo valore di riferimento per il veicolo tram-treno.

3.7. Incrocio con treni convenzionali che circolano su binari adiacenti

Un'altra sfida tecnologica per il veicolo tram-treno, che nasce dalla compatibilità di circolazione su entrambe le tipologie di rete, è il requisito della tenuta alla pressione aerodinamica causata dall'incrocio con altri veicoli che possono circolare a velocità fino a 160 km/h sui binari adiacenti.

Sono state eseguite simulazioni per l'analisi dell'incrocio del veicolo tram-treno con le locomotive più sfavorevoli che condividono le linee ferroviarie con i veicoli tram-treno. Queste simulazioni hanno determinato i livelli di pressione sui veicoli e successivamente l'effetto sulle loro risposte dinamiche e strutturali, sul comportamento delle porte e delle finestre, come pure sul comfort dei passeggeri.

Come risultato, si sono dovute introdurre alcune modifiche al progetto iniziale delle porte al fine di evitare problemi nel caso d'incrocio con la locomotiva, condizione più sfavorevole a tali velocità.

3.8. Elementi di accoppiamento aggiuntivi per il soccorso

Gli elementi di accoppiamento del veicolo tram-treno hanno dovuto subire gli adattamenti necessari per garantire il soccorso del veicolo da parte di un qualunque tipo di treno che può circolare sui binari ferroviari (non solo da parte di un altro tram-treno ma anche da parte di una locomotiva o di un altro veicolo passeggeri). Questa capacità è necessaria per evitare gravi ripercussioni sull'esercizio della linea ferroviaria in caso di guasto del tram-treno.

Così l'organo di aggancio è stato sottoposto al processo di approvazione normativo per i sistemi ferroviari ed a quello per i sistemi ferroviari leggeri. Esso è equipaggiato con un dispositivo anti-sollevamento e con un adattatore di altezza per il soccorso da parte dei veicoli ferroviari convenzionali.

3.9. Sistemi di segnalamento, di protezione del tram-treno e di comunicazione

Il veicolo tram-treno deve essere in grado di riconoscere ed attivare il segnalamento di ogni tipo di binario sui cui

3.7. Crossing with conventional trains running on adjacent tracks

Another technological challenge for the tram-train vehicle, arising from the compatibility to run on both kinds of networks, is the requirement of withstanding the aerodynamic efforts caused by the crossing with other vehicles, which may run at speeds up to 160 km/h on adjacent tracks.

Simulations have been done for analysing the crossing of the tram-train vehicle with the most unfavourable locomotive that will share the railway lines with the tram-trains. These simulations have determined the pressure levels on the vehicles and subsequently its influence on their dynamic and structural responses, on doors and windows behaviour, as well as on passengers comfort.

As a result, some modifications had to be introduced into the initial door design in order to avoid problems when crossing with the most unfavourable locomotive at such speeds.

3.8. Additional coupling elements for rescuing

The coupling elements of the tram-train vehicle have had to be adapted in order to guarantee that it can be rescued by any kind of train that may run on the railway tracks (not only by another tram-train, but also by a locomotive or by other passenger vehicle). This capability is necessary to avoid severe interference on the railway line operation in case of any tram-train failure.

Thus the coupler has been subjected to the standard approval process both for railway and light rail systems. It is equipped with anti-climber devices and with a height adapter for rescuing by conventional railway vehicles.

3.9. Signalling, tram-train protection and communication systems

The tram-train vehicle has to be able to recognize and activate the signalling of any type of track on which it runs as well as to respond with the proper action to ensure safe operation. Besides, it is indispensable that the control centre can always contact the vehicle, whatever the point of the network in which it is located.

The Cádiz Bay tram-train is equipped with a train-to-wayside communication system, as well as GSM-R (Global System for Mobile Communications - Railway). GSM-R is the European standard for railway communications, which is implemented into every high-speed line in Spain (furthermore it is being extended to the rest of lines).

As regards to signalling and automatic train protection (ATP), the tram-train vehicles mount digital ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático, i.e. Signal An-

transita come pure di rispondere con un'azione adeguata, per garantire un esercizio sicuro. Inoltre è indispensabile che il centro di controllo possa sempre contattare il veicolo qualunque sia il punto della rete in cui lo stesso si trova.

Il tram-treno della Baia di Cadice è equipaggiato con un sistema di comunicazione terra-treno come pure con un sistema radio GSM-R (Global System for Mobile Communications - Railway). Il sistema GSM-R è lo standard Europeo per le comunicazioni ferroviarie che è implementato su tutte le linee ad alta velocità Spagnole (esso è inoltre in fase di installazione al resto delle linee).

Per quanto attiene al segnalamento ed al sistema di protezione automatica (ATP), i veicoli tram-treno sono equipaggiati con il sistema digitale ASFA (*Anuncio de Señales y Frenado Automático*, cioè sistema di Annuncio Segnali e Frenatura Automatica), che è il sistema di ATP attualmente installato sulle linee ferroviarie convenzionali utilizzate dal tram-treno della Baia di Cadice (infatti, quasi tutta la rete gestita da Adif è attrezzata con almeno questo sistema che solitamente si aggiunge ad altri).

D'altro canto la flotta di veicoli tram-treno è equipaggiata con il sistema SAE/AVM (*Sistema de Ayuda a la Explotación*, e cioè il sistema di Monitoraggio Automatico del Veicolo). Questi sistemi rendono possibile conoscere la posizione del veicolo in ogni momento, fornendo informazioni accurate ed in tempo reale all'operatore e agli utenti.

Inoltre questi veicoli sono equipaggiati con registratore di eventi, sistema di rilevamento incendi, dispositivo "conta passeggeri" e sistema TVCC (televisione a circuito chiuso) con due telecamere interne per carrozza, due telecamere a vista posteriore per cabina, due telecamere a vista anteriore per cabina e schermo da 10.4 pollici per ogni postazione del macchinista (la cabina di guida è mostrata in fig. 8).

4. Processo di certificazione

Il fatto che il veicolo tram-treno sia destinato alla circolazione su linee ferroviarie tradizionali ed anche su linee tramviarie, rende inattuabile il rispetto di tutti i requisiti prescritti dalle norme di certificazione [14] che sono obbligatori per l'esercizio sulle linee ferroviarie convenzionali Spagnole. Questa peculiarità ha comportato la necessità di insediare una commissione ed un gruppo di lavoro responsabili dell'analisi di ogni singola violazione delle normative, valutandone le giustificazioni e garantendo che tali non-conformità non si traducano in problemi di esercizio e di sicurezza aggiuntivi per la rete ferroviaria convenzionale.

Questa commissione è costituita dai membri di: Adif, il soggetto incaricato della gestione della rete ferroviaria nazionale in Spagna; Direzione Generale delle Ferrovie, il dipartimento del Ministero dei Lavori Pubblici Spagnolo, dedicato alle questioni ferroviarie; Renfe Operadora, il maggior operatore ferroviario in Spagna; *Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía*, l'Agenzia per i Lavori Pubblici del governo regionale dell'Andalusia; CAF, il costruttore dei veicoli; Cetren, un ente di certificazione accreditato presso lo stato Spa-



(Fonte: Gentile concessione di CAF (*Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles*)).
(Source: Courtesy of CAF (*Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles*)).

Fig. 8 - Cabina di guida del veicolo tram-treno della Baia di Cadice.
Fig. 8 - Driving cabin of the Cádiz Bay tram-train vehicle.

nouncement and Automatic Braking system), which is the ATP system currently installed in the conventional railway line used by the Cádiz Bay tram-train (in fact, almost the whole Adif's network is equipped with at least this system, usually in addition to others).

On another hand, the tram-train fleet is provided with a SAE/AVM system (*Sistema de Ayuda a la Explotación*, that is, Automatic Vehicle Monitoring). These systems make it possible to know the location of the vehicle at any moment, providing accurate and real-time information to the operator and to users.

Moreover, these vehicles are equipped with event register, fire detection system, passenger-counter device, and CCTV (closed circuit television) with two interior cameras per car, two rear-view cameras per cabin, two front-view cameras and a 10.4 inches screen for each driver seat (the driving cabin is shown in fig. 8).

4. Certification process

The fact that the tram-train vehicle is intended for running not only on conventional railway tracks, but also on tramway tracks, makes it unfeasible to fulfil every requirement stated in the certification standards [14] that are mandatory for operation on Spanish conventional railway lines. This peculiarity has entailed the need for establishing a commission and working group responsible for analysing every breach of the standards, evaluating its justification and guaranteeing that such nonconformities do not result in additional operational or safety problems for the conventional railway network. This commission is constituted by members of: Adif, the entity in charge of managing the national railway network in Spain; General Directorate of Railways, the office devoted to railway matters within the Spanish Public Works Ministry; Renfe Operadora, the ma-

gnolo e presso la Comunità Europea; e Ineco-Tifsa, uno dei principali gruppi di consulenza ferroviaria in Spagna.

5. Conclusioni

Le necessità di compatibilità dei sistemi tram-treno per consentire la circolazione sia su linee ferroviarie convenzionali sia su vie urbane e suburbane di trasporto "leggero" comportano inevitabili sfide tecniche e tecnologiche per ogni città e/o paese che intende adottare tali sistemi.

Comunque tali sfide si sono dimostrate risolvibili mediante la combinazione di un'ideale configurazione dei nuovi binari (che naturalmente dovevano tenere in considerazione le caratteristiche delle linee o dei tratti di linea pre-esistenti) e di un esaustivo e accurato progetto del veicolo. Nel caso specifico del sistema tram-treno della Baia di Cadice, i principali requisiti tecnici e tecnologici necessari per soddisfare le prescrizioni di compatibilità sono: uno scartamento di 1668 mm, pur consentendo una possibile futura conversione allo scartamento standard; veicoli a pianale ribassato, al fine di adattarsi alle due tipologie di stazioni/fermate (quelle urbane e quelle ferroviarie); ruote del tram-treno con bordino largo, per adattarsi ai binari ferroviari convenzionali, che comporta l'utilizzo di rotaie a gola profonda nelle nuove tratte urbane della linea; veicoli bi-tensione (750/3000 V c.c.); forza di compressione nei respingenti di 600 kN, che è inferiore al valore obbligatorio per i veicoli ferroviari convenzionali di tipo II ed ha quindi comportato la necessità di dimostrare un appropriato livello di sicurezza mediante simulazioni d'incidente; apparecchiature del veicolo con i sistemi richiesti di segnalamento, protezione del tram-treno e di comunicazione (ASFA, GSM-R, ecc.).

Il rispetto di tutti i requisiti stabiliti nelle normative di certificazione obbligatorie per l'esercizio su linee ferroviarie convenzionali non è conseguibile per i veicoli tram-treno. Pertanto, poichè il tram-treno della Baia di Cadice è il primo veicolo destinato a circolare su tali tipologie di linee, si è dovuta costituire una commissione speciale "ad hoc" avente il compito di esaminare ogni violazione delle normative, valutarne la giustificazione e garantire che le non conformità non determinino problemi di esercizio e di sicurezza per le reti ferroviarie convenzionali.

La necessità di costituire tale commissione evidenzia il carattere innovativo del progetto tram-treno della Baia di Cadice e rivela che lo stesso diverrà probabilmente un riferimento per futuri simili casi in tutta la Spagna.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano per i contributi a questo articolo da parte di:

- Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Gli autori ringraziano in modo specifico Santiago BOBO, responsabile del progetto e della realizzazione dell'infrastruttura di trasporto, per la sua collaborazione nel

for railway operator in Spain; Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía, the public works agency of the regional government of Andalusia; CAF, the manufacturer of the vehicles; Cetren, a certification company accredited by the Spanish state and the European Union; and Ineco-Tifsa, one of the main railway engineering consultancies of Spain.

5. Conclusions

The compatibility necessities of tram-train systems for running on both conventional railway lines and urban or suburban light rail tracks entail certain technical and technological challenges whatever the city and country in which they are implemented. However, such challenges have proven to be solvable by means of the combination of a proper configuration of the new tracks (which of course should take the characteristics of the pre-existing lines or track stretches into consideration) and a comprehensive, accurate design of the vehicle. In the singular case of the Cádiz Bay tram-train, the main technical and technological features necessary for meeting the compatibility requirements have been: 1668 mm track gauge, but allowing for a possible future conversion to standard gauge; partially low-floor vehicle in order to suit the two kinds of stations/stops (urban and railway ones); tram-train wheel with wide flange to fit the conventional railway tracks, which led to employ wide-grooved rails in the new urban stretches of the line; dual-voltage vehicle (750/3000 V dc); compressive strength in buffers of 600 kN, which is lower than the mandatory value for type II conventional railway vehicles and therefore has resulted in the need for proving an appropriate safety level by means of crash simulations; and equipment of the vehicle with the required signalling, tram-train protection and communication systems (ASFA, GSM-R, etc.).

The fulfilment of all the requirements established in the certification standards compulsory for operation on Spanish conventional railway lines is unfeasible for tram-train vehicles. Therefore, as Cádiz Bay tram-train is the first one intended to run over such type of lines, an especially devoted commission had to be constituted in order to examine every breach of the standards, evaluate its justification and ensure that the nonconformities do not lead to operational or safety problems for the conventional railway network. The need for establishing this commission evidences the innovative character of the Cádiz Bay tram-train project and reveals that it will probably become a reference for future similar cases throughout Spain.

Acknowledgements

Authors acknowledge the contributions to this paper from:

- Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Authors specifically thank Santiago BOBO, project and

fornire informazioni concernenti il sistema tram-treno della Baia di Cadice,

- CAF (*Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles*). Gli autori ringraziano in modo particolare Agustín URÍA, Ekaitz BAZA, Ainara GONZÁLEZ e Claudio GARCÍA per la loro collaborazione nel fornire le informazioni e la documentazione concernenti il sistema tram-treno della Baia di Cadice.
- SyV (*Sacyr Vallehermoso*), la società di costruzione scelta per la realizzazione di alcune delle nuove tratte urbane-suburbane del tram-treno della Baia di Cadice. Gli autori ringraziano in modo particolare Ignacio GARGALLO per la sua cooperazione nel fornire le informazioni e la documentazione inerenti alla costruzione dei nuovi binari.
- *Vía Libre*, una rivista spagnola specializzata in ferrovie, per aver consentito agli autori di riportare alcune foto nel presente articolo.

transport infrastructure works manager, for his cooperation in supplying information about the Cádiz Bay tram-train system.

- CAF (*Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles*). *Authors especially thank Agustín URÍA, Ekaitz BAZA, Ainara GONZÁLEZ and Claudio GARCÍA for their collaboration in providing information and documentation about the Cádiz Bay tram-train vehicle.*
- SyV (*Sacyr Vallehermoso*), *the construction company selected for building some of the new urban-suburban stretches of the Cádiz Bay tram-train. Authors particularly thank Ignacio GARGALLO for his cooperation in supplying information and documentation about the new tracks construction.*
- *Vía Libre*, *a Spanish journal specialised in railways, for allowing the authors to use some of its pictures in this paper.*

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] BROWN V., GOODYEAR T., GRIFFIN T., ROBEY C., "Technical Report: Shared track standards. LRT and heavy rail", Regional Railways - Network SouthEast, British Rail Research, UK, 1993.
- [2] GRIFFIN T., "Light rail transit sharing the railtrack system", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport 117(2): 98-103, 1996.
- [3] UITP [International Association of Public Transport] Light Rail Committee, "Track sharing", UITP, Montpellier, France, 2001.
- [4] NOVALES M., BUGARÍN M.R., ORRO A., "Un nuovo concetto nel trasporto urbano: il tram-treno", *Ingegneria Ferroviaria*, 56 (10): 741-751, 2001.
- [5] NOVALES M., ORRO A., BUGARÍN M.R., "Madrid tram-train feasibility study conclusions", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 217 (1): 1-10, 2003.
- [6] NOVALES M., BUGARÍN M.R., "Tranvitrén y tren-tranvía. Hacia una mejora del aprovechamiento de las infraestructuras ferroviarias", Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de España, Madrid, Spain, 2009.
- [7] NOVALES M., BUGARÍN M.R., "Accesso passeggeri ai sistemi tram-treno. Problemi e soluzioni / Passenger access to tram-train systems. Problems and solutions", *Ingegneria Ferroviaria* 66 (2): 101-114, 2011.
- [8] ALESSANDRI A., "Il modello tram-treno: oltre la sperimentazione / Veicoli tram-treno: Past testing", *Ingegneria Ferroviaria* 60 (9): 741-755, 2005.
- [9] RIZZETTO D.I.L., "Sicurezza e compatibilità geometrica della via dei tram-treno in ferrovia / Safety and geometric compatibility of the track of the tram-train in railroads", *Ingegneria Ferroviaria* 64 (5): 457-476, 2009.
- [10] JULIÁN A., RODRÍGUEZ A., "El tren tranvía de la Bahía de Cádiz preparado para el 2013", *Vía Libre* 563: 4-11, 2012.
- [11] UIC [International Union of Railways], "Leaflet 510-2. Trailing stock: wheels and wheelsets. Conditions concerning the use of wheels of various diameters", (4th edition). Editions Techniques Ferroviaires, Paris, France, 2004.
- [12] CEN [European Committee for Standardization], "EN 12663-1:2010. Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies - Part 1: Locomotives and passenger material rotabile (and alternative method for freight wagons)", CEN, Brussels, Belgium, 2010.
- [13] CEN [European Committee for Standardization], "EN 15227:2008. Railway applications - Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies", CEN, Brussels, Belgium, 2008.
- [14] DGIF [Dirección General de Infraestructuras Ferroviarias / Spanish General Directorate of Railway Infrastructures], "Especificación Técnica de Homologación de material rodante ferroviario. Unidades autopropulsadas, locomotoras, coches, vagones y material rodante auxiliar", Centro de Publicaciones (Ministerio de Fomento), Madrid, Spain, 2009.