



Il Digital Automatic Coupling per i treni merci: ruolo, benefici, limiti

Digital Automatic Coupling for freight trains: role, benefits, limitations

Gabriele ORSI^(*)

Germano BONI^(**)

Bruno DALLA CHIARA^(*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.0708.2025.ART.2>)

Sommario – L'obiettivo principale di questo articolo è effettuare un'analisi qualitativa e quantitativa sulla fattibilità tecnica ed economica del *Digital Automatic Coupling* (DAC). Tale analisi viene sviluppata, innanzitutto, attraverso la definizione del contesto normativo europeo ed italiano, che definisce gli obiettivi climatici e di settore da conseguire entro determinate scadenze, e delle caratteristiche relative alla tecnologia DAC, sia in termini meccanici che funzionali; segue una panoramica tecnica e operativa che descrive lo stato attuale dei veicoli merci, in particolare i limiti da superare, nonché gli studi inerenti alla tematica dei treni merci lunghi e pesanti e alla tecnologia DAC medesima. Conseguentemente vengono richiamate le dinamiche formulate dall'*European DAC Delivery Programme* (EDDP) per favorire la migrazione dal gancio tradizionale all'accoppiatore automatico. L'articolo approda agli studi sulla prestazione in linea, inserendo i parametri relativi all'infrastruttura sulla quale il treno circola, e fornisce un quadro relativo ai costi associati al retrofit di tale tecnologia, anche impiegando l'analisi multicriteri in fase finale.

In termini di risultati più generali, si ottiene che il DAC risulta una tecnologia in grado fronteggiare le problematiche che oggi limitano la resa del trasporto merci su rotaia, risolvendone la maggior parte e lasciandone alcune ancora aperte. Inoltre, grazie ai vantaggi forniti dal dispositivo, l'impiego di tale tecnologia appare più consono sulla larga scala, benché la piccola scala, rappresentata dal traffico diffuso che è quello che ha messo in moto la Germania su tale soluzione tecnologica, sia quella che ottenga molti più benefici.

1. Introduzione

Nell'ambito della politica climatica promossa dall'UE con il *Green Deal* [1] con la relativa evoluzione nella *clean*

Summary - The main objective of this paper is to perform a qualitative and quantitative analysis on the technical and economic feasibility of Digital Automatic Coupling (DAC). This analysis is developed, first of all, through the definition of the European and Italian regulatory context, which defines the climatic and sector objectives to be achieved within certain deadlines, and of the characteristics related to DAC technology, both in mechanical and functional terms. This is followed by a technical and operational overview describing the current state of freight vehicles, in particular the limits to be overcome, as well as the studies inherent to the subject of long and heavy freight trains and DAC technology itself. Consequently, the dynamics formulated by the European DAC Delivery Programme (EDDP) to promote the migration from the traditional hook to the automatic coupler are recalled. The paper then moves on to studies on line performance, including parameters relating to the infrastructure on which the train runs, and provides an overview of the costs associated with retrofitting such technology, also using multi-criteria analysis in the final phase.

In terms of more general results, it turns out that DAC is a technology capable of tackling the problems that currently limit the performance of rail freight transport, solving most of them and leaving some still open. In addition, thanks to the advantages provided by the device, the use of this technology appears to be more appropriate on the large scale, although the small scale, represented by the diffused, single-wagon, traffic that is what set Germany in motion on this technological solution, is the one that obtains many more benefits.

1. Introduction

In the context of the climate policy promoted by the EU with the *Green Deal* [1] with related evolution towards

^(*) Politecnico di Torino, Dip. DIATI-Trasporti. Autore di riferimento: bruno.dallachiara@polito.it

^(**) InRail e FuoriMuro.

^(*) Politecnico di Torino, Dept. DIATI-Transport systems. Corresponding author: bruno.dallachiara@polito.it

^(**) InRail and FuoriMuro.

competitiveness, l'obiettivo di aumentare il volume di traffico merci su rotaia, riducendo al contempo quello su strada, si può perseguire con un aumento della massa trasportata e della lunghezza dei convogli, purché naturalmente se ne garantisca il riempimento, auspicabilmente con materiale rotabile più innovativo. Se, da un lato, l'estensione di massa e lunghezza dei convogli implica degli indubbi vantaggi economici, dall'altro porta con sé delle ripercussioni operative, dovute soprattutto allo scarso sviluppo che il materiale rotabile merci ha subito nel corso degli ultimi decenni: di fatto, il treno lungo e pesante è una scelta operativa basata su criteri economici, per competere con la modalità stradale, che oggi deve però fare i conti con la tecnica. Al fine di ovviare a tali problematiche e, contestualmente, di aumentare l'efficienza dei treni merci, tra le varie azioni intraprese negli ultimi anni è stato varato nel 2021 il progetto ERJU-MAWP [2], nel quale si inserisce lo sviluppo del DAC (*Digital Automatic Coupling*). Si tratta di una nuova tipologia di accoppiatore, derivata dalla tecnologia Scharfenberg, il cui scopo generale è quello di automatizzare le operazioni di composizione dei treni merci e favorire la digitalizzazione del sistema treno, essendo questo gravemente carente al merito. In questo modo, si vuole rendere più efficiente non solo la tecnica, per quanto possibile, ma anche l'operatività in linea dei convogli, nell'ottica di incrementare il carico trasportato da un singolo treno fino a ipoteticamente 4000 t, per ridurre ulteriormente i costi unitari per unità trasportata; invero, i treni merci da 2500 t risultano già un ambizioso traguardo cui buona parte delle imprese ferroviarie si sono dedicate negli ultimi 7-8 anni.

Per contro, l'aggiornamento così invasivo – soprattutto in termini quantitativi – del materiale rotabile deve comunque tenere conto di un fattore imprescindibile, rappresentato dai costi associati alla produzione e al processo di migrazione dei veicoli verso questa nuova soluzione tecnologica. Infatti, il basso costo del materiale rotabile è un elemento chiave che permette il contenimento del costo del trasporto su rotaia. Al contempo, indubbiamente, più il materiale rotabile è tecnologicamente evoluto, più potrà attingere ad un maggiore bacino potenziale di domanda oggi non acquisibile, ma al contempo ciò comporterà incremento dei costi, per il suo esercizio.

2. La tecnologia DAC

In linea generale, il DAC è un accoppiatore di nuova generazione il cui compito è quello di sostituire in maniera progressiva tutte le componenti storiche del sistema gancio-respingenti. Infatti, *coupling* designa la prima funzionalità richiesta a questo dispositivo, ovvero il garantire la continuità meccanica per la trasmissione delle forze di trazione dalla locomotiva ai carri, nonché la repulsione, sostituendo di fatto i respingenti.

Tuttavia, alla funzione di accoppiamento se ne affiancano altre due, che non sono disponibili nel sistema gancio-respingenti convenzionale. In primis, l'accoppiamento (e, se possibile, anche il disaccoppiamento) deve effettuarsi

the clean competitiveness, the objective of increasing the volume of rail freight traffic while reducing that on the roads can be pursued: this can take place by increasing the mass transported and the length of trainsets, provided, of course, that they are filled, hopefully with more innovative rolling stock. Though, on one hand, extending the mass and length of trainsets brings undoubted economic advantages, on the other one it also brings operational repercussions, due above all to the poor development of freight rolling stock over the past decades: in fact, the long and heavy train is an operational choice based on economic criteria, to compete with road mode, which today, however, has to come to terms with technology. In order to overcome these problems and, at the same time, to increase the efficiency of freight trains, the ERJU-MAWP project [2], in which the development of DAC (Digital Automatic Coupling) is included, was launched in 2021. This is a new type of coupler, derived from the Scharfenberg technology, whose general purpose is to automate freight train composition operations and promote the digitisation of the train system, which is severely lacking in this respect. In this way, the aim is to make not only the technology more efficient, as far as possible, but also the line operation of trainsets with a view to increasing the load transported by a single train up to a hypothetical 4000 t, to further reduce the unit costs per transported unit; indeed, 2500 t freight trains are already an ambitious goal to which most railway companies have dedicated themselves in the last 7-8 years.

On the other hand, such an invasive upgrade - especially in terms of quantity - of rolling stock must still take into account an unavoidable factor, represented by the costs associated with the production and migration process of vehicles to this new technological solution. Indeed, the low cost of rolling stock is a key element in keeping the cost of rail transport down. At the same time, undoubtedly, the more technologically advanced the rolling stock is, the more it will be able to tap into a greater potential pool of demand that cannot be acquired today, but at the same time this will lead to an increase in the cost of operating it.

2. DAC technology

Generally speaking, the DAC is a new-generation coupler whose task is to progressively replace all the historical components of the hook-buffer system. In fact, coupling designates the first functionality required of this device, namely ensuring mechanical continuity for the transmission of traction forces from the locomotive to the wagons, as well as repulsion, effectively replacing the buffers.

However, the coupling function is complemented by two others, which are not available in the conventional hook-and-pull system. Firstly, coupling (and, if possible, also uncoupling) must be carried out automatically, i.e. without the intervention of an operator on the ground. In addition to eliminating a particularly burdensome and sometimes

in maniera automatica (*automatic*), ovvero senza l'intervento di un operatore a terra: oltre ad eliminare una mansione particolarmente gravosa e talvolta pericolosa, questo garantisce una maggiore versatilità di impiego dei carri, nonché un guadagno di tempo che necessariamente si perde nello svolgere tali compiti, fattore chiave laddove si persevera nella gestione del traffico cosiddetto diffuso, a carro singolo, nella fattispecie in Germania ed Austria.

Ad ogni modo, osservando la Fig. 1, l'accoppiamento automatico non vale solo per la trasmissione meccanica dello sforzo di trazione, ma anche per le condotte pneumatiche del freno, nonché per i collegamenti elettrici per l'alimentazione e la comunicazione dati. Ciò ha dato origine a diversi livelli del DAC, indicati come DAC-numero in base al loro grado di automazione.

In ultimo, come innovazione fondamentale di questo sistema, si può creare un "sistema treno" nel quale tra la locomotiva e i veicoli vi è un continuo scambio di informazioni digitali *digital* relative al monitoraggio di parametri vitali dei veicoli, nonché alla trasmissione di comandi ad opera del macchinista. Grazie alla digitalizzazione, è possibile ottenere dal DAC una serie di funzionalità, descritte in Tab. 1.

Oltre alle funzionalità appena esposte, il DAC è pensato per resistere ad uno sforzo di trazione a snervamento di 1000 kN, ad uno sforzo di trazione a rottura fragile di 1500 kN e ad uno sforzo di compressione pari a 2000 kN. Inoltre, l'accoppiatore è stato delineato secondo due specifiche versioni (Fig. 2), che si differenziano soprattutto per la modalità di impiego sui veicoli:

- DAC convenzionale o classico, predisposto con la sola interfaccia dell'accoppiatore, da impiegare sui carri.
- DAC ibrido, predisposto con una doppia interfaccia (accoppiatore e gancio-tenditore, separati da una maschera), da impiegare sulle locomotive per mantenerne la versatilità di impiego sia su treni passeggeri che merci. Pertanto, tali veicoli manterrebbero i respingenti, da impiegare all'occorrenza.

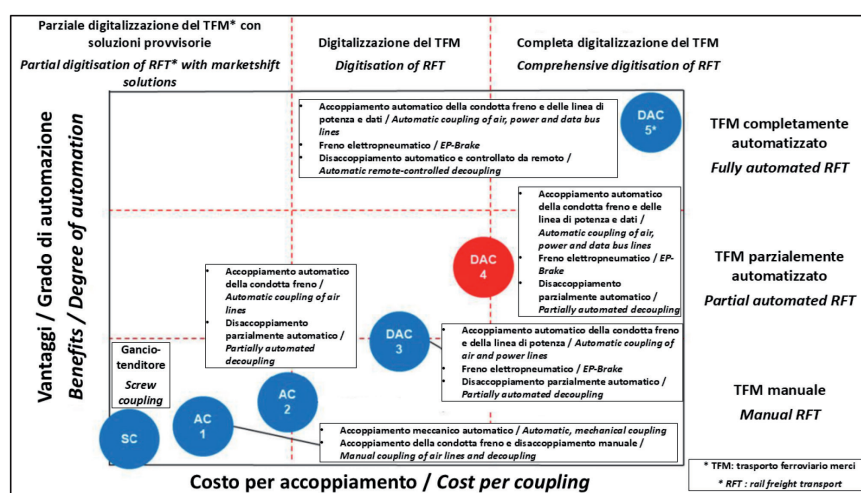
3. Le problematiche tecniche e operative attuali dei treni merci

Dal punto di vista tecnico, si possono considerare tre ambiti di azione

dangerous task, this guarantees greater versatility in the use of wagons, as well as a gain in time that is necessarily lost in carrying out these tasks, a key factor when pursuing the management of so-called diffused, single-wagon traffic, in this case in Germany and Austria.

However, looking at Fig. 1, automatic coupling not only applies to the mechanical transmission of the tractive effort, but also to the pneumatic brake lines, as well as to the electrical connections for power and data communication. This has given rise to different levels of DAC, referred to as DAC-number according to their degree of automation.

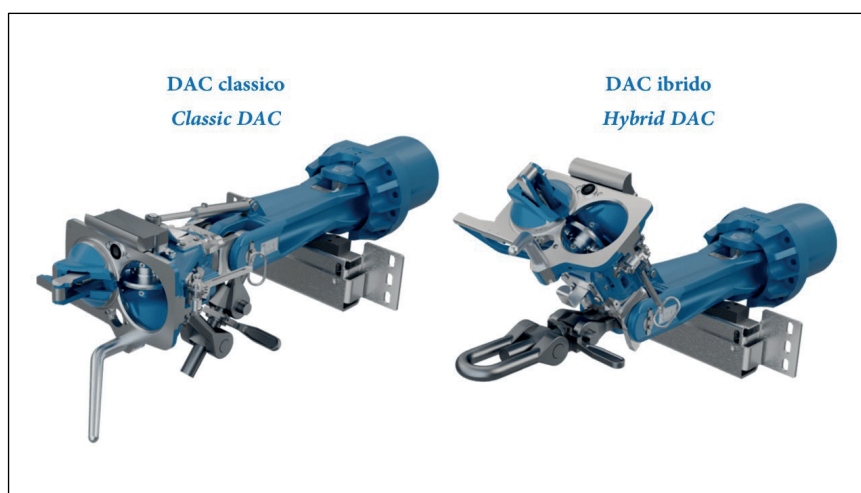
Ultimately, as a fundamental innovation of this system,



(Fonte – Source: [3])

Figura 1 - Livelli di concezione del DAC, con relativo grado di automazione per l'unione dei principali sottosistemi: accoppiamento meccanico, condotte pneumatiche, cavi elettrici e di comunicazione dati.

Figure1 - Levels of DAC design, with relative degree of automation for linking the main subsystems: mechanical coupling, pneumatic pipes, electrical and data communication cables.



(Fonte - Source: [4])

Figura 2 - Versioni disponibili del DAC: classico a sinistra e ibrida a destra.
Figure 2 - Available versions of the DAC: classic on the left and hybrid on the right side.

Tabella 1 – Table 1

Descrizione delle funzionalità garantite dal DAC
Description of functionalities provided by the DAC

Funzionalità Functionality	Caratteristiche Features
Sistema di fornitura di energia ed informatico <i>Energy and data system supply</i>	La fornitura elettrica via cavo consente la trasmissione di energia elettrica, dalla locomotiva ai carri, alla tensione di 400 V c.a., con una potenza massima di 3 kW, in modo da sostenere la centralina di controllo del DAC, nonché la sensoristica installabile a bordo treno. Il collegamento informatico, invece, consente la trasmissione di informazioni tra i veicoli in formato digitale, che possono essere inoltrati ai gestori del traffico. <i>The cable power supply allows the transmission of electrical energy from the locomotive to the wagons at a voltage of 400 V AC, with a maximum power of 3 kW, in order to support the DAC control unit, as well as the sensors that can be installed on board the train.</i> <i>The computer link, on the other hand, enables the transmission of information between vehicles in digital format, which can be forwarded to traffic managers.</i>
Verifica composizione treno e ordine dei carri <i>Train composition and wagon order detection</i>	Oltre a garantire l'accoppiamento automatico tra i veicoli, questa funzionalità consente la verifica sul posizionamento di ciascun veicolo nella colonna di carri, attraverso la marcatura numerica UIC a undici cifre. <i>In addition to ensuring automatic coupling between vehicles, this functionality allows verification of the positioning of each vehicle in the wagon column by means of the eleven-digit UIC numeric marking</i>
Test di frenatura automatica <i>Automatic brake test</i>	Attraverso il comando da un'apposita <i>Human Machine Interface (HMI)</i> , costituita da un tablet), il macchinista comanda l'esecuzione automatica della prova freno. La logica informatica del DAC, oltre ad eseguire le procedure indicate nei manuali di mestiere (come la IEFCA in Italia), verifica che ciascun veicolo soddisfi la prova, inviando un segnale di errore in caso contrario per sollecitare un intervento manuale. <i>Using a Human Machine Interface (HMI, consisting of a tablet), the driver commands the automatic execution of the brake test. The computer logic of the DAC, in addition to executing the procedures indicated in the trade manuals (such as the IEFCA in Italy), verifies that each vehicle meets the test, sending an error signal if it does not, to prompt a manual intervention.</i>
Determinazione della lunghezza e dell'integrità del treno <i>Train length and train integrity determination</i>	La prima funzionalità permette, dalla conoscenza della marcatura UIC, alla quale sono associate determinate specifiche tecniche del veicolo, il calcolo automatico della lunghezza del convoglio. La seconda funzionalità, invece, consente la verifica, durante la marcia, dell'integrità del treno, verificando che nessun veicolo si sia accidentalmente separato dalla colonna. <i>The first functionality allows, from the knowledge of the UIC marking, to which certain technical specifications of the vehicle are associated, the automatic calculation of the length of the convoy. The second feature, on the other hand, allows the integrity of the train to be checked while it is running, verifying that no vehicle has accidentally become separated from the column.</i>
Accoppiamento automatico <i>Automatic uncoupling</i>	Attraverso un comando remoto dalla HMI, il macchinista può comandare la separazione automatica tra due accoppiatori, posti in una specifica posizione del treno, per effettuare il taglio tra due veicoli. Ad ogni modo, l'operazione di disaccoppiamento può essere svolta manualmente attraverso un pulsante o una leva posti sulla fiancata del veicolo nei pressi del DAC. <i>Through a remote control from the HMI, the driver can control the automatic uncoupling between two couplers, located at a specific position in the train, in order to make the cut between two vehicles. However, the decoupling operation can be performed manually through a button or lever located on the side of the vehicle near the DAC.</i>
Inibizione dell'accoppiamento <i>Prevent coupling</i>	Questa funzionalità consente l'inibizione temporanea dell'accoppiamento automatico che si verificherebbe naturalmente non appena due DAC vengono a contatto. Un'applicazione di quanto appena detto la si può trovare nella sella di lancio, quando i veicoli sono spinti lentamente verso la rampa. <i>This feature allows the temporary inhibition of the automatic coupling that would naturally occur as soon as two DACs come into contact. An application of this can be found in the launch saddle, when vehicles are slowly pushed towards the ramp.</i>
Freno Elettro-pneumatico <i>Electro-pneumatic brake</i>	L'Energy and data system supply consentirebbe di provocare la depressione della condotta generale su ogni veicolo del treno, integrando il segnale pneumatico di comando con un omologo elettrico. Quest'ultimo, in particolare, agirebbe su un sistema di elettrovalvole posto sul DAC, realizzando la depressione a livello locale (sul veicolo). Unendo i due aspetti appena descritti, il sistema frenante risulta molto più reattivo. <i>The Energy and data system supply would allow the depression of the general conduit on each vehicle of the train by integrating the pneumatic control signal with an electrical counterpart. The latter, in particular, would act on a solenoid valve system located on the DAC, realising the vacuum locally (on the vehicle). By combining the two aspects just described, the braking system would be much more responsive.</i>
Freno di stazionamento <i>Parking brake</i>	Laddove il veicolo disponga del freno di parcheggio, è possibile inserirlo automaticamente mediante comando remoto dalla HMI. Questa opzione è utile per effettuare il taglio del treno in più colonne di rotabili. <i>If the vehicle has a parking brake, it can be automatically applied by remote control from the HMI. This option is useful for cutting the train in several columns of rolling stock.</i>
Sistema di potenza distribuita <i>Distributed power system</i>	Questa funzionalità consente la trazione multipla di un convoglio con le locomotive in telecomando, realizzato con la logica di comunicazione dati del DAC (questo aspetto non è da confondere con la potenza distribuita per cui la linea elettrica non è invece adeguata). <i>This functionality allows multiple traction of a convoy with the locomotives in remote control, realised with the data communication logic of the DAC (this is not to be confused with distributed power, for which this power line is not adequate).</i>

in cui si possono riscontrare delle problematiche e delle mancanze che limitano le prestazioni di un convoglio merci. Il primo di questi riguarda il sistema di accoppiamento, costituito dall'insieme di gancio-tenditore e respingenti. Qui, il fattore più restrittivo riguarda il massimo sforzo trasmissibile dal castelletto di trazione, il quale trasferisce gli sforzi dal tenditore al telaio del veicolo: la normativa EN 15566 [5] stabilisce che le molle utilizzate nel castelletto di trazione per la trazione discontinua devono esercitare – e dunque sopportare – una forza minima pari 400 kN (consigliata 550 kN) in presenza di una deformazione (intesa come massima) compresa tra 50 e 60 mm. Inoltre, la suddetta normativa stabilisce che la massa del gancio-tenditore non può eccedere i 36 kg, al fine di non rendere troppo gravosa la movimentazione di tale componente da parte dell'operatore di terra nell'unione tra due veicoli. Non potendo impiegare materiali più resistenti – e, dunque, in generale più pesanti – ciò limita di conseguenza lo sforzo massimo trasmissibile dal gancio.

Un secondo ambito di interesse riguarda il sistema frenante dei carri, del tipo pneumatico a una condotta. In questo caso, essendo il segnale di comando di frenatura/sfrenatura puramente pneumatico e inviato dalla locomotiva, i tempi di scarica e di ricarica della condotta sono molto dilatati; dunque, più il treno è lungo, più si creano delle forti disomogeneità sui profili di frenatura e sfrenatura tra la testa e la coda. Di conseguenza, il sistema di accoppiamento può apparire sovrassollecitato: in frenatura, superando la capacità repulsiva dei respingenti, provocando un possibile deragliamento; in sfrenatura, arrivando allo strappo del gancio. Ad oggi, è dimostrato come un treno merci di 500 m (lunghezza media operativa) abbia delle ridotte possibilità di deragliamento, purché si adottino tutte le disposizioni indicate nei manuali di mestiere. Tuttavia, assecondando la volontà di aumentare la lunghezza allo standard europeo di 750 m, per quanto detto in precedenza potrebbe non essere più garantita la sicurezza di marcia, aumentando la possibilità di deragliamento. Nonostante l'esistenza dei regimi di frenatura P e G, eventualmente combinabili nel *Long Locomotive*, nonché la presenza di sistemi vuoto carico, la riduzione significativa delle disomogeneità passa attraverso l'utilizzo di un freno elettropneumatico e di un impianto a doppia condotta (generale e principale), i quali aumenterebbero la reattività del freno in entrambe le fasi. In ultimo, la maggior parte dei carri merci utilizza dei freni a ceppo, che risultano meno efficienti degli omologhi a disco sia per la realizzazione della meccanica di frenatura sia per quanto riguarda lo smaltimento del calore sviluppato durante la frenatura meccanica.

Infine, il parco rotabili merci, allo stato attuale, non dispone né della condotta elettrica Riscaldamento Elettrico Carrozze (REC) né della condotta a poli. Nel primo caso, questo non consente il trasferimento di energia elettrica dalla locomotiva ai carri, che può essere utilizzata per scopi come il trasporto di container refrigerati o anche solo per evitare di oltrepassare temperature, elevate o basse

a 'train system' can be created in which there is a continuous exchange of digital information between the locomotive and the vehicles relating to the monitoring of vital vehicle parameters, as well as the transmission of commands by the driver. Through digitisation, a number of functionalities can be obtained from the DAC, which are described in Tab. 1.

In addition to the functionalities outlined above, the DAC is designed to withstand a yield tensile stress of 1000 kN, a brittle fracture tensile stress of 1500 kN and a compressive stress of 2000 kN. Furthermore, the coupler has been outlined according to two specific versions (Fig. 2), which differ mainly in the way they are used on vehicles:

- a) Conventional or classic DAC, prepared with coupler interface only, for use on wagons.
- b) A hybrid DAC, equipped with a double interface (coupler and coupler-tensioner, separated by a mask), to be used on locomotives to maintain their versatility for use on both passenger and freight trains. Therefore, such vehicles would retain the buffers, to be used as required.

3. The current technical and operational problems of freight trains

From a technical point of view, three areas can be considered in which problems and shortcomings can be found that limit the performance of a freight train. The first of these concerns the coupling system, consisting of the hook-tensioner and buffer assembly. Here, the most restrictive factor relates to the maximum force that can be transmitted by the draw frame, which transfers the forces from the tensioner to the vehicle frame: the standard 15566 [5] states that the springs used in the draw frame for discontinuous traction must exert - and therefore withstand - a minimum force of 400 kN (550 kN recommended) in the presence of a deformation (understood as maximum) of between 50 and 60 mm. In addition, the aforementioned standard stipulates that the mass of the hook-tensioner may not exceed 36 kg, in order not to make the handling of this component by the ground operator too burdensome when joining two vehicles. Since stronger - and therefore generally heavier - materials cannot be used, this limits the maximum effort that can be transmitted by the hook.

A second area of interest concerns the braking system of the wagons, of the pneumatic one-pipe type. In this case, since the braking/release command signal is purely pneumatic and sent from the locomotive, the discharge and recharge times of the pipeline are very dilated; therefore, the longer is the train, the more inhomogeneities are created in the braking and un-braking profiles between the head and the tail. As a result, the coupling system can appear overstressed: in braking, overcoming the repulsive capacity of the buffers, causing a possible derailment; in un-braking, causing the hook to tear. To date, it has been demonstrat-

che siano, che possano compromettere la natura chimico-fisica o la commerciabilità del prodotto trasportato. Nel secondo caso, invece, lo svantaggio principale è quello di non poter realizzare una trazione multipla del treno con una locomotiva in coda telecomandata dall'unità in testa. La mancanza di un impianto frenante a due condotte (generale e principale), inoltre, preclude l'implementazione del freno elettropneumatico, che renderebbe più reattiva la fase di frenatura, comandando la frenata su ogni veicolo, nonché una ricarica più rapida delle capacità del sistema in fase di sfrenatura.

Anche dal punto di vista operativo si possono trovare tre ambiti di azione nei quali sussistono problematiche e mancanze intaccano l'efficienza del sistema merci. Partendo dalle operazioni di messa in servizio (unione/taglio dei veicoli, verifica della marcatura UIC e prova del freno), le procedure prevedono ancora una forte componente manuale, che allunga la tempistica necessaria al loro svolgimento. In particolare la prova freno prevede, per motivazioni differenti, l'ispezione visiva dei veicoli: tali passaggi prevedono la percorrenza a piedi dell'intero treno per ben due volte da parte di un operatore, che non fa altro che aumentare la tempistica.

Dunque, in fase di esercizio sulla linea, la PGOS [6] fissa la massa rimorchiata di un treno a 1600 t – derogabile a 2500 t su specifiche linee impiegate dal traffico merci pesante – nonché la lunghezza massima complessiva del convoglio a 700 m, escludendo le locomotive attive e fatte salve delle restrizioni particolari che richiedono una lunghezza inferiore. In particolare, dal primo parametro succitato scaturisce il regime di frenata da adoperare sui veicoli (P, G o Long Locomotive), mentre dal secondo, la minima percentuale di massa frenata da soddisfare per l'esercizio a determinate velocità (90 e 100 km/h, nel caso della PGOS). Nell'ottica di introdurre treni fino a, teoricamente, 4000 t e 750 m di lunghezza, le prescrizioni riportate - ammesso che si renda fattibile l'esercizio in sicurezza di tali convogli - necessiteranno di una modifica. Inoltre, in ottica di esercizio, i carri sono attualmente assoggettati ai regimi di circolazione previsti dalla UIC (RO, S e SS), i quali prescrivono il massimo carico per asse ammissibile, la velocità massima, la percentuale di massa frenata e i dispositivi di vuoto/carico obbligatori per consentire la circolazione. Un ulteriore aspetto riguarda le sezioni di blocco: queste, infatti, hanno una lunghezza definita che però non è univoca, ma dipende dalle caratteristiche della tratta (curve, pendenza, velocità) e dalle prestazioni del treno. Quest'ultimo, in caso di frenata di emergenza, deve potersi arrestare entro la lunghezza della sezione di blocco.

Infine, per quanto riguarda la manutenzione e la diagnostica, lo studio [7] ha analizzato gli elementi più soggetti a guasti in diversi sottosistemi del rotabile, in modo da favorire lo sviluppo futuro di un sistema capace di assecondare una manutenzione di tipo predittivo e migliorare l'affidabilità del trasporto.

ed that a freight train of 500 m (average operating length) has a low possibility of derailment, provided that all the provisions set out in the manuals are adopted. However, if we go along with the desire to increase the length to the European standard of 750 m, as mentioned above, running safety may no longer be guaranteed, increasing the possibility of derailment. Despite the existence of the P and G braking regimes, which can possibly be combined in the Long Locomotive, as well as the presence of empty-load systems, a significant reduction in unevenness would be achieved through the use of an electropneumatic brake and a dual-conductor system (general and main), which would increase the responsiveness of the brake in both phases. Lastly, most freight wagons use shoe brakes, which are less efficient than their disc counterparts in terms of both the realisation of the braking mechanics and the disposal of the heat developed during mechanical braking.

Finally, the freight wagon fleet, at present, has neither the Electric Car Heating (ECH/REC) nor the pole conduit. In the first case, this does not allow the transfer of electrical energy from the locomotive to the wagons, which can be used for purposes such as transporting refrigerated containers or even just to avoid exceeding temperatures, whether high or low, that could compromise the chemical-physical nature or marketability of the transported product. In the second case, on the other hand, the main disadvantage is that it is not possible to realise a multiple traction of the train with a locomotive at the rear remote-controlled by the head unit. Furthermore, the lack of a two-pipe braking system (general and main) precludes the implementation of the electropneumatic brake, which would make the braking phase more responsive by controlling the braking on each vehicle, as well as a more rapid recharging of the system's capacity during braking.

From an operational point of view, there are also three areas where problems and shortcomings affect the efficiency of the freight system. Starting with the commissioning operations (joining/cutting of vehicles, verification of UIC marking and brake test), the procedures still have a strong manual component, which lengthens the time required to carry them out. In particular, the brake test involves, for different reasons, the visual inspection of the vehicles: these steps require an operator to walk through the entire train twice, which only adds to the time required.

Thus, when operating on the line, PGOS [6] sets the towed mass of a train at 1600 t - which can be derogated to 2500 t on specific lines used by heavy freight traffic - as well as the maximum overall length of the trainset at 700 m, excluding active locomotives and subject to special restrictions requiring a shorter length. In particular, the first parameter mentioned above determines the braking regime to be used on vehicles (P, G or Long Locomotive), while the second determines the minimum braking mass percentage to be met for operation at certain speeds (90 and 100 km/h, in the case of PGOS). With a view to introducing trains up to, theoretically, 4,000 t and 750 m in length, these requirements - assuming safe operation of such trainsets is

4. Gli studi sui treni merci lunghi e pesanti e sul DAC

Nell'ambito dello studio dei treni merci lunghi e pesanti, alcuni risultati interessanti si possono ottenere da [8], i quali verranno poi implementati nel corso delle analisi di questo articolo. In tale studio gli autori hanno mostrato, mediante un'analisi quasi-statica, come la ripartenza da fermo di un treno da 1600 t e da 2500 t – gli attuali limiti imposti dalla PGOS – sia garantita, rispettivamente, fino al grado di prestazione (g.d.p.) 19 e 11. Tale risultato è ottenuto considerando un limite di resistenza a trazione del castelletto pari a 400 kN e un'accelerazione minima prescritta da RFI per la ripartenza da fermo pari a 0.03 m/s^2 [9]. Inoltre, gli autori, mediante un'analisi dinamica a velocità costante – da 80 a 120 km/h, in linea coi limiti massimi di velocità prescritti dai regimi di circolazione UIC – hanno dimostrato che un treno da 2500 t, con un limite di resistenza a trazione pari a 400 kN, può circolare in sicurezza fino al grado di prestazione (g.d.p.) 10 e 11, a seconda della velocità di marcia.

Successivamente, lo studio [10] ha analizzato, mediante il software di calcolo *TrainDy*, la dinamica longitudinale di un treno merci reale su una linea esistente, impiegando un radio-telecomando tra le locomotive di trazione, nell'ottica di favorire il comando multiplo con le macchine aggiuntive impresenziate, bypassando la mancanza della condotta a poli sui carri merci. In particolare, si considera un treno con tre locomotive, di cui una in testa, una al centro e una in coda, lanciato su una linea in pendenza secondo diverse specifiche situazioni di marcia. I risultati evidenziano come il radiocomando migliori le prestazioni, la sicurezza e l'aumento della massa rimorchiata del treno, sia in termini di dinamica longitudinale che in spazi di frenata. La condizione, ovviamente, è una efficace radio-comunicazione tra le locomotive, poiché in caso di guasto alcune situazioni di marcia possono essere più rischiose rispetto al caso attuale con treni senza radiocomando.

Dunque, lo stesso CANTONE *et al.* hanno analizzato in [3] l'implementazione nel software *TrainDy* del freno elettropneumatico, confrontando la dinamica longitudinale e il rischio di deragliamento tra due tipologie di treni: una, con veicoli ancora equipaggiati con il sistema gancio-respingenti; l'altra, con veicoli montanti l'accoppiatore digitale. Inoltre, dal momento che il DAC consente un maggiore sforzo di trazione e di compressione, l'autore studia il comportamento del freno elettropneumatico e del radio-comando su treni più lunghi e pesanti. In definitiva, si dimostra l'applicazione del DAC e dell'EP-brake hanno un forte apporto benefico sulla dinamica longitudinale dei treni, annullando quasi del tutto la probabilità di deragliamento in ogni condizione di massa rimorchiata.

Infine, DJORDJEVIC *et al.* in [11] hanno constatato l'effettivo guadagno di tempo derivante dal DAC durante le operazioni di smistamento in un terminal. Nello specifico, gli autori hanno considerato il caso di un treno da 32 carri in viaggio tra Stoccolma e Göteborg (Svezia), il quale deve ef-

feasible - will need to be modified. In addition, from the point of view of operation, wagons are currently subject to the UIC (RO, S and SS) traffic regimes, which prescribe the maximum permissible axle load, maximum speed, braked mass percentage and mandatory empty/load devices to allow circulation. A further aspect concerns the block sections: these, in fact, have a defined length that is not unambiguous, but depends on the characteristics of the route (curves, gradient, speed) and the performance of the train. The latter, in the event of emergency braking, must be able to stop within the length of the block section.

Finally, as far as maintenance and diagnostics are concerned, the [7] study analysed the most failure-prone elements in different subsystems of the rolling stock, so as to favour the future development of a system capable of supporting predictive maintenance and improving transport reliability.

4. Studies on long and heavy freight trains and DAC

In the context of the study of long and heavy freight trains, some interesting results can be obtained from [8], which will be implemented in the course of the analyses in this paper. In this study, the authors have shown, by means of a quasi-static analysis, that the restart from standstill of a 1600 t and a 2500 t train - the current limits imposed by the PGOS (i.e. Prefazione Generale Orario di Servizio or General Preface to the Service Timetable, by RFI - Rete Ferroviaria Italiana or Italian Railway Network) - is guaranteed up to performance grade (g.d.p., grado di prestazione, identifying the total level of resistance on each stretch of the rail infrastructure on the Italian network) 19 and 11, respectively. This result is obtained by considering a frame tensile strength limit of 400 kN and a minimum acceleration prescribed by RFI for restart from standstill of 0.03 m/s^2 [9]. In addition, the authors, by means of a dynamic analysis at constant speed - from 80 to 120 km/h, in line with the maximum speed limits prescribed by the UIC traffic regimes - have shown that a 2500 t train with a tensile strength limit of 400 kN can safely run up to performance grade (g.d.p.) 10 and 11, depending on the running speed.

Subsequently, the study [10] analysed, using the *TrainDy* simulation software, the longitudinal dynamics of a real freight train on an existing line, using a radio remote control between the traction locomotives, with a view to favouring multiple control with the additional unmanned locomotives, bypassing the lack of pole conductor on the freight wagons. In particular, we consider a train with three locomotives, one at the front, one in the middle and one at the rear, running on a sloping line according to different specific running situations. The results show that radio control improves the performance, safety and increased towed mass of the train, both in terms of longitudinal dynamics and braking distances. The prerequisite, of course, is effective radio communication between the locomotives,

fettuare una fermata intermedia presso l'hub di Hallsberg. Con il sistema gancio-respingenti, il tempo di permanenza nell'hub per le operazioni di arrivo, smistamento e consegna è calcolato in 105 minuti, mentre con il DAC-4 e DAC-5 (cfr. Fig. 1) tale tempistica si riduce, rispettivamente, a 75 e 65 minuti. Di conseguenza, il tempo medio di percorrenza tra Stoccolma e Göteborg si riduce da 5 a 4,5 e a 4 ore, consentendo un maggiore sfruttamento, in termini di capacità, della tratta che unisce le due località.

5. Piano di migrazione per il DAC e problematiche risolubili

Nell'ambito della migrazione dal gancio tradizionale con relativo castelletto di trazione al DAC, lo *European DAC Delivery Programme* distingue tra le locomotive e i carri, poiché le strategie di retrofit si diversificano e non di poco. Nel primo caso, appare chiaro come le unità di trazione siano le prime a ricevere l'accoppiatore digitale – di tipo ibrido – per questioni di versatilità, nonché di favorire la fase di transizione tra veicoli con e senza DAC. Ad ogni modo, gli studi condotti dall'EDDP in [12] evidenziano una forte eterogeneità del parco locomotive, sia in termini di età che di tipologia, fattori che potrebbero rallentare il processo di migrazione e per cui è richiesto un gruppo di lavoro coordinatore dedicato.

Per quanto riguarda i carri, invece, l'EDDP in [13] distingue, innanzitutto, i carri dedicati al traffico diffuso (*Core Wagonload System*, CWS) e quelli che non vi interagiscono (*separable transports*), in quanto le relative strategie di retrofit cambiano connotati (Fig. 3). Infatti, nel primo caso, affinché il traffico diffuso funzioni correttamente, non possono sussistere contemporaneamente carri con il DAC e carri con il sistema di trazione dotato di gancio classico per evidenti questioni di compatibilità; pertanto, il retrofit della flotta CWS deve essere concentrato nell'arco di qualche settimana mediante un processo definito *Big Bang*. Al contrario, nel caso dei trasporti separabili, il retrofit può essere graduale poiché i treni tendono a mantenere la stessa composizione nel tempo; ad ogni modo, preso un convoglio da aggiornare, esso deve ricevere il DAC su tutti i veicoli e nella stessa sessione di intervento.

In ultimo, l'EDDP riporta delle considerazioni importanti sull'ubicazione dei centri mobili di retrofit, da installarsi preferibilmente negli hub presso cui opera una determinata impresa ferroviaria, sui requisiti di montaggio del DAC su alcuni carri speciali (ad esempio, i carri bisarca), la cui struttura del telaio potrebbe creare delle difficoltà in fase di retrofit, nonché sui requisiti di montaggio sulle locomotive. Inoltre, trattando del retrofit sui veicoli, con il DAC gli sforzi si trasmettono solo sulla porzione centrale del telaio: pertanto, questa deve essere verificata sia per trasferire lo sforzo di trazione sia quello di compressione.

Per quanto riguarda le problematiche risolte, il DAC incrementa il limite di resistenza a trazione sia a livello

since in the event of a breakdown some running situations can be more risky than in the current case with trains without radio control.

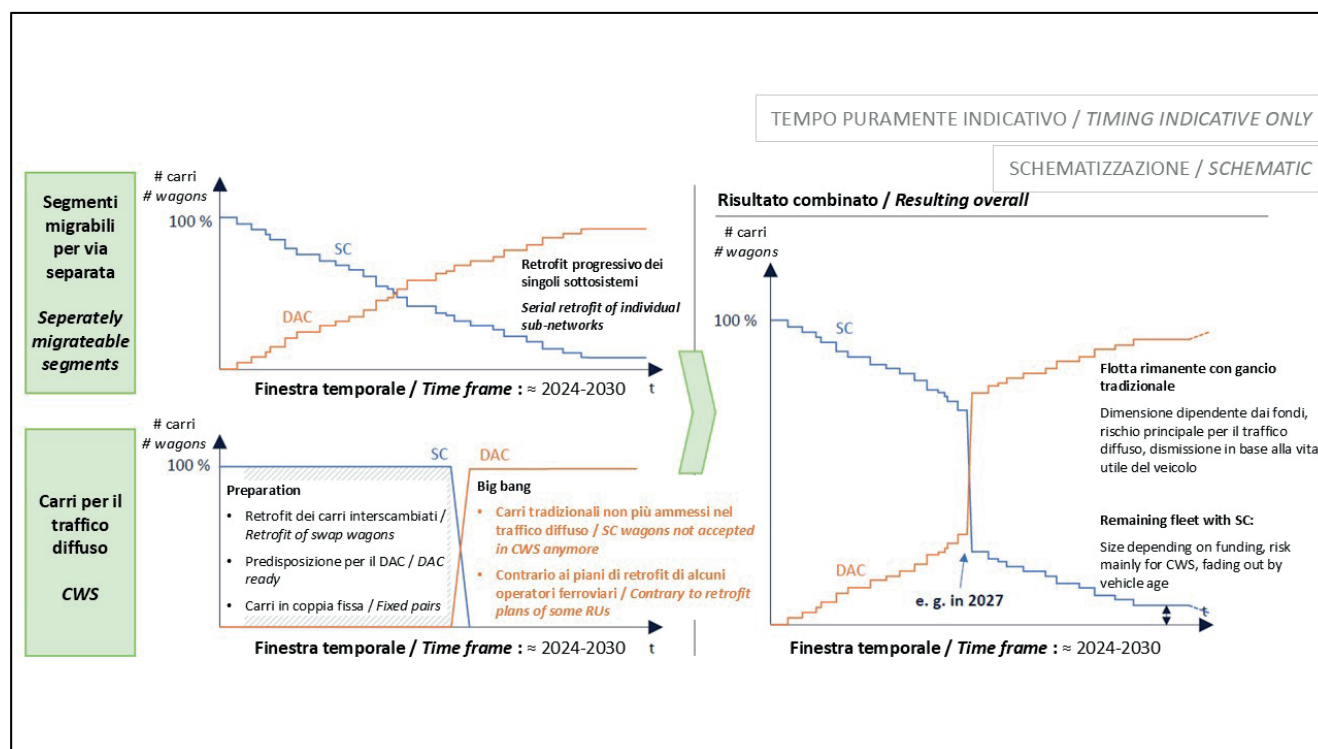
Thus, CANTONE et al. analysed the implementation of the electropneumatic brake in the TrainDy software at [3], comparing the longitudinal dynamics and derailment risk between two types of trains: one, with vehicles still equipped with the hook-restraint system; the other, with vehicles fitted with the digital coupler. Furthermore, since the DAC allows for greater tractive effort and compression, the author studied the behaviour of the electropneumatic brake and radio control on longer and heavier trains. Ultimately, the application of the DAC and EP-brake is shown to have a strong beneficial effect on the longitudinal dynamics of trains, almost eliminating the probability of derailment under all towed mass conditions.

Finally, DJORDJEVIC et al. in [11] observed the actual time gain from DAC during shunting operations at a terminal. Specifically, the authors considered the case of a 32-car train travelling between Stockholm and Gothenburg (Sweden), which has to make an intermediate stop at the Hallsberg hub. With the hook-and-line system, the time spent at the hub for arrival, sorting and delivery operations is calculated to be 105 minutes, whereas with DAC-4 and DAC-5 (see Fig. 1) this time is reduced to 75 and 65 minutes respectively. As a result, the average journey time between Stockholm and Gothenburg is reduced from 5 to 4.5 and 4 hours respectively, allowing greater capacity utilisation of the route between the two locations.

5. Migration plan for DAC and resolvable issues

As part of the migration from the traditional coupler with its traction unit to DAC, the European DAC Delivery Programme (EDDP) distinguishes between locomotives and wagons, as the retrofit strategies differ, and not just a little. In the former case, it is clear that traction units are the first to receive the digital coupler - of the hybrid type - for reasons of versatility, as well as to facilitate the transition phase between vehicles with and without DAC. In any case, studies conducted by EDDP at [12] show a strong heterogeneity of the locomotive fleet, both in terms of age and type, factors that could slow down the migration process and for which a dedicated coordinating team is required.

With regard to wagons, on the other hand, the EDDP in [13] distinguishes, first of all, between wagons dedicated to diffuse traffic (Core Wagonload System, CWS) and those that do not interact with it (separable transports), as the respective retrofit strategies change (Fig. 3). In fact, in the former case, for widespread traffic to function properly, wagons with DAC and wagons with the classic hook traction system cannot exist at the same time due to obvious compatibility issues; therefore, the retrofit of the CWS fleet must be concentrated within a few weeks by means of a process called Big Bang. On the contrary, in the case of separable transports, the retrofit can be gradual since trains



(Fonte - Source: [12])

Figura 3 - Effetto combinato dell'andamento temporale del retrofit per le categorie di carri dedicati e CWS.
Figure 3 - Combined effect of retrofit time trend for dedicated wagon and CWS categories.

di accoppiamento che di castelletto di trazione, grazie ai 1000 kN di sforzo a snervamento. Inoltre, non si pone più il problema del limite di massa pari a 36 kg, in quanto l'automazione dell'accoppiatore esclude l'intervento di un operatore di terra.

Sull'impianto frenante, invece, il DAC può migliorare indubbiamente la fase di frenatura per mezzo dell'*EP-brake*, provocando la depressione della condotta generale su ogni veicolo e riducendo, di conseguenza, la disomogeneità sul profilo di frenata tra testa e coda del treno. Tuttavia, in condizione di marcia, non è possibile avere un miglioramento in fase di sfrenatura, poiché il solo colpo di carica e le eventuali locomotive ausiliarie non sono sufficienti a ridurre efficacemente il tempo di ricarica della condotta generale. Pertanto, le soluzioni potrebbero essere: 1) l'aggiornamento dell'impianto frenante con la condotta principale; 2) l'installazione sui carri di serbatoi d'aria che, per mezzo di una valvola comandata dalla logica *EP-brake*, accelerino la ricarica. In tutti i casi, entrambe le soluzioni comporterebbero degli ulteriori costi da aggiungersi a quelli di installazione del DAC. Infine, per quanto concerne la ridotta percentuale di massa frenata e le prestazioni dei freni a ceppo, l'accoppiatore digitale non è in grado di intervenire in senso stretto, ma sarebbe compito del detentore del carro, come nel caso precedente, aggiornare l'impianto frenante del veicolo.

Successivamente, l'accoppiatore digitale, grazie all'*E-nrgy and data system supply* e, sul DAC5, al *Distributed*

tend to maintain the same composition over time; in any case, if a train to be upgraded is taken, it must receive DAC on all vehicles and in the same session.

Lastly, the EDDP contains important considerations on the location of mobile retrofit centres, which should preferably be installed in the hubs where a particular railway company operates, on the requirements for mounting DAC on certain special wagons (e.g. car transporter wagons), whose chassis structure may create difficulties during retrofitting, and on the requirements for mounting on locomotives. Furthermore, when dealing with retrofitting on vehicles, with the DAC the stresses are transmitted only on the central portion of the chassis: therefore, this must be checked for both tensile and compressive stress transfer.

In terms of the problems solved, the DAC increases the tensile strength limit at both the coupling and the draw frame level, thanks to the 1000 kN yield stress. Furthermore, the problem of the 36 kg mass limit no longer arises, as the automation of the coupler excludes the intervention of a ground operator.

On the braking system, on the other hand, the DAC can undoubtedly improve the braking phase by means of the EP-brake, causing the general conduit to be depressed on each vehicle and consequently reducing the unevenness in the braking profile between the head and tail of the train. However, in running condition, it is not possible to have an improvement in the braking phase, since the charging

Power System, consente lo sviluppo sia di un sistema di sensoristica alimentato continuamente dalla locomotiva, nonché il comando multiplo delle locomotive qualora sia necessario l'utilizzo di una doppia o di una tripla trazione. Dall'altra parte, visti i bassi valori di tensione e potenza garantiti dal collegamento elettrico, non è possibile ottenere un collegamento ad alta tensione da impiegare nell'alimentazione di container refrigerati o per garantire, nel caso, una potenza distribuita, intesa come motori in serie come nel caso degli ETR passeggeri.

Dal punto di vista delle operazioni di messa in servizio, l'adozione del DAC ne favorirebbe l'automazione e, di riflesso, la riduzione dello sforzo fisico richiesto agli operatori di terra. Infatti, la *Train composition and wagon order detection*, oltre ad accoppiare fisicamente i veicoli, verificherebbe in pochi istanti che il treno sia composto con i rotabili giusti e sistemati nella corretta posizione. Pertanto, l'addetto a terra si limiterebbe a controllare il corretto *modus operandi* di tale funzionalità, così come accadrebbe con l'*Automatic brake test*, in cui il serraggio e il rilascio dei freni sarebbe compito della logica DAC, che segnalerebbe eventuali malfunzionamenti.

Dunque, in fase di esercizio, il DAC non favorisce un aumento della velocità di crociera del treno, poiché questo aspetto dipende da altri fattori: stando ai regimi di circolazione UIC, l'esercizio di un rotabile ad una determinata velocità è soggetto alla percentuale di massa frenata, che si può migliorare agendo sui dispositivi di vuoto/carico del veicolo. Questo, tuttavia, è un aspetto che esula dall'introduzione del DAC.

Il fattore sulla sicurezza di esercizio, dall'altra parte, appare più chiaro con le funzionalità *EP-brake* e *Train length and train integrity determination*: infatti, la prima garantirebbe una migliore reattività e l'omogeneità dell'azione frenante e, conseguentemente, favorirebbe degli spazi di frenata ridotti; la seconda, invece, monitorerebbe di continuo la lunghezza del treno, verificando inoltre che nessun veicolo si sia accidentalmente separato dalla colonna di veicoli, dando riscontro effettivo di tutto ciò al macchinista mediante una interfaccia uomo-macchina (un tablet). In particolare, la funzionalità appena citata potrebbe favorire l'introduzione del blocco mobile, ovvero il distanziamento tra due treni successivi calcolato in base alle caratteristiche tecniche e alle prestazioni correnti dei convogli, nota la loro distanza in ciascun istante. Quindi, il controllo di lunghezza e integrità favorirebbe una transizione più veloce verso il blocco mobile, superando quindi le attuali sezioni di blocco fisse e i dispositivi conta-assi.

In ultima istanza, ai fini della diagnostica e della manutenzione, la fornitura elettrica a bassa tensione del DAC aiuterebbe il monitoraggio di quelli elementi critici dei rotabili rilevati in [7], favorendo lo sviluppo della manutenzione predittiva e della telediagnostica, quest'ultima ormai indispensabile per la circolabilità sulle linee AV/AC.

stroke alone and any auxiliary locomotives are not sufficient to effectively reduce the charging time of the general conduit. Therefore, solutions could be: 1) upgrading the braking system with the main line; 2) installing air tanks on the wagons which, by means of a valve controlled by the EP-brake logic, accelerate recharging. In all cases, both solutions would entail additional costs on top of the DAC installation costs. Finally, with regard to the reduced braking mass percentage and the performance of the EP-brakes, the digital coupler is not able to intervene in the strict sense, but it would be up to the wagon keeper, as in the previous case, to update the vehicle's braking system.

Subsequently, the digital coupler, thanks to the Energy and data system supply and, on the DAC5, the Distributed Power System, allows the development of both a sensor system that is continuously supplied by the locomotive, as well as the multiple control of locomotives if double or triple traction is required. On the other hand, due to the low voltage and power values guaranteed by the electrical connection, it is not possible to obtain a high-voltage connection to be used in the supply of refrigerated containers or to guarantee distributed power, in the sense of motors in series as in the case of passenger EMUs.

*From the point of view of commissioning operations, the adoption of DAC would favour automation and, as a consequence, a reduction in the physical effort required of trackside operators. In fact, the Train composition and wagon order detection, in addition to physically coupling the vehicles, would verify in a few moments that the train is composed with the right rolling stock and arranged in the correct position. Therefore, the trackside operator would simply check the correct *modus operandi* of this functionality, as would happen with the Automatic brake test, where the tightening and release of the brakes would be the task of the DAC logic, which would signal any malfunction.*

Thus, during operation, DAC does not favour an increase in the train's cruising speed, since this depends on other factors: according to UIC running regimes, the operation of a rolling stock at a certain speed is subject to the percentage of braked mass, which can be improved by acting on the vehicle's empty/load devices. This, however, is an aspect that is outside the scope of the introduction of DAC.

The factor on operational safety, on the other hand, appears clearer with the EP-brake and train length and train integrity determination functions: the former would ensure better reactivity and homogeneity of the braking action and, consequently, favour shorter braking distances; the latter, on the other hand, would continuously monitor the length of the train, also verifying that no vehicle has accidentally separated from the column of vehicles, giving actual feedback of all this to the driver through a man-machine interface (a tablet). In particular, the above-mentioned functionality could facilitate the introduction of the moving block, i.e. the distance between two subsequent trains calculated on the basis of the technical characteristics and current performance of the trainsets, knowing

6. Prestazioni sulla linea

Effettuata una panoramica tecnica e operativa su quanto attualmente influenza negativamente il trasporto merci ed analizzato qualitativamente quanto potrebbe essere risolto grazie all'adozione del DAC, le analisi di questo paragrafo mirano a valutare se l'accoppiatore digitale sia in grado di migliorare le prestazioni in fase di esercizio sulla linea. In particolare, si vogliono ripercorrere le analisi condotte in [8], implementandole in termini di valori e di risultati, in termini esemplificativi.

In primo luogo, si effettua un'analisi quasi-statica con l'obiettivo di valutare la ripartenza da fermo di un treno su una linea in pendenza, evitando la rottura dell'accoppiatore, con conseguente spezzamento del treno. In particolare, i parametri di influenza su tale tipo di analisi sono:

- i gradi di prestazione, da 1 a 31, secondo le prescrizioni della PGOS;
- i limiti di resistenza sul castelletto di trazione, con particolare attenzione a 850 kN (gancio rinforzato) e 1000 kN (DAC).

Dunque, si calcola il limite massimo di massa rimorchiabile, in funzione del grado di prestazione e del limite di resistenza a trazione, invertendo la relazione:

$$R_g = M \cdot g \cdot \frac{(i + r)}{1000} + M \cdot a_{min,s} \quad (1)$$

nella quale R_g è la resistenza dell'accoppiamento [N], M è la massa rimorchiabile [kg], g è l'accelerazione di gravità [m/s^2], $(i + r)$ sono i coefficienti del grado di prestazione e $a_{min,s}$ è la minima accelerazione allo spunto che deve essere sempre assicurata in fase di ripartenza del treno, pari a $0.03 m/s^2$ per prescrizione RFI [9]. I risultati sono riportati in Fig. 4.

Dalla Fig. 4 si evince che, ammettendo un limite di resistenza a trazione pari a 1000 kN, un treno da 4000 t è in grado di effettuare una ripartenza da fermo fino al g.d.p. 21/22, mentre un treno da 2500 t e da 1600 t fino al 30/31 g.d.p.

Il passo successivo è un'analisi di tipo dinamico, in cui l'obiettivo è quantificare e soddisfare il dispendio energetico richiesto dal treno per l'esercizio a velocità e grado di prestazione costanti. In tal caso, i parametri di influenza sono:

- i gradi di prestazione, da 1 a 31, secondo le prescrizioni della PGOS;
- la velocità di marcia: da 80 a 160 km/h, con step di 5 km/h;
- la massa del treno: 1600 t (limite PGOS standard), 2500 t (limite PGOS con deroga) e 4000 t (treno merci lungo e pesante);
- il numero di locomotive di trazione, da 1 a 3, che si aggiungono alla massa del treno ipotizzando che un'unità di trazione pesi mediamente 90 t.

their distance at each instant. Thus, length and integrity control would favour a faster transition to the moving block, thus overcoming the current fixed block sections and axle-counting devices.

Ultimately, for the purposes of diagnostics and maintenance, the low-voltage electrical supply of the DAC would help the monitoring of those critical elements of the rolling stock detected in [7], favouring the development of predictive maintenance and telediagnosics, the latter now indispensable for the circulation on HS/HC lines.

6. Performance on the line

Having carried out a technical and operational overview of what currently negatively influences freight transport and qualitatively analysed what could be solved by the adoption of DAC, the analyses in this section aim to assess whether the digital coupler is able to improve performance during operation on the line. In particular, it is intended to retrace the analyses conducted at [8], implementing them in terms of values and results, in illustrative terms.

First of all, a quasi-static analysis is carried out with the aim of evaluating the restart from standstill of a train on a sloping line, avoiding the breakage of the coupler, resulting in the breaking of the train. Specifically, the parameters of influence on this type of analysis are:

- performance grades, from 1 to 31, according to PGOS requirements;
- the strength limits on the tensile frame, with a focus on 850 kN (reinforced hook) and 1000 kN (DAC).

So, the maximum towable mass limit is calculated, depending on the performance grade and the tensile strength limit, by inverting the relationship:

$$R_g = M \cdot g \cdot \frac{(i + r)}{1000} + M \cdot a_{min,s} \quad (1)$$

in which R_g is the coupling resistance [N], M is the towable mass [kg], g is the acceleration of gravity [m/s^2], $(i + r)$ are the coefficients of the performance grade and $a_{min,s}$ is the minimum acceleration from standstill that must always be ensured when restarting the train, which is $0.03 m/s^2$ per RFI prescription [9]. The results are shown in Fig. 4.

Fig. 4 shows that, assuming a tensile strength limit of 1000 kN, a 4000 t train is capable of restarting from standstill up to g.d.p. 21/22, while a 2500 t and a 1600 t train up to g.d.p. 30/31.

The next step is a dynamic analysis, where the objective is to quantify and meet the energy expenditure required by the train for operation at constant speed and performance level. In this case, the influencing parameters are:

- performance grades, from 1 to 31, according to PGOS requirements;
- the travel speed: from 80 to 160 km/h, in steps of 5 km/h;

Resistenza gancio / screw resistance [kN] → gdp* ↓	330	400	550	850	1000	
1	4.451	5.395	7.418	11.464	13.487	
2	4.175	5.060	6.958	10.753	12.650	
3	3.931	4.764	6.551	10.124	11.911	
4	3.714	4.501	6.190	9.566	11.254	
5	3.519	4.266	5.866	9.065	10.665	
6	3.344	4.054	5.574	8.615	10.135	
7	3.127	3.790	5.211	8.054	9.475	
8	2.936	3.559	4.893	7.562	8.896	
9	2.744	3.326	4.574	7.068	8.316	
10	2.576	3.123	4.294	6.635	7.806	
11	2.393	2.900	3.988	6.163	7.251	
12	2.234	2.708	3.723	5.754	6.770	
13	2.108	2.555	3.513	5.430	6.388	
14	1.995	2.419	3.326	5.140	6.047	
15	1.905	2.309	3.175	4.907	5.773	
16	1.784	2.162	2.973	4.595	5.405	
17	1.677	2.033	2.795	4.320	5.082	
18	1.568	1.900	2.613	4.038	4.751	
19	1.472	1.784	2.453	3.791	4.460	
20	1.404	1.702	2.340	3.617	4.255	
21	1.348	1.634	2.246	3.472	4.084	
22	1.306	1.583	2.177	3.364	3.957	
23	1.216	1.474	2.027	3.133	3.686	
24	1.170	1.418	1.950	3.013	3.545	
25	1.090	1.321	1.817	2.808	3.303	
26	1.040	1.260	1.733	2.678	3.150	
27	994	1.204	1.656	2.559	3.011	
28	946	1.147	1.577	2.437	2.867	
29	903	1.094	1.505	2.326	2.736	
30	829	1.005	1.382	2.136	2.513	
31	772	936	1.287	1.989	2.340	
*: gradi di prestazione / performance grades						

LEGENDA / LEGEND

 Treno da 4000 t
4000 t train

 Treno da 2500 t
2500 t train

 Treno da 1600 t
1600 t train

NOTA: il valore 4000 t indica il treno merci lungo e pesante che si vuole realizzare; i valori di 2500 t e 1600 t, invece, sono i valori di riferimento attualmente indicati nella PGOS.

NOTE: 4000 t value refers to the long and heavy haul train that aims to be realised; meanwhile, 2500 t and 1600 t values refer to PGOS' current standards.

Figura 4 – Analisi quasi-statica in ripartenza da fermo per treni da 1600, 2500 e 4000 t, in funzione della resistenza del castelletto di trazione e dei gradi di prestazione (nella figura: "Il valore di 4000 t indica il lungo treno pesante da implementare; i valori di 2500 e di 1600 t, d'altra parte, sono i valori di riferimento indicati correntemente nella PGOS")

Figure 4 - Quasi-static analysis in restart from standstill for 1600, 2500 and 4000 tons trains, as a function of traction unit strength and performance grades (in the figure: "The value 4000 t indicates the long and heavy freight train to be implemented; the values 2500 and 1600 t, on the other hand, are the reference values currently indicated in the GPOS").

Quindi, conoscendo massa e numero di locomotive, si calcola lo sforzo di trazione al variare del g.d.p. e della velocità, valutando dove non si superano i 1000 kN:

$$T = \frac{i + r + a + b V^2}{1000} \cdot g \cdot M_{\text{tot}} \quad (2)$$

In cui T è lo sforzo di trazione [N], (i + r) sono i coefficienti del g.d.p., a e b sono coefficienti della formula binomiale per il calcolo della resistenza specifica aerodinamica all'avanzamento V è la velocità del treno [km/h], g è l'accelerazione di gravità [m/s²] e M_{tot} è la massa totale del treno [kg], che comprende la massa delle locomotive. I risultati si possono riassumere in Tab. 2. Ad esempio, supposto un grado di prestazione pari a 29 (quindi resistenza totale 34,2‰) e una massa di 2500 t (2590 considerando la massa della locomotiva), si ottiene uno sforzo di trazione pari a 981.3 kN. Quindi, moltiplicando tale valore per 80/3.6 si ottiene una potenza richiesta di 21,8 MW, quindi tre locomotive a piena potenza continuativa di fatto. Il fatto è che la Tab. 2 non considera la potenza, ma il solo sforzo di trazione se si avesse potenza illimitata (con masse addizionali in base alle locomotive inserite) e si dovesse basare il ragionamento solo sul limite di resistenza del gancio; si potrebbe trainare un convoglio da 2500 t in singola fino al GDP 29. Tuttavia, andando a considerare anche la potenza richiesta dalla massa rimorchiata e confrontandola con

- c) the mass of the train: 1600 t (standard PGOS limit), 2500 t (PGOS limit with derogation) and 4000 t (long and heavy freight train);
- d) the number of traction locomotives, from 1 to 3, added to the mass of the train assuming that a traction unit weighs on average 90 t.

Then, knowing the mass and number of locomotives, we calculate the tractive effort as a function of g.d.p. and speed, estimating where 1000 kN is not exceeded:

$$T = \frac{i + r + a + b V^2}{1000} \cdot g \cdot M_{\text{tot}} \quad (2)$$

In which T is the tractive effort [N], (i + r) are the coefficients of the g.d.p., a and b are coefficients of the binomial formula for calculating the specific aerodynamic resistance V is the speed of the train [km/h], g is the acceleration of gravity [m/s²] and M_{tot} is the total mass of the train [kg], which includes the mass of the locomotives. The results can be summarised in Tab. 2. For example, assuming a performance grade of 29 (thus total strength 34.2‰) and a mass of 2500 t (2590 considering the mass of the locomotive), a tractive effort of 981.3 kN is obtained. Thus, multiplying this value by 80/3.6 yields a power requirement of 21.8 MW, i.e. three locomotives at full continuous power. The fact is that Tab. 2 does not consider power, but only

Tabella 2 – Table 2

Risultati dell'analisi dinamica per le diverse condizioni di carico e di trazione, supposto un limite massimo di resistenza a trazione pari a 1000 kN ed a prescindere dalla potenza disponibile (v. Fig. 5)
Results of the dynamic analysis for the different load and tensile conditions, assuming a maximum tensile strength limit of 1000 kN and regardless of the available power (see Fig. 5)

Massa rimorchiata [t] <i>Towed mass</i> [t]	Condizione di trazione <i>Traction condition</i>	GDP massimo a 80 km/h <i>Maximum GDP at 80 km/h</i>	$i + r_c$ [%]	GDP massimo a 160 km/h <i>Maximum GDP at 160 km/h</i>	$i + r_c$ [%]
1600	Singola <i>Single</i>	31	40,5	31	40,5
1600	Doppia <i>Double</i>	31	40,5	31	40,5
1600	Trippla <i>Triple</i>	31	40,5	31	40,5
2500	Singola <i>Single</i>	29	34,2	27	30,8
2500	Doppia <i>Double</i>	28	32,5	26	29,3
2500	Trippla <i>Triple</i>	27	30,8	24	25,7
4000	Singola <i>Single</i>	19	19,8	15	14,6
4000	Doppia <i>Double</i>	19	19,8	14	13,8
4000	Trippla <i>Triple</i>	18	19,8	14	13,8

quella fornita dalle locomotive Vectron, in Fig. 5 si riscontra come tale condizione non sia minimamente raggiungibile. Infatti, osservando la Fig. 5, con una locomotiva da 5.2 MW in singola trazione si arriva solo al I GDP, oltre occorre ricorrere alla trazione multipla.

Per stabilire l'effettiva bontà della soluzione DAC nell'esercizio di un treno in linea è necessario calcolare la potenza di trazione mediante la relazione:

$$P = T \cdot \left(\frac{V}{3.6} \right) \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

In cui P è la potenza [MW], T è lo sforzo di trazione [N] e V la velocità [km/h]. Inoltre, utilizzando i dati tecnici di due locomotive reali Siemens Vectron (Tab. 3), si valuta se la prestazione del treno, fissati il g.d.p., il numero di locomotive (che per disposizioni PGOS non può eccedere le tre unità) e la velocità, può essere soddisfatta dalle locomotive o macchine di trazione. Questo è ottenuto mediante un problema di minimo in Excel (Fig. 5) in cui il valore 4 è sintomo del fatto che, per soddisfare la specifica prestazione, sono necessarie almeno quattro unità.

La seconda parte dell'analisi dinamica ha lo scopo di valutare se la linea elettrica di alimentazione, in particolare quella della rete convenzionale a 3000 V in c.c., è in grado di soddisfare la potenza richiesta dal treno per la sua marcia. Utilizzando gli stessi parametri della prima parte, si calcola la potenza specifica del treno supponendo che le sottostazioni elettriche siano dislocate, in via cautelativa, ogni 15 km:

tractive effort if you had unlimited power (with additional masses depending on the locomotives inserted) and if the reasoning were based solely on the resistance limit of the hook; a 2500 t convoy in single up to GDP 29 could be pulled. However, if we also consider the power required by the towed mass and compare it with that provided by the Vectron locomotives, Fig. 5 shows that this condition is not at all achievable. In fact, looking at Fig. 5, with a 5.2 MW locomotive in single traction only GDP I can be reached, beyond which multiple traction is required.

To establish the actual goodness of the DAC solution in the operation of a line train, it is necessary to calculate the traction power by means of the relationship:

$$P = T \cdot \left(\frac{V}{3.6} \right) \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

Where P is the power [MW], T is the tractive effort [N] and V is the speed [km/h]. Furthermore, using the technical data of two real Siemens Vectron locomotives (Tab. 3), it is assessed whether the performance of the train, fixed the g.d.p., the number of locomotives (which by PGOS provisions cannot exceed three units) and the speed, can be satisfied by the locomotives or traction machines. This is achieved by means of a minimum problem in Excel (Fig. 5) in which the value 4 indicates that at least four units are required to meet the specified performance.

The second part of the dynamic analysis is aimed at assessing whether the power supply line, in particular that of the conventional 3000 V DC network, is able to meet

Tabella 3 – Table 3

Caratteristiche tecniche delle locomotive Siemens Vectron utilizzate per confrontare la potenza richiesta dal treno con quella erogabile dalle macchine (Fonte: [14])

Technical characteristics of Siemens Vectron locomotives used to compare the power required by the train with the power that can be delivered by the machines (Source: [14])

Tipologia di locomotiva <i>Type of locomotive</i>	Classificazione RFI <i>RFI Classification</i>	Massa [t] <i>Mass [t]</i>	Tensioni operative [V] <i>Operating voltages [V]</i>	Potenza Massima [MW] <i>Maximum power [MW]</i>	Velocità massima [km/h] <i>Maximum speed [km/h]</i>
Siemens Vectron DC InRail	E191	80	3 kV DC 1,5 kV DC	5,2	160
Siemens Vectron MS InRail	E193	90	3 kV DC 1,5 kV DC 25 kV – 50 Hz AC 15 kV – 16,7 Hz AC	6,4	160

$$P_s = \frac{P}{15} \quad (4)$$

in cui P_s è la potenza specifica [MW/km] e P la potenza richiesta al tiro [MW]. Sapendo che la rete a 3000 V in c.c. fissa il limite di potenza specifica a 0,7 MW/km, si calcola il numero massimo di treni - o capacità C - che possono impegnare il tratto compreso tra due sottostazioni. Questo si ottiene arrotondando per difetto l'espressione:

$$C = \frac{0,7}{15} \quad (5)$$

Con un treno da 4000 t, 0,7 MW/km risulta un limite di potenza specifica piuttosto basso, che consente il passaggio di un solo treno fino a 90 km/h e con bassi gradi di prestazione. Dunque, si è valutato fino a quale limite di P_s si può ottenere il passaggio di un treno pesante a 120 km/h fino al g.d.p. 10: questo è ottenuto impostando una potenza specifica pari a 1,5 MW/km.

7. Richiamo di analisi costi-benefici in letteratura ed applicazione di analisi multicriteri

Analizzate le possibilità di risoluzione delle problematiche tecniche e operative attraverso le funzionalità del DAC, si vuole valutare l'effettiva applicabilità dell'accoppiatore digitale su piccola e larga scala anche sotto altri punti di vista oltre a quello funzionale. Innanzitutto, è possibile effettuare una stima dei costi associati all'installazione del DAC sull'intera flotta di carri e locomotive (Tab. 4), utilizzando le informazioni fornite in [15].

È facile rendersi conto di come l'implementazione del DAC su una così larga flotta di veicoli abbia dei costi particolarmente rilevanti, i quali necessitano di una giustificazione plausibile, foss'anche di strategia per il mercato del trasporto ferroviario delle merci, per il loro esborso.

A tale scopo, l'analisi costi-benefici formulata in [15], nel caso del DAC4, dà esito positivo sia nel breve periodo

the power required by the train to run. Using the same parameters as in the first part, the specific power of the train is calculated assuming that the electrical substations are located, as a precaution, every 15 km:

$$P_s = \frac{P}{15} \quad (4)$$

where P_s is the specific power [MW/km] and P is the power required to pull [MW]. Knowing that the 3000 V DC network sets the specific power limit at 0.7 MW/km, the maximum number of trains - or capacity C - that can engage the section between two substations is calculated. This is obtained by rounding down the expression:

$$C = \frac{0,7}{15} \quad (5)$$

With a 4,000 t train, 0.7 MW/km is a rather low specific power limit, allowing the passage of a single train up to 90 km/h and with low performance grades. Therefore, it was evaluated up to which P_s limit the passage of a heavy train at 120 km/h up to g.d.p. 10 can be achieved by setting a specific power of 1.5 MW/km.

7. Recall of cost-benefit analyses in the literature and application of multi-criteria analysis

Having analysed the possibilities of solving technical and operational problems through the functionality of DAC, we want to assess the actual applicability of the digital coupler on a small and large scale from other points of view besides the functional one. First of all, it is possible to estimate the costs associated with the installation of DAC on the entire fleet of wagons and locomotives (Tab. 4), using the information provided in [15].

It is easy to see how the implementation of DAC on such a large fleet of vehicles has particularly high costs, which require a plausible justification, if only a strategy for the rail freight market, for their outlay.

Tabella 4 – Table 4

Stima dei costi associati all'installazione del DAC sui veicoli [15]
Estimated costs associated with installing DAC in vehicles [15]

VEICOLO VEHICLE	Costo DAC per veicolo [€/veicolo] Cost Vehicle DAC [€/vehicle]	Costo ausiliari DAC [€/veicolo] DAC auxiliary cost [€/vehicle]	Costo manodopera [€/veicolo] Labour cost [€/vehicle]	Costo totale per veicolo [€/veicolo] Total cost per vehicle [€/vehicle]	Quantità di veicoli [-] Number of vehicles [-]	Costo totale flotta [Mld di €] Total Fleet Cost [billion €]	TOTALE [Mld di €] TOTAL [billion €].
Carro Wagon	20.000 (2 x DAC classico) 20.000 (2 x classic DAC)	5000	3000	28.000	460.000	12,880	13,807
Locomotiva Locomotive	40.000 (2 x DAC ibrido) 40.000 (2 x hybrid DAC)	/	5000	45.000	20.600	927	

(2028-2037) sia nel lungo periodo (2028-2057), in quest'ultimo caso con un tasso interno di rendimento pari al 19%. Ad ogni modo, come affermato dai redattori, tale analisi risulta incompleta a causa di fattori come la ridotta qualità dei dati, nonché la previsione dei volumi di trasporto basata unicamente su un obiettivo politico e non su dati tangibili.

Ad ogni modo, l'analisi costi-benefici non è in grado di mettere in relazione aspetti con unità di misura differenti dal denaro, come la qualità della sicurezza o la riduzione dei tempi di trasporto, nonché il miglioramento delle prestazioni tecniche di un rotabile. Pertanto, si adotta l'analisi multicriteri (AMC), con lo scopo di considerare sia gli aspetti economici che funzionali associati alla tecnologia DAC, in modo da ottenere un quadro più completo per prendere la decisione finale. Nella fattispecie dello studio, si è adoperato il metodo Electre II per effettuare il confronto tra tre alternative sulla base di sei criteri decisionali, riportati in Tab. 5.

Per quanto concerne la costruzione dei i criteri, si assume che:

- in g_1 , un treno da 4000 t sia composto da 35 carri, mentre uno da 2500 t, in proporzione, sia composto da 22 carri;
- in g_2 , un treno con DAC richieda di un'ora di preparazione, mentre uno senza ne richieda tre;
- in g_3 , si utilizzano i costi riportati in Tab. 4;
- in g_4 , g_5 e g_6 , la valutazione dell'alternativa a_2 si ottiene con una media pesata tra i voti delle altre due alternative.

Quindi, si ottiene la matrice di decisione, con i pesi relativi a ciascun criterio, riportata qui di seguito (Tab. 6).

In ultima analisi, prima di far girare il software, si scel-

To this end, the cost-benefit analysis formulated in [15], in the case of DAC4, yields positive results both in the short term (2028-2037) and in the long term (2028-2057), in the latter case with an internal rate of return of 19%. However, as stated by the editors, this analysis is incomplete due to factors such as the low quality of the data, as well as the forecast of transport volumes based solely on a political objective and not on tangible data.

However, cost-benefit analysis is not able to relate aspects with units other than money, such as safety quality or reduction of transport time, as well as improvement of the technical performance of a rolling stock. Therefore, multi-criteria analysis (MCA) is adopted, with the aim of considering both economic and functional aspects associated with DAC technology in order to obtain a more complete picture for making the final decision. In the case of this study, the Electre II method was used to compare three alternatives on the basis of six decision criteria, shown in Tab. 5.

With regard to the construction of the criteria, it is assumed that:

- in g_1 , a 4000 t train would consist of 35 wagons, while a 2500 t train would proportionally consist of 22 wagons;
- in g_2 , a train with DAC requires one hour of preparation, while one without requires three;
- in g_3 , the costs shown in Tab. 4 are used;
- in g_4 , g_5 and g_6 , the evaluation of alternative a_2 is obtained by a weighted average between the grades of the other two alternatives.

Hence, we obtain the decision matrix, with weights for each criterion, shown below (Tab. 6).

Ultimately, before running the software, the following

Tabella 5 – Table 5

Elenco e descrizione delle alternative e dei criteri per l'analisi multicriteri
List and description of alternatives and criteria for multi-criteria analysis

Alternativa <i>Alternative</i>	Descrizione <i>Description</i>	Criterio <i>Criterion</i>	Descrizione <i>Description</i>	Scala di misura <i>Scale of measurement</i>
a ₁	Retrofit di tutta la flotta (460.000 carri) <i>Retrofit of the entire fleet (460,000 wagons)</i>	g ₁	Numero di treni componibili <i>Number of modular trains</i>	-
a ₂	Retrofit della flotta a traffico diffuso (210.000 carri) <i>Retrofit of the diffuse traffic fleet (210,000 wagons)</i>	g ₂	Ore totali per la messa in servizio di tutti i treni <i>Total hours for the commissioning of all trains</i>	h
a ₃	Nessun retrofit (0 carri) <i>No retrofit (0 carts)</i>	g ₃	Costi per il retrofit della flotta <i>Fleet retrofit costs</i>	Milioni di € <i>Million €</i>
		g ₄	Qualità del trasporto <i>Transport quality</i>	Scala di valori da 1 a 10 <i>Scale of values from 1 to 10</i>
		g ₅	Utilizzo del telecomando <i>Using the remote control</i>	Scala di valori da 1 a 10 <i>Scale of values from 1 to 10</i>
		g ₆	Utilizzo dell'EP-brake <i>Using the EP-brake</i>	Scala di valori da 1 a 10 <i>Scale of values from 1 to 10</i>

Tabella 6 – Table 6

Matrice di decisione implementata nel software Electre II
Decision matrix implemented in Electre II software

	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₆
W	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
a ₁	-13143	-13143	-12880	9	10	10
a ₂	-17364	-40092	-5800	6,283	6,739	4,565
a ₃	-20909	-62727	-0	4	4	0

gono i tre parametri fondamentali seguenti per la risoluzione del problema.

- I tre livelli dell'indice di concordanza: si sceglie $c^- = \frac{2}{3}$, $c = 0,7$, $c^+ = \frac{3}{4}$. In particolare, il primo e l'ultimo valore sono, rispettivamente, la soglia debole e forte, mentre il secondo è un valore intermedio tra i due, affinché si soddisfi $0,5 \leq c^- \leq c \leq c^+ \leq 1$.
- Gli indici di discordanza: $d^- = 0,25$, $d^+ = 0,5$, affinché si soddisfi $0 \leq d^- \leq d^+ \leq 1$.
- Il massimo numero di cicli da rimuovere, pari a 30 come default del software.

Dai risultati dell'AMC emerge che, in base ai pesi arbitrariamente attribuiti a ciascun criterio, dove è stata data prevalenza all'ottimizzazione della capacità ferroviaria, la soluzione preferibile sia il retrofit completo della flotta dei carri con il DAC, a cui segue il retrofit parziale sulla flotta a traffico diffuso, e infine la soluzione che non prevede alcun retrofit. In altre parole, l'AMC suggerisce l'applicabilità sulla larga scala, che viene preferita all'applicabilità sulla piccola scala. Tale soluzione si può dimostrare con un'analisi di sensitività, in cui si varia il peso associato a ciascun

three fundamental parameters are chosen to solve the problem.

- The three levels of the concordance index: $c^- = \frac{2}{3}$, $c = 0,7$, $c^+ = \frac{3}{4}$ is chosen. In particular, the first and last values are the weak and strong thresholds respectively, while the second is an intermediate value between the two, in order for $0,5 \leq c^- \leq c \leq c^+ \leq 1$ to be satisfied.
- The indices of discordance: $d^- = 0,25$, $d^+ = 0,5$, in order to satisfy $0 \leq d^- \leq d^+ \leq 1$.
- The maximum number of cycles to be removed is 30 as the software default.

The AMC results show that, according to the weights arbitrarily assigned to each criterion, where the optimisation of railway capacity was given preference, the preferred solution is the complete retrofit of the wagon fleet with DAC, followed by the partial retrofit on the diffuse-traffic fleet, and finally the solution with no retrofit at all. In other words, the AMC suggests large-scale applicability is preferred to small-scale applicability. This can be demonstrated with a sensitivity analysis, in which the weight associat-

2500 t - SIEMENS VECTRON DC "E191" - 5,2 MW																	
v [km/h] → gdp* ↓	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4
3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4
4	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
5	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
6	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
7	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
8	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
9	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
10	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
11	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
12	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
13	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
14	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
15	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
16	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
17	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
18	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
19	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
20	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
21	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
22	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
23	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
24	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
25	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	/	/	/
26	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	/	/	/
27	4	4	4	4	4	4	4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
28	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
29	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
30	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
31	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
rd di prestazione / performance grades																	

2500 t - SIEMENS VECTRON MS "E193" - 6,4 MW																	
v [km/h] → gdp* ↓	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
3	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
4	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4
7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4
8	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4
9	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4
10	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
11	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
12	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
13	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
14	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
15	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
16	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
17	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
18	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
19	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
20	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
21	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
22	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
23	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
24	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
25	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
26	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	/	/	/
27	4	4	4	4	4	4	4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
28	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
29	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
30	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
31	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
rd di prestazione / performance grades																	

Figura 5 – Numero di locomotive E191 (in alto) ed E193 (in basso) necessarie per il tiro di un convoglio a grado di prestazione e velocità fissati, condizione di carico 4000 t.
 Figure 5 - Number of locomotives E191 (top) and E193 (bottom) required to pull a convoy at a set performance grade and speed, load condition 4000 t.

critério per vedere se la soluzione finale: nella fattispecie, si dimostra che l'AMC rimane stabile ad eccezione del caso riportato in Fig. 5, in cui si massimizza il critério dei costi, ed with each criterion is varied to see if the final solution: in this case, it is shown that the AMC remains stable with the exception of the case shown in Fig. 5, in which the cost

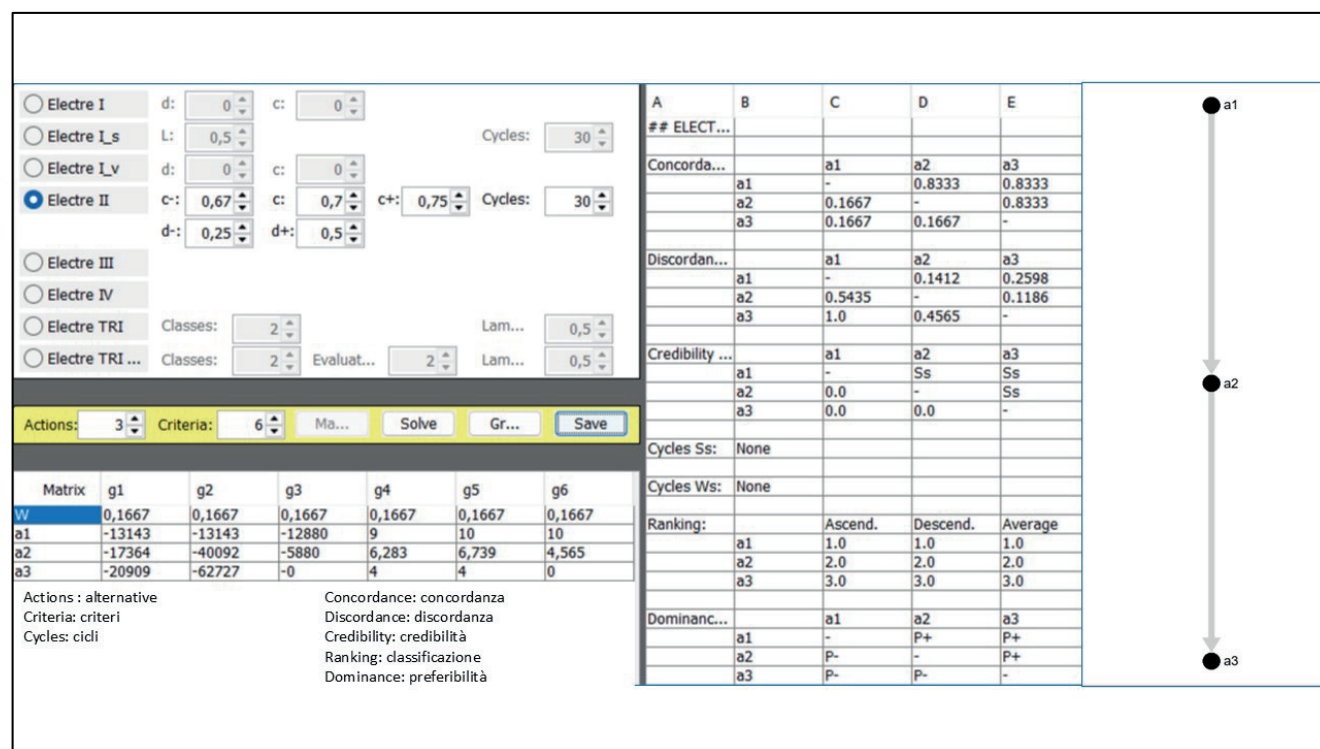


Figura 6 – Risultati AMC con i pesi riportati nella matrice di decisione.

Figure 6 - AMC results with weights in the decision matrix.

ed emerge come le tre alternative sono tutte sullo stesso livello (Fig. 6, Fig. 7).

critera is maximised, and it emerges that the three alternatives are all on the same level (Fig. 6, Fig. 7).

8. Conclusioni

Per quanto concerne l'applicabilità del DAC, il dispositivo è in grado di risolvere completamente undici delle sedici problematiche riscontrate (dunque, il 69%), lasciando tre ancora parzialmente risolte e due senza margini di soluzione. In particolare, oltre a facilitare le operazioni di messa in servizio, automatizzandole quasi del tutto, l'ambito in cui il DAC sviluppa a pieno il suo potenziale è quello relativo all'esercizio in linea di un treno merci. Infatti, grazie alle funzionalità *EP-brake* (limitato alla sola fase di frenatura), *Distributed power system* e *Train length and train integrity determination*, l'accoppiatore automatico digitale consente un indubbio miglioramento in termini di prestazione e di sicurezza, fattori in cui il traffico merci, attualmente, risulta abbastanza carente.

Trattando dei limiti, per contro, si nota come le problematiche con soluzione parziale o inesistente dipendono, per la maggior parte, da fattori esterni alla concezione del DAC. Pertanto, tali complicazioni – come, ad esempio, la mancanza della condotta elettrica ad alta tensione o della condotta principale – richiedono degli ulteriori interventi, con annessi costi extra, indipendentemente dall'attuazione o meno dell'accoppiatore digitale. Lo stesso discorso vale per le prestazioni in linea del treno, in cui si è visto

8. Conclusions

As far as the applicability of DAC is concerned, the device is able to completely resolve eleven of the sixteen problems encountered (i.e. 69%), leaving three still partially resolved and two with no margin for solution. In particular, in addition to facilitating commissioning operations, by automating them almost completely, the area in which the DAC develops its full potential is that of the on-line operation of a freight train. In fact, thanks to the *EP-brake* (limited to the braking phase only), *Distributed power system* and *Train length and train integrity determination* functionalities, the digital automatic coupler allows an undoubted improvement in terms of performance and safety, factors in which freight traffic is currently quite deficient.

Dealing with limitations, on the other hand, it can be seen that problems with partial or no solution depend, for the most part, on factors external to the DAC's design. Therefore, such complications – as, for example, the lack of the high-voltage electrical conduit or the main conduit – require additional interventions, with associated extra costs, regardless of whether the digital coupler is implemented or not. The same applies to the train's line performance, where we have seen how the DAC is able to raise the max-

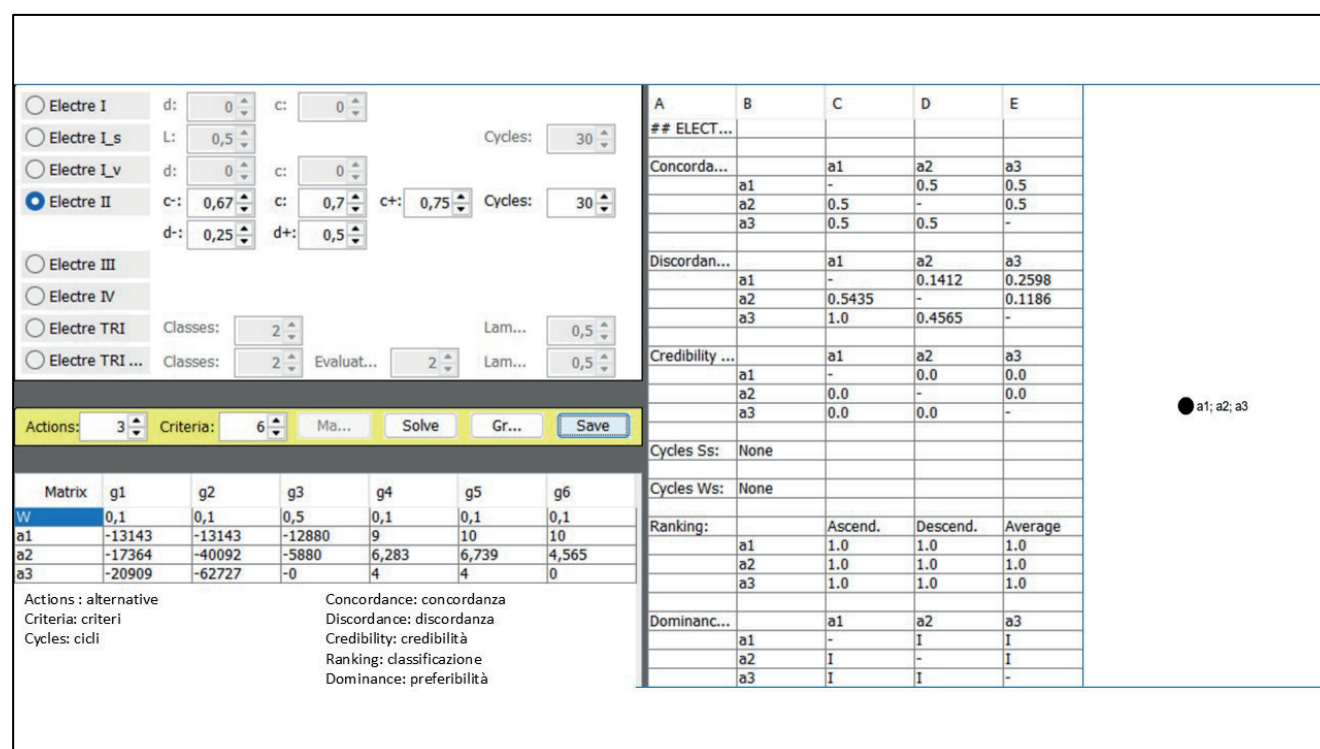


Figura 7 - Analisi di sensitività con la massimizzazione dei costi di retrofit (criterio g_3).

Figure 7 - Sensitivity analysis with retrofit cost maximisation (g_3 criterion).

come il DAC sia in grado di alzare il limite massimo di resistenza a trazione, ma per contro le potenze in gioco, dovute all'aumento della massa rimorchiata, sono a volte non assecondabili dalla potenza erogata dalle locomotive oppure dalla capacità elettrica della linea ferroviaria.

In termini di attuabilità su piccola e larga scala, il traffico diffuso è indubbiamente il sistema di trasporto che otterrebbe i benefici maggiori dall'applicazione del DAC, dal momento che si velocizzerebbero le operazioni di smistamento dei carri e di messa in servizio dei treni, profilando un futuro rilancio di questo sistema nei paesi in cui è stato abbandonato per motivi di gestione e di costi. Ad ogni modo, i vantaggi della tecnologia DAC non si esauriscono alla sola messa in servizio, ma si estendono anche ad aspetti sulla sicurezza e alla diagnostica, che giustificano l'attuabilità anche sulla larga scala.

In ultimo, a contorno di tutte le analisi, è chiaro che l'ingente ammontare dei costi crea più di qualche perplessità e, attualmente, è ancora oggetto di dibattito soprattutto per chiarire se le spese saranno a carico dei soli detentori dei carri o anche dei governi nazionali. Comunque, anche grazie ai risultati dell'analisi multicriteri, la spesa appare per certi ambiti giustificabile per introdurre la tecnologia DAC su larga scala e rendere efficiente un sistema di trasporto troppo spesso trascurato, che oggi rappresenta, al contrario, la chiave verso un'economia più sostenibile.

imum limit of traction resistance, but on the other hand, the powers involved, due to the increase of the towed mass, are sometimes not accommodated by the power delivered by the locomotives or the electrical capacity of the railway line.

In terms of feasibility on a small and large scale, diffused or single wagon traffic is undoubtedly the transport system that would obtain the greatest benefits from the application of DAC, since it would speed up wagon marshalling and train commissioning operations, profiting from a future revival of this system in countries where it has been abandoned for management and cost reasons. In any case, the advantages of DAC technology do not end with commissioning alone, but also extend to safety aspects and diagnostics, which justify its feasibility on a large scale as well.

Finally, as a side note to all the analyses, it is clear that the large amount of costs creates more than a few perplexities and, at present, is still the subject of debate, especially as to whether the costs will be borne by wagon keepers alone or also by national governments. However, also thanks to the results of the multi-criteria analysis, the expenditure appears, for some contexts, justifiable in order to introduce DAC technology on a large scale and make an all too often neglected transport system efficient, which today, on the contrary, represents the key to a more sustainable economy.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] Commissione Europea (2019), *“Green Deal Europeo”*.
- [2] EuRail (2021), *“Europe’s Rail Joint Undertaking - Multi-Annual Work Programme”*.
- [3] CANTONE L., DURAND T., OTTATI A., RUSSO G., TIONE R. (2022), *“The Digital Automatic Coupler (DAC): An Effective Way to Sustainably Increase the Efficiency of Freight Transport in Europe”*, *Sustainability*, n. 14 (15671), pp. 1-11.
- [4] Dellner (2024), *“Datasheet DAC ibrido e classico”*.
- [5] Ente Normativo Europeo (2016), *“EN 15566”*. CEN (2016), EN 15566:2016, Railway applications - Railway rolling stock - Draw gear and screw coupling.
- [6] RFI (2010), *“Manuale di Mestiere: Prefazione Generale all’Orario di Servizio”*.
- [7] PITRUZZELLA V. I., BRUNO F., DALLA CHIARA B., BOTELLO A. (2016), *“Elementi critici dei veicoli ferroviari per trasporto merci - Proposta di un metodo di analisi per la diagnostica e la manutenzione”*, *La Tecnica Professionale*, n. 11, pp. 4-27.
- [8] CARBONI A., BONI G., DALLA CHIARA B. (2022), *“Treni merci lunghi e pesanti in esercizio: analisi sulla resistenza dei ganci ed evidenze sperimentali sugli effetti termici in frenatura”*, *Ingegneria Ferroviaria*, LXXVII, n. 1, pp. 23-40.
- [9] RFI (2005), *“Specifica per la definizione dei parametri tecnici necessari alla determinazione della prestazione massima dei mezzi di trazione e la percorrenza dei treni”*.
- [10] CANTONE L. (2022), *“Simulation of freight trains with up to three traction units in radio communication”*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, n. 1214 (012039), pp. 1-12.
- [11] DJORDJEVIC B., KORDNEJAD B., KRMAC E., BERGSTRAND J. (2025), *“Quantifying the impacts of digital automatic coupling on rail freight in Europe: Overview and case studies”*, *Elsevier*, n. 60, pp. 1-13.
- [12] European DAC Delivery Programme (2022), *“1st DP-Rail and DAC Workshop – Presentation”*.
- [13] European DAC Delivery Programme (2023), *“EDDP @ Fermerci – Presentation”*.
- [14] LOPALCO A. (2021), *“Vectron – The locomotive from Siemens for Europe”*.
- [15] European DAC Delivery Programme (2023), *“Cost Benefit Analysis – Presentation”*.

EXPO Ferroviaria 30/9 - 2/10 2025
STAND P70

La qualità è il nostro viaggio quotidiano.

ISOTRACK

la divisione trasporti di ISOIL
Industria Spa offre soluzioni
di qualità da oltre vent'anni
in ambito ferroviario.

LE NOSTRE APPLICAZIONI

- Treni ad Alta Velocità, Regionali e Mezzi d'Opera;
- Trasporto urbano su rotaia (metropolitane e tram) e gomma (autobus);
- Sistemi di sicurezza a bordo dei veicoli fino a SIL4.

SERVIZI DI QUALITÀ

- Riparazione qualificata della nostra strumentazione;
- Aggiornamento firmware display;
- Qualifica prodotti per sistemi Ready-to-Use;
- Supporto e consulenze per applicazioni specifiche.

www.isoil.it

Cinisello Balsamo - Milano (Italy)
Via Fratelli Gracchi, 27
tel. +39 0266027.1 - fax +39 026123202
vendite@isoil.it

ISOIL

INDUSTRIA
Le soluzioni che contano