



Integrazione di impianti merci, rete e modelli di ottimizzazione per l'esercizio in tempo reale degli impianti

Integrating yards, network and optimisation models towards real-time rail freight yard operations

Riccardo LICCIARDELLO ^(*)
 Norbert ADAMKO ^(**)
 Samuel DELEPLANQUE ^(***)
 Pierre HOSTEINS ^(****)
 Ronghui LIU ^(*****)
 Paola PELLEGRINI ^(*****)
 Anders PETERSON ^(*****)
 Magnus WAHLBORG ^(*****)
 Miloš ZAŤKO ^(*****)

Sommario - Questo articolo descrive lo stato di avanzamento raggiunto dal progetto di ricerca OptiYard nell'uso di algoritmi di ottimizzazione interagenti con micro-simulazione dello scalo ferroviario e della rete connessa per una gestione dello scalo in tempo reale e la comunicazione con la rete. Sono stati rappresentati due casi di studio, uno scalo di smistamento con sella di lancio (principalmente traffico a Carro Merci Singolo) e uno scalo di smistamento piano (principalmente a traffico intermodale), con modelli di micro-simulazione all'avanguardia, combinati con algoritmi di ottimizzazione innovativi. Viene descritta una informazione specialistica sulla natura dei modelli. Tuttavia, l'attenzione è rivolta agli ingegneri ferroviari, mediante una descrizione delle interazioni tra i modelli nella produzione di risultati utili per il dirigente dello scalo (decisioni su personale, binari, assegnazione di locomotive, ordine delle attività) e per il gestore dell'infrastruttura della rete circostante (orari di partenza previsti, disponibilità di itinerari nello scalo).

Summary - This paper describes the state of advancement achieved in the OptiYard research project in the use of optimisation algorithms in interaction with microsimulation of the rail-yard and surrounding network towards real-time yard management and communication with the network. Two case studies, a hump marshalling yard (mainly Single Wagon Load traffic) and a flat shunting yard (mainly intermodal traffic), were represented with state-of-the-art microsimulation models, combined with innovative optimisation algorithms. Some specialistic information on the nature of the models is provided. However, the focus is oriented to railway engineers, with a description of the interactions between the models in producing outputs that are useful both to the yard dispatcher (decisions on staff, track, locomotive assignment, order of operations) and the infrastructure manager of the surrounding network (expected times of departure, availability of tracks in the yard).

^(*) SAPIENZA Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA), Roma, Italia.

^(**) University of Zilina, Slovak Republic.

^(***) Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, Yncréa Hauts-de-France, UMR 8520 - IEMN, France.

^(****) COSYS-ESTAS, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, Univ Lille, Villeneuve d'Ascq, France.

^(*****) University of Leeds, Institute for Transport Studies (ITS), Leeds, United Kingdom.

^(*****) COSYS-LEOST, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, UnivLille, Villeneuve d'Ascq, France.

^(*****) Linköping University, Department of Science and Technology, Norrköping, Sweden.

^(*****) Swedish Transport Administration, Borlänge, Sweden.

^(*****) Simcon s.r.o., Zilina, Slovak Republic.

Elenco degli acronimi

DSS/SSD	Sistema di supporto alle decisioni
ETA/TAP	Ora prevista di arrivo
ETCS	European Train Control System (UC Rail Data Service)
GPS	Sistema di Posizionamento Globale
IM/GI	Gestore dell'infrastruttura
ISR	International Service Reliability (Servizio RNC Data UIC)
IT	Sistemi Informativi
IVG	Porta Video Intelligente
KPI	Indicatore di Prestazioni Chiave
JSON	Notazione Oggetto JavaScript
ORFEUS	Sistema Utente EDI per Trasporto Merci su Rotaia
PIC	Piattaforma Integrata di Circolazione (piattaforma di traffico integrata)
RailML	Railway Markup Language
RNE	Rail Net Europe
RU/IF	Impresa Ferroviaria
SWL	Trasporto a carro completo singolo, comprendente il trasporto diffuso convenzionale
TAP	Tempi di Arrivo Previsti
TIS/STI	Train Information System (Servizio RNC)
TAF/ATTM	Applicazioni telematiche per il trasporto merci
TSI	Specifiche Tecniche di Interoperabilità
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
XML	Extensible Markup Language
YM	Dirigente dello Scalo

1. Introduzione

Gli scali merci ferroviari sono elementi chiave del sistema ferroviario. Le loro attività incidono sull'efficacia complessiva della catena di trasporto "porta a porta" di tutte le merci che utilizzano la modalità ferroviaria. Al fine di contrastare il declino in Europa dell'uso della ferrovia per il trasporto di merci, in particolare quello del trasporto a carro completo (GUGLIELMINETTI et al. [1]), risulta quindi estremamente importante semplificare il più possibile le attività, diminuendo se possibile la loro durata ma soprattutto migliorando la loro regolarità, consentendo così un forte miglioramento delle prestazioni e incentivando il traffico ferroviario, che altrimenti andrebbe principalmente su strada (ISLAM et al. [2]).

La Commissione Europea e l'industria ferroviaria hanno considerato in modo serio il problema: il Progetto Comunitario Shift2Rail ha incluso terminali, hub, scali di smistamento e binari di raccordo come Dimostrazione di Tecnologia nel loro Piano d'Azione Pluriennale (Shift2Rail [3]). Nel 2017 Shift2Rail ha lanciato una "call" specifica sulla gestione automatizzata in tempo reale degli scali e della rete. La gestione in tempo reale delle ferrovie ha rappresentato un "tema caldo" negli ultimi anni (PELLEGRINI et al. [4]), tuttavia la letteratura riguardante, nello specifico, la gestione degli scali e la loro interazione con la rete è in realtà scarsa.

List of acronyms

DSS	Decision Support System
ETA	Expected Time of Arrival
ETCS	European Train Control System (UC Rail Data Service)
GPS	Global Positioning System
IM	Infrastructure Manager
ISR	International Service Reliability
IT	Information Technology
IVG	Intelligent Video Gate
KPI	Key Performance Indicator
JSON	JavaScript Object Notation
ORFEUS	Open Rail Freight EDI User System
PIC	Piattaforma Integrata di Circolazione (integrated traffic platform)
RailML	Railway Markup Language
RNE	Rail Net Europe
RU	Railway Undertaking
SWL	Single Wagon Load Transport
TIS	Train Information System RNC Service
TAF	Telematic Applications for Freight
TSI	Technical Specification for Interoperability
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
XML	Extensible Markup Language
YM	Yard Manager

1. Introduction

Rail freight yards are key elements of the rail system. Their operations affect the overall effectiveness of the door-to-door transport chain of any goods that use the rail mode. In order to contrast the decline in Europe of the use of the rail mode for freight transport, and in particular that of Single Wagon Load transport - see GUGLIELMINETTI et al. [1] - it is thus extremely important to streamline operations as much as possible, decreasing if possible their duration but above all improving their regularity, thus enabling a strong improvement in the performance of the rail mode and attracting traffic that otherwise would go mainly by road (ISLAM et al [2]).

The European Commission and the rail industry have taken this issue seriously - their Joint Undertaking Shift2Rail have included terminals, hubs, marshalling yards and sidings as a Technology Demonstrator in their Multi-Annual Action Plan (Shift2Rail [3]). A specific call on real-time yard and network management was issued by Shift2Rail in 2017. Real-time management of railways has been a hot topic in recent years - see e.g. PELLEGRINI et al. [4] - however the literature regarding management of yards specifically, and their interaction with the network is in fact scarce.

Real-time management capabilities are key in improving regularity in the flow of trains between yards and network in daily operations that are often highly perturbed.

The call resulted in the funding of a dedicated project. The OptiYard project received funding from the Shift2Rail Joint Undertaking under the European Union's Horizon

Le capacità di gestione in tempo reale sono fondamentali per migliorare la regolarità del flusso di treni tra scali e la rete connessa nelle operazioni quotidiane, le quali spesso, nella loro realizzazione, sono influenzate da perturbazioni.

L'invito della Commissione UE ha portato al finanziamento di un progetto dedicato. Il progetto OptiYard ha ricevuto finanziamenti dal Progetto Comunitario Shift2Rail nell'ambito del programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea (convenzione di sovvenzione n. 777594). Gli autori della presente memoria riconoscono il supporto fornito da tutti i partner del consorzio, in particolare Adriafer e CD Cargo, per i dati e le informazioni riguardanti gli scali.

OptiYard ha affrontato l'ottimizzazione degli scali ferroviari indirizzata al dirigente di scalo come utente finale. Il progetto ha lavorato su due casi di studio: uno scalo di smistamento a sella di lancio, principalmente per il trasporto merci a carro singolo (caso ceco) e uno scalo di smistamento in piano, principalmente dedicato alla gestione del traffico intermodale (caso italiano).

L'idea alla base di OptiYard è di affrontare il problema della gestione in tempo reale attraverso algoritmi di ottimizzazione che interagiscono con i modelli microscopici dello scalo e di una porzione "rilevante" della rete ferroviaria collegata. Il "Work Package" del progetto n. 4, la "Modellazione", ha avuto come obiettivi principali lo sviluppo e la validazione dei modelli di scalo e di rete, in grado di operare in tempo reale e di interagire con il modello di ottimizzazione sviluppato nel "Work Package" n. 5.

L'aspetto centrale descritto in questo documento è costituito dalle risultanze relative alle interazioni tra i modelli sopra citati e con i sistemi informativi collegati allo scalo e alla rete ferroviaria. Questi risultati hanno contribuito alla progettazione del Sistema di Supporto alle Decisioni (SSD) e sono ora seguiti dalla fase di attuazione, ancora ai suoi primi passi. L'obiettivo finale è quello di sviluppare un SSD di gestione dello scalo altamente innovativo, in grado di generare decisioni e raccomandazioni ottimali sull'utilizzo delle risorse in tempo reale, parallelamente all'innovazione in corso nella gestione della rete in tempo reale. Ciò consentirà a sua volta di migliorare il processo decisionale nella programmazione delle tracce orarie "ad hoc", per ottimizzare i processi operativi che relazionano il traffico merci negli scali e terminali con tracce orarie da e verso la rete.

Il §2 fornisce una breve panoramica dello stato dell'arte. Dal §3 al §7 sono riportate le descrizioni degli scali per i casi di studio citati e dei modelli. Il §8 descrive le interazioni tra i modelli richieste, per produrre i risultati desiderati: tra i modelli di micro-simulazione e di ottimizzazione dello scalo, tra questi e il modello di rete e con i sistemi esterni. Conclusioni e prospettive sono riportate nel §9.

2. Stato dell'arte

La letteratura sulla modellazione degli scali ferroviari si rivolge ampiamente alla determinazione della capacità

2020 research and innovation programme under grant agreement No 777594. The authors also acknowledge the support provided by all the consortium partners, in particular Adriafer and CD Cargo for the data and information regarding the yards.

OptiYard addressed the optimisation of rail yards targeting the yard dispatcher as end-user. The project worked on two case studies, a hump marshalling yard mainly for Single Wagon Load transport (Czech case) and flat shunting yard mainly managing intermodal traffic (Italian case).

The idea behind OptiYard was to tackle the real-time management issue through optimisation algorithms interacting with microscopic models of the yard and of a 'relevant' portion of the surrounding network. The project's Work Package n. 4 'Modelling' had the main objectives of development and validation of the yard and network models capable of real-time functionality and interaction with the optimisation model developed in Work Package 5.

It is the findings regarding the interactions between the abovementioned models and with the IT systems connected to the yard and the railway network that are the focus of this paper. These findings contributed to the design of the Decision Support System (DSS) and are now being followed up in the implementation, which is still in its first steps. The final aim is to develop a highly innovative yard management DSS, capable of generating optimal disposition decisions and recommendations for resource utilisation in real time, in parallel with the on-going innovation in real-time network management. This will allow in turn to improve decision-making in ad-hoc timetable planning to optimise operational processes that connect freight traffic in yards and terminals with timetable slots to and from the network.

In section 2 a brief overview of the state of the art is provided. Descriptions of the case study yards and the models follow in section 3 to 7. Section 8 describes the interactions between the models required to produce the desired outputs: between the optimisation and yard micro-simulation models, between these and the network model, and with outside systems. Conclusions and outlook are given in section 9.

2. State of the art

The literature on rail yard modelling widely addresses the determination of yard capacity and other Key Performance Indicators (KPIs) for different types of yards (marshalling yards, flat rail yards, intermodal terminals etc., see e.g. in the Italian literature DALLA CHIARA et al. [5], BRUNO [6], LO RUSSO et al. [7], and elsewhere a interesting descriptions by SHI and ZHOU [8] and ANTOGNOLI et al. [9] for several types of rail terminals).

Both discrete and continuous (i.e. over time, second by second) simulation models are used. The purpose of this modelling has generally been to support decision-making regarding changes in infrastructure design or operations

degli scali e di altri KPI per diversi tipi di scali (scali di smistamento, scali in piano, terminali (intermodali). Esempi nella letteratura italiana si trovano in DALLA CHIARA et ALII [5], BRUNO [6], LO RUSSO et ALII [7], e per i riferimenti internazionali nelle descrizioni interessanti di SHI e ZHOU [8] e di ANTOGNOLI et ALII [9] in relazione ai diversi tipi di terminali ferroviari.

Nella letteratura sono descritti modelli di simulazione sia discreti che continui (nel tempo, secondo per secondo). Il fine dei modelli è generalmente quello di supportare il processo decisionale relativo ai cambiamenti nella progettazione dell'infrastruttura o nella gestione delle attività. Il fine della modellazione in OptiYard, invece, è relativamente nuovo: usare la simulazione come supporto per l'ottimizzazione in tempo reale degli scali ferroviari (condizioni di infrastruttura fissa) e quindi combinare la micro-simulazione continua con algoritmi di ottimizzazione, fornendo non solo KPI dopo un certo periodo di funzionamento ma soprattutto risultati in tempo reale a supporto del processo decisionale del dirigente, in interazione con i sistemi esterni che rappresentano la rete ferroviaria e le flotte di materiale rotabile.

In questo campo, la letteratura diventa più scarsa. Infatti, quando si tratta di ottimizzazione in tempo reale, la letteratura esistente si concentra quasi esclusivamente sul processo di smistamento (BOHLIN et ALII [10], BOYSEN et ALII [11], DAGANZO [12]). Il processo di smistamento consiste nel gestire i carri sui binari per comporre i treni in uscita. In una situazione tipica i treni arrivano sui binari del fascio di ricevimento, i loro carri vengono distaccati e spinti sulla sella di lancio per essere poi indirizzati verso il fascio direzioni ("roll-in"); i treni in uscita risultanti vengono trasferiti verso il fascio partenze prima di entrare nella rete.

Il processo di smistamento si concretizza in modo differente nei diversi scali, a seconda dello schema infrastrutturale e del traffico esistente. In generale l'obiettivo è la minimizzazione dei ritardi dei treni alla partenza. Nello smistamento a singolo stadio, i carri vengono spostati una sola volta dal fascio arrivi al fascio direzioni. Raggiunti questi ultimi, i carri iniziano a comporre il treno in uscita (HAAHR e LUSBY [13], JAEHN et ALII [14], YAGAR et ALII [15]). Un'alternativa allo smistamento monostadio è lo smistamento multistadio facendo ricorso a uno o più binari a direzioni miste nel fascio direzioni. Questo tipo di classificazione è importante quando non ci sono abbastanza binari di direzione per iniziare a comporre tutti i treni in uscita, non appena si riceve il loro primo carro. Quindi, i carri sono stazionati su uno o più binari misti specifici, in attesa del momento opportuno per iniziare a comporre i corrispondenti treni in uscita. Questi carri devono essere stati riportati al fascio arrivi almeno una volta. È un'operazione costosa, che deve essere eseguita con attenzione (BOHLIN et ALII [16], KRAFT [17]). Infine, la terza alternativa è lo smistamento multistadio con l'ordinamento dei carri. In questo caso, i carri possono essere utilizzati immediatamente per comporre il treno in uscita

management. In OptiYard the purpose is relatively novel: using simulation as a support for real-time optimisation of rail yards (fixed infrastructure conditions), and thus combining continuous micro-simulation with optimisation algorithms to provide not only KPIs after a certain time of operation, but real-time results supporting the yard dispatcher's decision-making process, all of this in interaction with outside systems representing the rail network and rolling stock fleets. In this field the literature becomes scarcer.

In fact, when it comes to optimisation suitable for real-time functionality, the existing literature almost exclusively focuses on the marshalling process (BOHLIN et al. [10], BOYSEN et al. [11], DAGANZO [12]). The marshalling process consists in affecting wagons to tracks to compose outbound trains. Indeed, in the typical yard layout, inbound trains arrive on receiving tracks, their wagons are detached and pushed to the hump to roll to classification tracks (roll-in), and the resulting outbound trains are pulled to departure tracks before joining the network.

The marshalling process concretises differently in different yards, depending on the infrastructure layout and on the occurring traffic. The goal is in general the minimization of train delays at departure. In single-stage classification, wagons are moved only once from receiving to classification tracks. Once they reach the latter, they start composing the outbound train to which they are aimed (HAAHR and LUSBY [13], JAEHN et al. [14], YAGAR et al. [15]). An alternative to single-stage classification is multi-stage classification with mixing tracks. This classification is relevant when there are not enough classification tracks to start building all outbound trains as soon as their first wagon is received. Hence, wagons are stored in one or more specific mixing tracks waiting for the appropriate moment to start building the corresponding outbound trains. These wagons need to be pulled back to the receiving tracks at least once. This is a costly operation, which needs to be performed attentively (BOHLIN et al. [16], KRAFT [17]). Finally, the third alternative is the multi-stage classification with wagon ordering. Here, wagons can be immediately used for composing the outbound train they are aimed to, but they must be placed in a specific order. Hence, it may be necessary to pull them back to the receiving tracks once or several times (SHI and ZHOU [8]).

The only study considering a wider model of yard operations, not limited to marshalling, is the one proposed by GESTRELIUS et al. [18]. The authors present a mathematical model for track allocation and roll-in timing. The authors consider a specific yard layout with mixing track, and no departure tracks. Arrivals, roll-ins, pullbacks, mixing operations and departures are all considered.

Although the last model greatly broadens the scope of the existing literature, no existing contribution considers resource allocation (e.g. locomotives and staff to a given activity) and movements that must be executed to manage a yard. Moreover, most importantly for real-time yard optimisation, the interactions with IT systems external to the

a cui sono destinati, ma devono essere inseriti in un ordine specifico. Pertanto, potrebbe essere necessario estrarli al fascio arrivi una o più volte (SHI e ZHOU [8]).

L'unico studio che considera un modello più ampio di operazioni di scalo, non limitate allo smistamento, è quello proposto da GESTRELIUS et ALII [18], che presentano un modello matematico per l'allocazione del binario e i tempi di "lancio". Gli autori prendono in considerazione uno specifico schema infrastrutturale con binario a direzioni miste e nessun binario di partenza. Nella analisi sono considerati gli arrivi, i lanci, le estrazioni, i rilanci successivi e le partenze.

Sebbene l'ultimo modello allarghi notevolmente la portata della letteratura esistente, nessun contributo noto considera l'allocazione delle risorse (ad esempio locomotive e personale ad una determinata attività) e movimenti che devono essere eseguiti per gestire uno scalo. Inoltre, generalmente non ci si rivolge alle interazioni con i sistemi informativi esterni allo scalo, di grande rilevanza per l'ottimizzazione dello scalo in tempo reale. Inoltre, non si affronta l'interazione tra modelli innovativi di ottimizzazione e modelli di scalo e di rete, così come descritto nelle parti a seguire del presente articolo.

3. Casi di studio

Due sono i casi di studio, Česká Trebová nella Repubblica Ceca e Trieste in Italia (Fig. 1), considerati ed analizzati nella trattazione, per i quali sono stati sviluppati modelli per i rispettivi scali e le reti ferroviarie collegate.

Il primo (Fig. 1, (A1) e (A2)) è uno scalo di smistamento a sella di lancio, in cui la stragrande maggioranza dei treni in arrivo è destinata al trasporto SWL e richiede lo smistamento di singoli carri o composizioni di carri. Il secondo (Fig. 1, (B1) e (B2)) è uno scalo di smistamento piano che è asservito ad un'area portuale.

Situato al centro della rete ferroviaria della Repubblica Ceca, con una capacità di smistamento fino a 1.200 carri in 24 ore, lo scalo di smistamento Česká Trebová si colloca tra le sette strutture ferroviarie chiave utilizzate da ČD Cargo, il più importante operatore ceco. L'attuale capacità di smistamento è di circa 700 carri in 24 ore (2016), di cui circa il 18% sono carri intermodali. La stazione si trova sul corridoio ferroviario ceco est-ovest più trafficato e sulla linea principale tra Praga e Slovacchia, con una tratta per Brno e Vienna. Česká Trebová ha la topologia di smistamento ferroviario più conveniente, comprendente fascio arrivi, sella di lancio, fascio direzioni e fascio partenza. La stazione gestisce attualmente circa 30 destinazioni nazionali e internazionali, tra cui Engelsdorf (Germania), Vienna (Austria), Bratislava/Žilina (Slovacchia) e Wrocław (Polonia).

Il fascio direzioni è costituito da 38 binari con lunghezza fino a 1.000 metri, suddivisi in 5 gruppi, ciascuno dotato di 3 serie di rallentatori pneumatici (fino all'arresto finale) in modo che non siano necessari manovratori

yard are not generally addressed. Also, the interaction between innovative optimisation and the state-of-the-art yard and network models described in the subsequent sections of the paper is not addressed.

3. Case studies

Two case studies - Česká Trebová in the Czech Republic and Trieste in Italy (Fig. 1) - have been addressed in this study and models have been developed for the respective yards and surrounding networks. The former is a hump marshalling yard in which the vast majority of incoming trains are for SWL transport and require single wagons or groups of wagons to be sorted. The latter is a flat shunting yard serving a port area.

Situated in the centre of the Czech Republic rail network and with a marshalling capacity of up to 1,200 wagons in 24 hours, the marshalling yard Česká Trebová ranks among the seven key railway facilities utilized by ČD Cargo, the largest Czech operator. The current average marshalling throughput is around 700 wagons in 24 hours (2016), some 18% of which are intermodal wagons. The station is located on the busiest main Czech railway corridor East-West and on the main line between Prague and Slovakia with a section to Brno and Vienna. Česká Trebová has the most convenient railway marshalling topology, i.e. the entry yard, hump, classification yard and departure yard. The station currently operates about 30 domestic and international destinations, including Engelsdorf (Germany), Vienna (Austria), Bratislava/Žilina (Slovakia) and Wrocław (Poland).

Česká Trebová is designed with 38 sorting tracks (with a length of up to 1,000 meters), divided into 5 clusters, each equipped with 3 series of pneumatic retarders (up to final fine-braking) so that no shunters are necessary in the classification yard except for the couplers. The arrival yard is made up of 13 tracks with lengths of up to 900 meters and the departure yard consists of 15 tracks with a maximum length of 850 meters.

Typical optimisation decisions that are made by the dispatcher regard, in normal operation, the order of humping so as to minimise deviations on the schedule of departing trains or consideration of priority freight, and in disrupted situations the tactics needed to obtain maximum throughput.

The port of Trieste is served by the Campo Marzio rail yard. It is a flat shunting yard that handles around 8,000 trains per year (2018) of which around 25% are conventional SWL (essentially steel products coming from the Servola works, where a dedicated yard was reopened in 2016). The majority of trains are intermodal (mostly semi-trailers and containers exchanged with the vessels using the port facilities), travelling along the Baltic-Adriatic corridor with frequent connections to Austria through Tarvisio with 80 trains per week, and a few connections with Slovenia through Villa Opicina. The operator Adriafer, subsidiary of



Figura 1 - Reti ferroviarie che circondano gli scali di studio, Repubblica Ceca (A1) ed (A2) ed Italia (B1) e (B2).
 Figure 1 - Rail networks surrounding the case-study yards, Czech Republic (A1) and (A2) Italy (B1) and (B2).

nel fascio, fatta eccezione per gli addetti all'unione dei veicoli. Il fascio arrivi è composto da 13 binari, con lunghezze fino a 900 metri, mentre il fascio partenze possiede 15 binari, con una lunghezza massima di 850 metri.

Le tipiche decisioni di ottimizzazione, prese dal dirigente durante il normale esercizio, riguardano la gestione di manovre di lancio in modo da minimizzare le perturbazioni nel programma di partenza dei treni o la considerazione del trasporto merci prioritario, e in situazioni fortemente perturbate le strategie necessarie per sfruttare al massimo la capacità dell'impianto.

Il porto di Trieste (Fig. 1, (B1) e (B2)) è servito dallo scalo ferroviario di Campo Marzio. Si tratta di uno scalo di smistamento in piano che gestisce circa 8.000 treni all'anno (2018), di cui circa il 25% sono convenzionali a carro completo (essenzialmente prodotti in acciaio provenienti dalle attività di Servola, dove un fascio di binari dedicato è stato riaperto nel 2016). La maggior parte dei treni è inter-

Port of Trieste authority, performs the last mile operations in the region of Trieste (Campo Marzio – Villa Opicina, Monfalcone, Aquilinia).

The three port terminals see the arrival of vessels delivering the intermodal units to be loaded onto the wagon consists. Due to the limited length of the tracks in the terminals, the wagon consists corresponding to a whole train (550 m maximum length) often have to be split in half in order to be accommodated, and the two halves have to be joined together again with the shunting locos to form a departing train on one of the 6 tracks of 750 m length, after an eventual wait on dedicated sidings. 2 locomotives are available for the shunting operations and 2 Zephyr railroad engines have been recently purchased to increase the efficiency of the operations and to enable a better use of existing tracks. For a flat yard, this is a relatively complex case in term of layout, variety of traffic, tight space conditions and rapidly growing activity and thus offers interest-

modale (per lo più semirimorchi e container scambiati con le navi che utilizzano le strutture portuali): viaggiano lungo il corridoio Baltico-Adriatico con collegamenti frequenti con l'Austria attraverso Tarvisio ad una media di 80 treni a settimana e alcuni collegamenti con la Slovenia attraverso Villa Opicina. L'operatore Adriafer, controllata dall'autorità portuale di Trieste, esegue le attività "dell'ultimo miglio" nella regione di Trieste (Campo Marzio - Villa Opicina, Monfalcone, Aquilinia).

I tre terminali portuali vedono l'arrivo delle navi che consegnano le unità intermodali da caricare sul carro. A causa della lunghezza limitata dei binari nei terminali, la composizione, che costituisce un intero treno (lunghezza massima di 550 m) spesso deve essere divisa a metà per poi devono essere nuovamente unite con le locomotive di manovra per formare un treno in partenza su uno dei 6 binari della lunghezza di 750 m, dopo un'eventuale attesa su binari dedicati. Sono disponibili 2 locomotive per le operazioni di smistamento. Inoltre 2 locotrattori Zephyr sono stati recentemente acquistati per aumentare l'efficienza delle operazioni e consentire un migliore utilizzo dei binari esistenti. Per un impianto in piano, questo è un caso relativamente complesso in termini di piano schematico, di variabilità del traffico, per condizioni di spazio ristretto e per attività in rapida crescita e offre quindi interessanti possibilità di ottimizzazione. Le decisioni di ottimizzazione tipiche sono l'assegnazione del personale alle locomotive, l'assegnazione delle locomotive e dei locotrattori alle colonne di carri e ai treni, l'ordine di effettuazione delle manovre considerando le variazioni dei tempi di arrivo dei treni e delle navi, nonché la gestione di carenza di risorse (indisponibilità di locomotive/binario/personale) e le interruzioni della rete ferroviaria di collegamento esterno. Queste ultime decisioni devono anche considerare che i terminali portuali sono gestiti da diverse compagnie concorrenti. Tale situazione costituisce un problema che l'operatore deve risolvere nell'operatività quotidiana, oggi basandosi interamente sulla esperienza e sulla intuizione.

4. Panoramica dei modelli

I modelli di simulazione e ottimizzazione, sviluppati in OptiYard, sono progettati per interagire, al fine di produrre proposte di ottimizzazione per il responsabile dei movimenti di manovra, come base per un SSD. L'SSD utilizzerà essenzialmente un algoritmo di ottimizzazione definito nell'ambito del progetto. Periodicamente l'algoritmo, sulla base della situazione osservata, genera previsioni future per diverse ore e lavora su un modello di scalo semplificato per identificare il modo migliore di gestire le attività dello scalo. L'algoritmo suggerisce decisioni e le comunica al simulatore che agisce da scalo virtuale. Se si verifica una perturbazione, il simulatore comunica all'algoritmo le condizioni operative aggiornate, che diventano la base per le ottimizzazioni future. Sono previsti un ulteriore modello di micro-simulazione della rete

ing optimisation possibilities. Typical optimisation decisions are the assignment of staff to locos, the assignment of locos and rail-road engines to consist and trains, the order in which consists and trains should be shunted considering the variations of train and vessel arrival times, as well as management of resource shortages (loco/track/staff unavailability) and disruptions on the surrounding network. The latter decisions must consider that different competing companies operate the port terminals. This is the problem that the operator needs to solve in daily operation, nowadays entirely based on experience and intuition.

4. Overview of the models

The simulation and optimisation models developed in OptiYard are designed to interact in a view to produce optimisation proposals for the yard dispatcher, as the basis for a Decision Support System (DSS). The DSS will essentially use an optimisation algorithm designed within the project. Periodically, the algorithm looks several hours into the future and works on a simplified yard model to identify the best way for managing yard operations given the observed situation. This algorithm makes decisions and communicates them to the simulator that plays the role of a real yard. If a perturbation occurs, the simulator communicates to the algorithm the updated operational conditions, which become the basis for the forthcoming optimisations. A further micro-simulation model of the surrounding network and the interaction with the IT systems of infrastructure manager and operators are foreseen in order to consider the state of the surrounding network in perturbation detection and path availability. The proposed DSS can in principle be deployed as a completely automated operations management system. However, yard dispatchers can be directly involved in the decision-making process. For example, the dispatcher may receive a set of options that are pre-assessed in terms of technical feasibility and respect of pre-defined priorities such as those linked to the treatment of dangerous or priority goods. The dispatcher can be expected to make a final assessment particularly regarding non-technical issues such as competition and other priorities. Indeed, by exploiting the proposed DSS, the dispatcher's decisions are expected to be optimised and less dependent on the person's experience and psychological conditions than they may be today.

Fig. 2 summarises the interactions of the models developed in OptiYard. The interacting models are three for each case study: two microscopic models of yard and surrounding network and one model implementing the optimisation algorithm. They are developed on the basis of data obtained from the yard managers and from public sources of network information. In OptiYard, the optimisation and microsimulation models were implemented as software. The interactions between the optimisation and yard models were pioneered as described in this paper. The interactions

ferroviaria circostante e l'interazione con i sistemi informativi del gestore dell'infrastruttura e delle imprese ferroviarie, in maniera da poter considerare lo stato della rete circostante nel rilevamento delle perturbazioni e nella disponibilità delle tracce orarie. L'SSD proposto può, in linea di principio, essere implementato come un sistema di gestione delle attività completamente automatizzato. Tuttavia, i responsabili movimento possono essere direttamente coinvolti nel processo decisionale. Ad esempio, il responsabile movimento può ricevere una serie di opzioni che sono pre-valutate, in termini di fattibilità tecnica e rispetto di priorità predefinite, come quelle legate al trattamento delle merci pericolose o prioritarie. È previsto che il responsabile possa effettuare la valutazione finale considerando, in particolare le problematiche non tecniche, come la concorrenza od altre priorità. Sfruttando l'SSD proposto, le decisioni del responsabile movimento dovrebbero essere ottimizzate e meno dipendenti dall'esperienza della persona e dai condizionamenti psicologici, di quanto possano essere oggi.

Le interazioni dei modelli, sviluppati in OptiYard, sono state rappresentate in uno schema a blocchi (Fig. 2). I modelli interagenti sono tre per ogni caso di studio: due modelli microscopici di scalo e rete ferroviaria circostante e un modello che implementa l'algoritmo di ottimizzazione. Tutti sono sviluppati sulla base dei dati ottenuti dai gestori dello scalo e da fonti pubbliche di informazioni relative alla rete.

In OptiYard, i modelli di ottimizzazione e micro-simulazione sono state implementate come software. Le interazioni tra i modelli di ottimizzazione e scalo secondo quanto descritto in questa memoria. Sono state sviluppate invece in forma concettuale le interazioni con il modello di rete e con i sistemi esterni.

Sebbene gli output del futuro SSD siano indirizzati principalmente al gestore dello scalo, si prevede anche che forniscano informazioni al gestore dell'infrastruttura della rete ferroviaria, in termini di tempi previsti per avere il treno pronto e richieste di avere il treno pronto, attingendo ad informazioni tratte dai gestori dell'infrastruttura e dalle imprese ferroviarie. Attraverso queste interazioni l'SSD può quindi anche contribuire all'ottimizzazione dell'esercizio sulla rete in senso più ampio.

L'SSD OptiYard quindi ha lo scopo di integrare e ricevere input dai sistemi informativi eventualmente esistenti (e oggi sempre più sviluppati) che il gestore dello scalo può utilizzare per monitorare lo stato delle attività tramite, ad esempio, una rete di sensori, di portali oppure per immissione manuale dei dati. L'SSD OptiYard è inoltre concepito per attingere input dai sistemi informativi che

with the network model and with external systems were conceptualised, as also described briefly.

Although the outputs of the future DSS are directed mainly to the yard manager, they are also expected to provide information to the network infrastructure manager, in terms of expected times for trains to be ready and train path requests, and obtain information from infrastructure managers and operators. Through these interactions the DSS can thus also contribute to the optimisation of operations on the wider network.

The OptiYard DSS is intended to complement and receive input from the eventually existing (and nowadays increasingly developed) IT systems that the yard manager may use to monitor the state of the yard via e.g. a sensor network, portals, or manual data input. The OptiYard DSS is also conceived to draw input from the IT systems representing railway network status for timing data and train composition data. The target for this issue is full compatibility with RailNetEurope's Train Information System (TIS), along with the legacy IT systems of the infrastructure manager, as well as with the Telematics Applications for Freight Technical Specification for Interoperability (TAF TSI). Moreover data from wagon tracking & tracing systems, such as ISR (International Service Reliability) developed by the RailData group within UIC may be used as input.

In the current design and implementation, the outputs are produced by the optimisation model, with the virtual yard model validating results through micro-simulation and contributing to the representation of results and calculation of Key Performance Indicators (KPI). For the purposes of optimisation, the network micro-simulation model delivers (at the moment conceptually) Expected Times of Arrival (ETAs) of trains at the yard's home signals with higher accuracy than available from the network's IT systems. For departing trains, it determines the foreseeably available train paths. The DSS is capable also

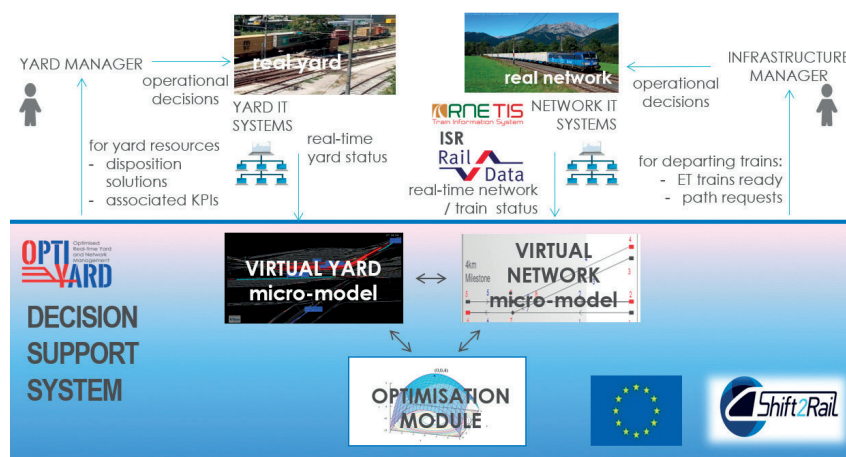


Figura 2 - Panoramica delle interazioni tra modelli e con sistemi IT esterni.
Figure 2 - Overview of the interactions between models and with external IT systems.

rappresentano lo stato funzionale della rete ferroviaria per quanto riguarda l'orario effettivo e i dati di composizione del treno. L'obiettivo di questa funzionalità è la piena compatibilità con il TIS di RailNetEurope, insieme ai sistemi informativi pre-esistenti del gestore dell'infrastruttura e alle STI relative alle Applicazioni Telematiche per Treno Merci (STI ATTM). Inoltre, come input, possono essere utilizzati i dati provenienti dai sistemi di tracciamento e localizzazione dei carri, come l'ISR, sviluppato dal gruppo RailData all'interno dell'UIC.

Nella progettazione e nell'implementazione attuali, i risultati sono prodotti dal modello di ottimizzazione, con il modello di scalo virtuale che convalida i risultati attraverso la micro-simulazione e contribuisce alla rappresentazione dei risultati e al calcolo degli KPI. Ai fini dell'ottimizzazione, il modello di micro-simulazione della rete fornisce (al momento in modo concettuale) i tempi di arrivo previsti (ETA) dei treni ai segnali di protezione dello scalo, con una precisione maggiore rispetto a quella disponibile dai sistemi informativi della rete. Per i treni in partenza, il processo determina le tracce orarie prevedibilmente disponibili. L'SSD è anche in grado di fornire gli orari previsti in cui un determinato treno sarà pronto per la partenza e suggerire quando sono necessarie richieste di nuove tracce.

5. Il micro-simulatore dello scalo virtuale

Per il progetto OptiYard, è stato selezionato il codice di calcolo all'avanguardia Villon [19], fornito da Simcon, come nucleo del framework di simulazione. Questo strumento è stato utilizzato per creare modelli di simulazione flessibili degli scali selezionati a Česká Trebová e a Trieste. Villon è stato ulteriormente adattato e la sua funzionalità è stata estesa al fine di supportare lo scambio di dati in tempo reale con lo sviluppato modulo di ottimizzazione.

Villon è uno strumento di simulazione generico, che consente la micro-simulazione di vari tipi di terminali logistici di trasporto contenenti infrastrutture ferroviarie e stradali come scali di smistamento (Fig. 3), stazioni ferroviarie passeggeri, fabbriche, centri manutenzione del materiale rotabile, depositi, aeroporti. Lo strumento di simulazione Villon si basa sull'architettura flessibile di simulazione *agent-oriented* ABAsim (una descrizione dettagliata delle sue proprietà è disponibile in KAVIČKA et al. [20]) e consente l'estensione immediata della sua funzionalità e la interazione con altri moduli software (ad es. modulo per la rete ferroviaria o modulo per l'ottimizzazione in OptiYard).

of providing expected times at which a given train will be ready for departure and suggesting when path requests are necessary.

5. The virtual yard micro-model

For the project OptiYard the state-of-the-art simulation tool Villon (Simcon, [19]), provided by Simcon, was selected as the core of the simulation framework. This tool was utilised to create flexible simulation models of the selected yards in Česká Trebová and Trieste. Villon has further been adjusted and its functionality has been extended in order to support real-time data exchange with the developed optimisation module.

Villon is a generic simulation tool, which allows microscopic modelling of various types of transportation logistics terminals containing railway and road infrastructures (e.g. marshalling yards see Fig. 3, railway passenger stations, factories, train care centres, depots, airports, etc.). The simulation tool Villon is based on the flexible agent-oriented simulation architecture ABAsim (detailed description of its properties can be found in KAVIČKA et al. [20]), which enables trouble-free extension of its functionality as well as cooperation with other software modules (e.g. railway network module or optimisation module in OptiYard).

In Villon, the modelled system (e.g. railway yard or container terminal) is considered as a service (queueing) system, composed of three subsystems, with specific roles in the system: resource subsystem, client subsystem and control subsystem. For example, in a rail yard the "client" may be a train, served by resources (locomotives, staff, tracks)

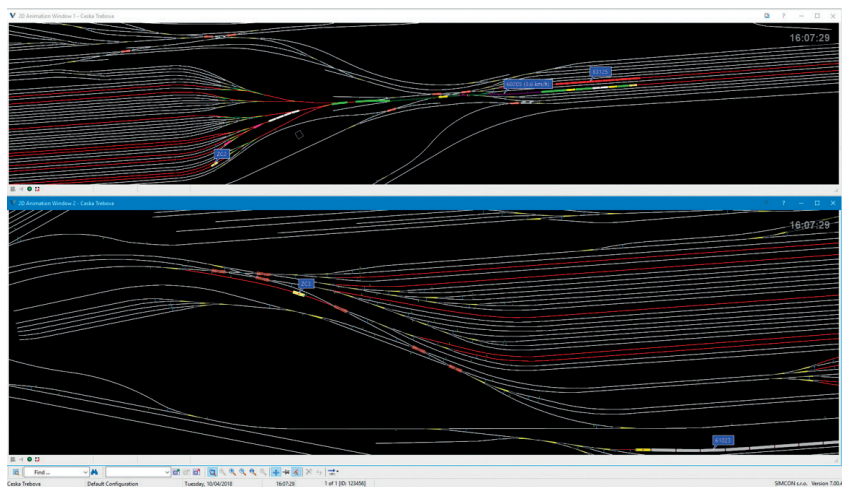


Figura 3 - Animazione di processi modellati durante la simulazione dello scalo di smistamento di Česká Trebová.

Figure 3 - Animation of modelled processes during simulation of the Česká Trebová marshalling yard.

In Villon, il modello del sistema (ad es. scalo ferroviario o terminal container) è considerato un sistema di servizio (di accodamento), composto da tre sottosistemi, con ruoli specifici nel sistema: sottosistema risorse, sottosistema client e sottosistema di controllo. Ad esempio, in uno scalo ferroviario il “cliente” può essere un treno, servito da risorse (locomotive, personale, binari) seguendo le procedure stabilite (controlli), ad esempio accoppiamento/disaccoppiamento con locomotiva, prova freno ed altro. Il disaccoppiamento è tradotto in diagrammi di flusso che rappresentano tutte le possibili attività rivolte al “cliente” specifico. Un esempio (Fig. 4) illustra la ricomposizione di gruppi di carri per formare un treno misto su un binario del fascio direzioni di un impianto di smistamento per gravità.

In base al tipo di scalo, sono richiesti dati specifici per la costruzione del modello. Tuttavia, entrambi i modelli di simulazione riferiti ai casi di studio condividono importanti categorie di dati che devono essere definiti, riflettendo componenti, processi ed enti dello scalo/terminale, vale a dire:

- schema infrastrutturale/modello di infrastruttura basato su dati in scala tratti da disegni CAD;
- personale di lavoro (manovratori, verificatori, addetti alla raccolta dati);
- risorse tecniche mobili (locomotive di manovra);
- processi di scalo (regole per lo smistamento, scarico/carico, parcheggio);
- procedure per ricevimento/smistamento/formazione dei treni sotto forma di diagrammi a blocchi;
- sequenza dei treni in ingresso (in transito o a fine corsa).

L'esecuzione di un ciclo di simulazione viene presentata utilizzando l'animazione e la visualizzazione in diretta, per supportarne il processo di convalida e valutazione. Dopo l'esecuzione della simulazione, è disponibile un ampio set di valutazioni in post-processing, basate su protocolli dettagliati e registrati durante l'esecuzione stessa. Oltre alla presentazione grafica dei risultati della simulazione, utilizzando report sull'utilizzo delle risorse, i tempi di attesa, ed altri in funzione del tempo, vengono anche fornite valutazioni statistiche, sotto forma di tabelle, grafici e diagrammi (comprese ad esempio le statistiche sull'utilizzo delle risorse).

Per i casi di studio OptiYard, la creazione e la validazione di entrambi i modelli dipendevano dai dati forniti dall'attività reale. I dati, i processi e le decisioni non documentati non sono stati modellati o sono state fatte ipotesi di buona pratica. Sulla base

following established procedures (controls), e.g. couple/un-couple loco, brake test etc., the latter being translated into flowcharts representing all the possible activities addressing the specific “client” (see e.g. Fig. 4 illustrating the regrouping of wagons to form a group train on a sorting track of hump marshalling yard).

Depending on the type of yard model, specific data for model building are required. However, both case-study simulation models share important data categories that need to be defined, reflecting the respective parts, processes and entities of the yard/terminal, namely:

- track layout/infrastructure model based on data in scale from CAD-drawings;
- working personnel (shunters, examiners, data collectors);
- mobile technical resources (shunting locomotives);
- yard processes (rules for sorting, un-/loading, parking);
- train handling/sorting/forming procedures in the form of flowcharts;
- input train flow (transiting and terminating trains).

The execution of a simulation run is presented using run-time animation and visualisation in order to support the validation and evaluation process of simulation runs. After the simulation run, an extensive set of post simulation evaluations is at hand – these are based on detailed simulation protocols recorded during the simulation run. Besides graphical presentation of simulation results using time dependent reports on utilisation of resources, waiting times, etc.; statistical evaluations are also provided – in the form of tables, graphs and charts (including resource utilisation statistics and many others).

For the OptiYard case studies, the creation and validation of both models depended on the provided data from real operation. Undocumented data, processes and decisions were either not modelled or reasonable assumptions were

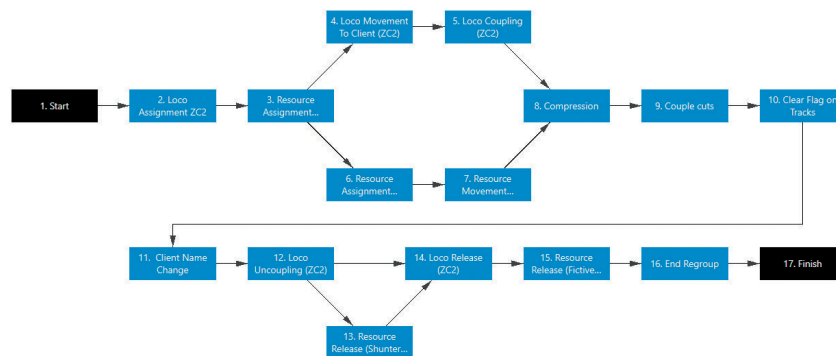


Figura 4 - Esempio di diagramma di flusso Villon (gruppo di carri a formare un treno in uno scalo di smistamento con sella di lancio).

Figure 4 - Example of a Villon flowchart (regrouping of wagons to form a group train in a hump marshalling yard).

del confronto dei risultati della simulazione, per una settimana di reale esercizio, e degli scambi con i gestori dello scalo, i modelli creati sono stati considerati validati.

L'obiettivo principale della modellazione in entrambi i casi è stato quello di raggiungere lo stesso orario di partenza dei treni dal sistema, come durante il funzionamento reale. Alcuni processi, interni agli impianti modellati, sono realizzati in modo leggermente diverso o sono stati semplificati (gestione dei carri danneggiati o restrizioni sull'uso della sella di lancio per i carri già nello scalo).

I risultati di convalida dei modelli hanno tuttavia mostrato differenze rispetto alla realtà in alcune situazioni, ad esempio nell'ordine di smistamento dei treni nel modello di scalo dello Česká Třebová. Ciò è stato attribuito principalmente alla mancata conoscenza delle motivazioni delle decisioni intraprese dal responsabile movimento in merito allo smistamento dei treni. Un effetto collaterale di questa difformità è un diverso numero di carri che partono dallo scalo di smistamento, come treni in uscita, tra modello e in realtà (alcuni carri sono stati smistati prima, altri più tardi). Si sottolinea ulteriormente il fatto che le decisioni di distribuzione probabilmente non sono sempre basate su considerazioni puramente tecniche ed orientate ad ottenere la massima efficienza.

Nel modello di Trieste sono stati rispettati i tempi reali d'inizio e fine manovra da/per il porto. Dopo il processo di trasbordo sulle banchine, il secondo processo che richiede più tempo è la manovra dei carri all'interno del porto (a causa della bassa velocità massima).

Al fine di indagare sul funzionamento "non standard" dello scalo, sono stati preparati altri scenari di simulazione. Il modello, convalidato dal confronto con i dati di un esercizio di una settimana reale, è stato utilizzato per implementare scenari con smistamento della locomotiva di manovra fuori servizio, un binario fuori servizio, treni in ritardo all'arrivo e treni aggiuntivi. In questo modo è stata testata la possibilità di fornire diverse soluzioni in breve tempo (funzionalità in tempo reale).

I modelli di micro-simulazione dello scalo hanno due ruoli importanti all'interno del progetto. In primo luogo, durante la fase di ricerca, è stata necessaria una sostituzione dello scalo reale, per alimentare il modulo di ottimizzazione, con uno stato attuale dello scalo e gli ultimi cambiamenti di esercizio. Il secondo scopo del modello di simulazione, appartenente al concetto di SSD, è di disporre di una piattaforma di validazione per il modulo di ottimizzazione in grado di valutare e confrontare le conseguenze delle diverse decisioni fornite.

6. Il micro-simulatore di rete virtuale

Il modello di rete, adottato per il progetto OptiYard, si basa sul modello di micro-simulazione TrackULA (Track Unified simulation Algorithm) all'avanguardia, sviluppato dall'Università di Leeds (LIU et al. [21], [22]). Le funzioni principali del TrackULA includono:

made. Despite this fact, based on the comparison of simulation results for a real week of operation and discussion with the yard managers, the created models were considered as validated.

The main goal of modelling in both cases was to reach the same departure time of trains from the system as in real operation. Some processes inside the modelled yards are realised slightly differently or were simplified (handling of damaged wagons or hump restrictions for wagons in marshalling yard).

The model validation results however showed differences from reality in some situations, e.g. the order of train sorting over the hump in the yard model of Česká Třebová. This is mainly due to the fact that the reasons for the dispatcher's decisions about the sorting order of trains are unknown. A side-effect of this is a different number of wagons leaving the marshalling yard in outbound trains between model and in reality – some wagons were sorted sooner, some later. This further stresses the fact that dispatching decisions are probably not always based on purely technical considerations for maximum efficiency.

In the Trieste model the real start and finish times of shunting to/from port were respected. After the transloading process on the quays, the second most time-consuming process is the shunting of wagons within the port (due low maximal speed).

In order to investigate non-standard operation of the yard, additional simulation scenarios were prepared. The model validated by comparison with data from a real week's operation was used to implement scenarios with shunting locomotive out of order, track out of order, delayed trains on arrival and additional trains. In this way the possibility of delivering several solutions in a short time (real-time functionality) was tested.

The yard micro-simulation models have two important roles within the project. Firstly, a replacement of the real yard was needed during the research phase to feed the optimisation module with a current state of yard and the latest changes in operation. The second purpose of the simulation model, which remains in the concept of the DSS, is a validation platform for the optimisation module to be able to evaluate and compare consequences of different decisions provided.

6. The virtual network micro-model

The network model developed for the OptiYard project is based on the state-of-the-art TrackULA (Track Unified simulation Algorithm) micro-simulation model developed by the University of Leeds (LIU et al. [21], [22]). The core functions of TrackULA include:

- *simulation loop based on fixed time increments;*
- *railway network representation;*
- *railway timetable and train route representations;*

SCIENZA E TECNICA

- ciclo di simulazione basato su incrementi di tempo fissi;
- rappresentazione della rete ferroviaria;
- rappresentazione degli orari e degli itinerari;
- rappresentazioni del comportamento del treno e del conducente;
- simulazione del movimento del treno;
- simulazione comando controllo;
- risultati di simulazioni.

TrackULA è un modulo di simulazione microscopica che rappresenta il movimento di singoli treni. Si tratta di una simulazione a tempo discretizzato, in cui lo stato del treno è aggiornato a un intervallo di tempo fisso. Il codice può modellare i tempi di viaggio stocastici (in contrapposizione a tempi deterministici e programmati) e le interruzioni. Consente inoltre l'utilizzo di caratteristiche eterogenee per il treno, per il funzionamento del treno e per il comportamento del macchinista, nonché per variazioni dell'esperienza del conducente e del comportamento alla guida con una definita distribuzione di probabilità.

La rete è descritta come un grafo, con nodi che rappresentano la stazione punti di bivio/attraversamento e con archi che rappresentano i binari. Questa è una rappresentazione macroscopica dell'infrastruttura, tipica di quella utilizzata per l'analisi dell'orario di esercizio. Sono riportate anche le pendenze dei binari per definire la loro influenza sulle velocità di marcia del treno. Una rappresentazione tal quale è stata realizzata graficamente per la rete collegata allo Scalo di Trieste (Fig. 5).

TrackULA è un modello di micro-simulazione, perché simula i movimenti di singoli treni attraverso una rete, basandosi su un modello di "treno accodato" e sul sistema di segnalamento. Più specificatamente, calcola l'acce-

- *train and driver behaviour representations;*
- *train movement simulation;*
- *control command simulation;*
- *simulation outputs.*

TrackULA is a microscopic simulation model which represents the movement of individual trains. It is based on discrete-time simulation where the train status is updated at a fixed time interval. It can model stochastic travel times (as opposed to deterministic, scheduled times) and disruption. It also allows heterogeneous train characteristics, train operating and train drivers' behaviour, as well as variations in drivers' experience and driving behaviour with a given probability distribution.

The network is described as a graph, with nodes representing the station and merging/diversion/crossing points, the links representing the tracks connecting nodes. This is a macroscopic representation of the infrastructure, typical of that for timetabling analysis. The track gradients are represented to model their impact on train running speeds. The graph representation of the surrounding network to the Trieste yard is shown in Fig. 5.

TrackULA is a micro-simulation model because it simulates the movements of individual trains through a network, based on a 'train-following' model and the control-command of the signalling systems modelled. More specifically, it calculates the acceleration, speed and position of each train at every time interval, with given acceleration/deceleration profiles whose values are sourced from the literature and in consultation with the railway industry. Different signalling systems, ranging from fixed-block, to ETCS Level 2 and Level 3, are modelled in TrackULA.

The model outputs each individual train's second-by-second space-time trajectories as well as route/line-based and network-wide statistics. As a result of the stochastic

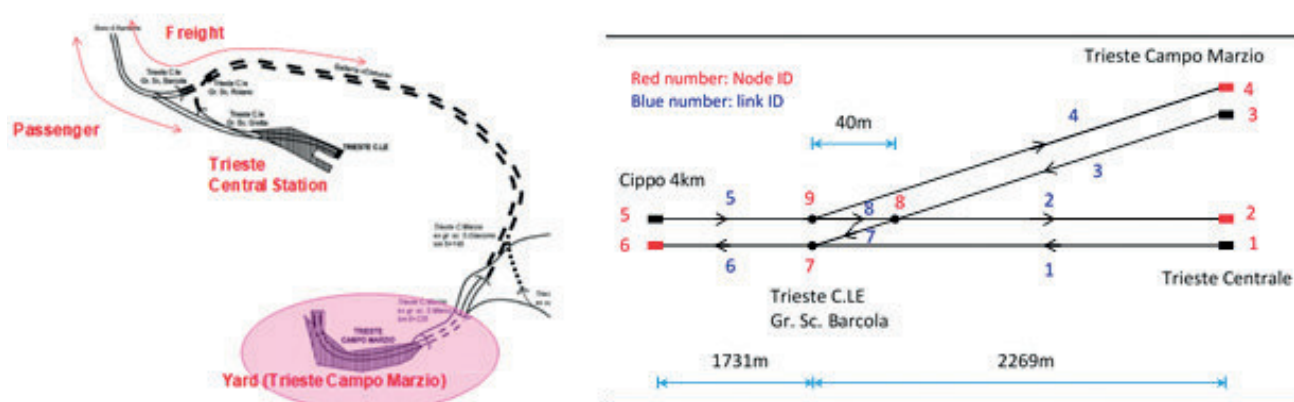


Figura 5 - Layout infrastrutturale del modello di rete di Trieste: (a) la rete circostante considerata; (b) la relativa rappresentazione grafica nel modello di rete.

Figure 5 - Infrastructure layout of Trieste network model: (a) the surrounding network considered; and (b) its graph representation in the network model.

lerazione, la velocità e la posizione di ciascun treno ad ogni intervallo di tempo, avendo impostato determinati “profili” di accelerazione/decelerazione, i cui valori provengono dalla letteratura e in consultazione dall’industria ferroviaria. Diversi sistemi di segnalamento, che vanno dal blocco fisso al livello 2 ed al livello 3 ETCS, sono modellizzati in TrackULA.

Il modello calcola leggi del moto spazio-temporali, secondo per secondo, di ciascun treno, nonché statistiche basate sul percorso/linea e su tutta la rete. Come risultato della modellazione stocastica, i risultati di simulazione includono non solo i valori medi ma anche le varianze e le distribuzioni di probabilità come misura delle prestazioni.

Per il modello di rete virtuale di Trieste, la descrizione della rete include gli archi della rete, le posizioni d’inizio e fine arco (e la lunghezza dell’arco) e la pendenza dell’arco, nonché quattro diversi ranghi di velocità: A comprende i treni merci, B i treni regionali, C i treni Inter City, mentre P viene utilizzato per i treni a pendolamento, utilizzati per alcuni collegamenti ad alta velocità.

In OptiYard, la simulazione è stata condotta considerando come input gli orari dei treni viaggiatori in un tipico giorno feriale insistenti sulla stazione di Trieste Centrale (stazione viaggiatori di testa) e gli orari dei treni merci da/per Campo Marzio (lo scalo). È stata valutata la funzionalità in tempo reale per questo tipo di software. La Fig. 6 mostra le tracce orarie simulate dei treni in uscita: le linee rosse sono per i treni merci, mentre quelle blu per i treni passeggeri.

Nella stessa figura si può anche osservare che ci sono periodi del giorno in cui la rete risulta molto congestionata (con tracce dei treni a densità elevata), coinvolgendo spesso sia treni passeggeri che treni merci. Sono evidenziati alcuni di questi periodi di congestione nei quali per esempio appaiono ritardi per i treni passeggeri, a causa di un treno merci lento che in precedenza.

In altre ore del giorno, ci sono ampi intervalli di tempo tra tracce consecutive, come tra le 10:00 e le 12:00. I risultati mostrano che esiste un potenziale di miglioramento per garantire il miglior utilizzo della capacità della rete e per ridurre i conflitti tra treni merci e treni passeggeri.

7. Modulo di ottimizzazione

Il modulo di ottimizzazione consiste nell’implementazione di un algoritmo di ottimizzazione e nell’interfaccia per comunicare con micro-simulatore (implementato in OptiYard solo con il simulatore dello scalo).

L’algoritmo di ottimizzazione, in questione è il primo ad apparire in

modelling, the simulation outputs include not only the means but also the variances and probability distributions of performance measures.

For the virtual network model of Trieste, the network description includes the link locations on the network, link start and end locations (and link length), and gradient of the link, as well as four different speed limits on the link for four different train types: A represents freight trains, B regional trains, C Inter City trains, while P is used for tilting trains that are used for some high speed connections.

In OptiYard, simulation was conducted with the input timetables for a typical weekday passenger trains to/from Trieste Central (the passenger terminal station), and timetables for freight trains to/from Campo Marzio (the Yard). The possibility to achieve the real-time functionality for this type of software was assessed. Fig. 6 shows the simulated trajectories of the outbound trains. The red lines are for freight trains, while blue ones the passenger trains.

It can be seen in Fig. 6 that there are periods during the day when it was very congested on the network (with densely packed train trajectories), often involving both passenger trains and freight trains. Some of these congested periods are highlighted, and in one such example (shown in small box), there appears to be some delays to the passenger trains due to a slow freight train ahead.

Whilst during other times of the day, there are large time gaps in the train trajectories, such as between 10:00 – 12:00. The results illustrate that there is potential for improvement to ensure the best use of network capacity and to reduce conflicts between freight and passenger trains.

7. The optimisation module

The optimisation module consists of the implementation of an optimisation algorithm as well as the interface to

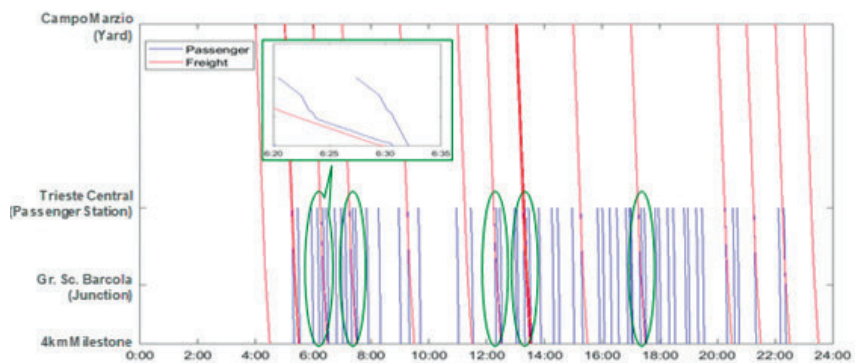


Figura 6 - Tracce orarie simulate del treno con ingrandimento di un tipico conflitto di circolazione tra passeggeri e merci.

Figure 6 - The simulated train trajectories with zoom of a typical conflict between passenger and freight train paths.

letteratura è in grado di gestire tutti i processi e movimenti che si svolgono in uno scalo. L'algoritmo può gestire operazioni su carro singolo e treno a composizione bloccata senza distinzioni. Nello specifico, come per il micro-simulatore di scalo, tutte le relative attività sono organizzate in diagrammi di flusso. Ciascun nodo in questi diagrammi di flusso corrisponde a un'attività, inclusa, ad esempio, l'assegnazione di una risorsa alla specifica attività. lo spostamento di questa risorsa fino alla posizione di esecuzione l'esecuzione effettiva (cfr. Fig. 4). Diagrammi di flusso specifici sono associati ai treni in entrata e in uscita. L'algoritmo di ottimizzazione proposto nell'ambito del progetto OptiYard elabora, in sequenza, ciascun nodo di ognuno di questi diagrammi di flusso. Alcune delle attività, rappresentate dai nodi, richiedono l'allocazione di una risorsa, sia essa una locomotiva, un agente o un binario. In questo caso, l'algoritmo sceglie la risorsa specifica da assegnare, nel caso siano disponibili diverse alternative. Inoltre, alcune attività richiedono l'esecuzione di un movimento, sia essa di una locomotiva di manovra, di un carro o di un treno. In questo caso, l'algoritmo sceglie l'itinerario specifico (sequenza di binari) lungo il quale deve essere eseguita la movimentazione.

Seguendo la letteratura relativa alla ricerca operativa e all'intelligenza artificiale, data la complessità del problema in esame, viene proposto un algoritmo stocastico o un algoritmo di tipo "greedy" ("avid", "aggressivo"). Questo tipo di algoritmi esplora lo spazio di ricerca del problema grazie a un elemento casuale. In genere il processo è combinato con una ricerca locale, al fine di valutare l'intorno delle soluzioni analizzate, per migliorare la loro qualità, dando forma ad una procedura aggressiva di ricerca adattiva randomizzata (GRASP). Esempi di questo tipo di algoritmi sono la cosiddetta meta-euristica, che spesso si ispira ai processi naturali.

In pratica, nell'algoritmo proposto, le soluzioni sono costruite in modo incrementale. Ad ogni passo, a partire dallo stato corrente del sistema, che corrisponde a un nodo nel diagramma di flusso delle attività dei treni presenti e previsti, l'algoritmo sceglie casualmente l'attività successiva da trattare, considerando tutti i possibili nodi successivi. Quindi, se l'attività richiede una risorsa e quindi un itinerario per eseguire la movimentazione, essa viene selezionata casualmente tra le possibilità esistenti. Per la pianificazione di queste risorse e movimenti, sono identificate possibili finestre temporali, fissandole con il vincolo del tempo minimo e considerando gli altri vincoli, imposti dalle assegnazioni effettuate precedentemente. Poiché le attività successive sono incluse nella soluzione, possono essere applicati ulteriori vincoli alle assegnazioni precedenti, caratteristica questa che impone la delimitazione delle finestre temporali. Ad esempio, si consideri il caso di una precedente attività relativa al movimento di una locomotiva nello scalo. Supponiamo che l'attività in corso richieda il movimento di un'intera colonna di carri e ciò finisca per richiedere contemporaneamente lo stesso binario della locomotiva in manovra. In

communicate with the simulators (in OptiYard implemented only with the yard simulator).

The optimisation algorithm is the first appearing in the literature that is capable of dealing with all processes and movements taking place in a yard. The algorithm can deal with single wagon and block train operations without distinctions. Specifically, following the modelling in the yard simulation module, all yard activities are organised in flowcharts. Each node in these flowcharts corresponds to an operation, including, for example, the assignment of a resource to a specific operation, the movement of this resource up to the operation location, and the actual performance of the operation itself (refer to Fig. 4 above). Specific flowcharts are associated to inbound and outbound trains. The optimisation algorithm proposed within the OptiYard project deals with each node in each of these flowcharts sequentially. Some of the operations, represented by nodes, require the allocation of a resource, being it a locomotive, an operator or a track. In this case, the algorithm chooses the specific resource to be allocated, if several alternative ones are available. Moreover, some operations require the execution of a movement, being it of a shunting locomotive, a wagon or a train. In this case, the algorithm chooses the specific route (sequence of tracks) along which the movement is performed.

Following the operations research and artificial intelligence literature, given the complexity of the problem at hand, a stochastic algorithm or randomized greedy algorithm is proposed. This type of algorithms explores the search space of the problem thanks to a random component. This is typically combined to a local search in order to assess the neighbourhood of visited solutions to improve their quality by shaping a greedy randomized adaptive search procedure (GRASP). Examples of this type of algorithms are the so-called meta-heuristics, which are often inspired to natural processes.

In practice, in the algorithm proposed, solutions are built incrementally. At each step, starting from the current state of the system, which corresponds to a node in the flowchart of operations of the present and expected trains, the algorithm randomly chooses the next operation to tackle considering all possible subsequent nodes. Then, if the operation requires a resource and then its route to execute a movement, this is randomly selected among the existing possibilities. For the schedule of these resources and movements, possible time windows are identified, setting it as soon as possible considering the constraints imposed by previously made assignments. As subsequent operations are included in the solution, additional constraints to previous assignments may apply, which imposes the tightening of the time windows. For example, consider the case of a previous assignment concerning the movement of a locomotive in the yard. Suppose the current operation requires the movement of a whole train, and this ends up needing to occupy the same track as the yard locomotive at the same time. In this case, the time window referred to the locomotive movement needs to be tightened to ensure that the

questo caso, la finestra temporale riferita al movimento della locomotiva deve essere contenuta, per garantire che la colonna di carri non debba fermarsi per dare la precedenza. In effetti, fermare un'intera colonna di carri è molto più costoso che fermare una locomotiva e, quindi si fa sempre quest'ultima scelta. Quando si restringe una finestra temporale, l'algoritmo verifica tutte le conseguenze sulle assegnazioni già effettuate. Ad esempio, se ora la locomotiva deve frenarsi, potrebbe arrivare più tardi del previsto per spingere un determinato taglio sulla sella di lancio. L'occupazione della sella da parte di detto taglio avverrà successivamente e probabilmente ritarderà ulteriori attività della sella. In questo senso, l'algoritmo propaga i vincoli sulla pianificazione delle attività e sulla disponibilità delle risorse.

La ricerca locale implementata nel programma consiste nello scambio di coppie di attività utilizzando la stessa risorsa. La procedura viene applicata a ciascuna soluzione generata. Per accelerare l'algoritmo, in funzione di una applicazione in tempo reale, l'esplorazione di un intorno di interesse è interrotta non appena si trova una soluzione di ottimizzazione. In genere questa è definita ricerca locale di primo miglioramento.

Come accennato all'inizio di questa sezione, il modulo di ottimizzazione include sia l'algoritmo che l'interfaccia di comunicazione. Infatti, mentre viene comunicato un nuovo stato dello scalo ed è in corso la ricerca di una nuova soluzione ottimizzata, il modulo garantisce la continuità delle operazioni comunicando al simulatore le decisioni precedentemente prese se la loro esecuzione è imminente.

Per mantenere la coerenza tra le decisioni prese in precedenza e le nuove decisioni, l'algoritmo considera una previsione a breve termine a partire dallo stato dello scalo comunicato dal simulatore. Quando riceve lo stato dello scalo, calcola in pochi minuti quale sarà lo stato se si applicano le decisioni prese in precedenza. Quindi inizia l'ottimizzazione cominciando da questo stato futuro, in modo da non modificare le decisioni che potrebbero dover essere implementate durante la ricerca della nuova soluzione.

8. Interazioni per produrre gli output richiesti

Le interazioni che sono state sviluppate fisicamente in OptiYard riguardano quelle tra il modulo di ottimizzazione e il micro-simulatore di scalo. Ciò riflette la forte attenzione del progetto alla fornitura di un SSD per il gestore dello scalo. Le interazioni con il micro-simulatore di rete e con i sistemi esterni sono state sviluppate concettualmente, al fine di creare una visione cui potrebbero essere dedicate le future attività di ricerca e sviluppo.

a. Interazioni tra il modulo di ottimizzazione e il micro-simulatore di scalo

Come spiegato nella §7, l'ottimizzazione considera lo

train does not need to brake to give precedence. Indeed, stopping a train is much more expensive than stopping a locomotive, and hence the latter choice is always made. When tightening a time window, the algorithm checks for all the consequences on the already made assignments. For example, if the locomotive now needs to brake, it may arrive later than initially anticipated to push a given cut to the hump. The occupation of the hump by said cut will occur later as well and possibly delay further hump operations. In this sense, the algorithm propagates the constraints on operations scheduling and on resource availability.

The local search implemented consists in swapping the schedule of pairs of operations using the same resource. It is applied to each solution generated. To speed up the algorithm for real-time application, the exploration of a neighbourhood is stopped as soon as an improving solution is found. This is typically referred to as first improvement local search.

As mentioned at the beginning of this section, the optimisation module includes both the algorithm and the communication interface. Indeed, while a new state of the yard is communicated and a new optimised solution is being computed, the module ensures the continuity of operations by still communicating to the simulator the previously made decisions if their execution is imminent.

To maintain consistency between previously made decisions and the new decisions, the algorithm considers a short-term prediction starting from the state of the yard communicated by the simulator. When it receives the state of the yard, it computes what the state will be in a few minutes if the previously made decisions are applied. It then optimises starting at this future state, so as not to modify decisions which may have to be implemented while searching for the new solution.

8. Interactions to produce the required outputs

The interactions that were physically developed in OptiYard regard those between the optimisation module and the yard micro-model. This reflects the project's strong focus on providing a DSS for the yard manager. The interactions with the network micro-model and with the outside systems were developed conceptually, in a view to create a vision towards which future research and development activities could be devoted.

a. Interactions between the optimisation module and the yard micro-model

As explained in Section 7, the optimisation considers the state of the yard communicated by the simulator, and the simulation implements optimisation decisions as time elapses.

For performing this closed-loop interaction, a communication channel needs to be opened.

stato dello scalo comunicato dal simulatore e la simulazione implementa le decisioni di ottimizzazione al passare del tempo.

Per eseguire questa interazione a circuito chiuso, è necessario aprire un canale di comunicazione.

Da un lato, l'ottimizzazione ottiene informazioni sulla gestione dello scalo attraverso dei file. In particolare, all'inizio del processo, un file contenente dati statici (riguardanti, ad esempio, lo schema dell'infrastruttura) viene inviato dal simulatore al modulo di ottimizzazione. Quindi, periodicamente, il simulatore invia un file contenente dati dinamici per descrivere lo stato dello scalo. Le attività dello scalo attualmente in corso sono indicate con il loro orario di inizio, nonché con nuove informazioni precedentemente non disponibili (ad esempio, una modifica dell'orario di arrivo previsto di un treno). Questi file sono prodotti in formato XML, per essere coerenti con i protocolli RailML. In futuro alcuni dati dinamici verranno da sistemi esterni tramite il modello di rete come descritto a seguire (§8.2 e §8.3).

D'altra parte, la comunicazione dal modulo di ottimizzazione al simulatore è continua, basata su una architettura "client-server", utilizzando una interfaccia fisica ("socket"). Esistono due computer "client", di cui uno in fase di interrogazione e uno in fase di risposta, entrambi in comunicazione solo con il computer "server" (Fig. 7) in un circuito chiuso. Il "server" di comunicazione fornisce connettività, sicurezza e convalida dei dati (il "server" controlla tutte le comunicazioni passanti, per errori e completezza). Tutti i messaggi inoltrati sono in formato standard JSON. Grazie a questo sistema, non appena è necessaria una decisione su un'attività imminente da simulare, viene richiesta al modulo di ottimizzazione, che la fornisce immediatamente. Ad esempio, se è il momento di eseguire un'attività di spinta su un taglio, il simulatore richiederà quale locomotiva utilizzare e, supponendo che sia disponibile più di una, il modulo di ottimizzazione indicherà quella più appropriata, dato lo stato corrente nello scalo e il piano generale.

b. Interazioni tra il modulo di ottimizzazione/micro-simulatore di scalo e il micro-simulatore di rete

Gli ambiti del modulo di ottimizzazione/micro-simulatore scalo da un lato e l'ambito del simulatore di rete dall'altro sono descritti in forma di diagramma (Fig. 8), per il caso di studio di Trieste.

Gli ambiti operativi del modello di rete sono limitati alle località di servizio con un numero sufficiente di binari per la sosta di treni (località "polmone", o "buffer") più vicini allo scalo ottimizzato (in particolare per Trieste Campo Marzio: Aurisina e Villa Opicina). Questi sono i binari (non inclusi nel modello) cui idealmente qualsiasi quantità di treni all'ora può essere inviata senza che avvengano congestioni rilevanti e viceversa che può alimentare lo scalo con qualsiasi quantità di treni.

On the one hand, the optimisation gets information on the yard management through files. Specifically, a file containing static data (concerning, e.g., the infrastructure layout) is sent by the simulator to the optimisation module at the beginning of the process. Then, periodically, a file containing dynamic data is sent by the simulator to describe the state of the yard. Here, the operations currently being performed are indicated with their starting time, as well as novel information previously unavailable (e.g., a change in the expected arrival time of a train). These files are formatted in XML to be consistent with the RailML principles. In the future some dynamic data will come from outside systems via the network model as described in §8.2 and §8.3.

On the other hand, communication from the optimisation module to the simulator is continuous, based on client-server architecture, utilising socket communication. There are two client computers, one querying and one answering, both communicating only with the server computer (Fig. 7) in a closed loop. The communication server provides connectivity, security and data validation (the server checks all pass-through communication for errors and completeness). All forwarded messages are in standard JSON format. Thanks to this system, as soon as a decision is needed on an imminent operation to be simulated, it is requested to the optimisation module that provides it immediately. For example, if it is the moment to perform a push operation on a cut, then the simulator will request which locomotive to use, and, supposing more than one is available, the optimisation module will indicate the most appropriate one given the current state in the yard and the overall plan.

b. Interactions between the optimisation module / microsimulation model and the network micro-model

The diagram in Fig. 8 shows the optimisation module / yard micro-model scopes on the one hand and the network model scope on the other, for the Trieste case-study.

The boundaries of the network model are limited to the closest "buffer sidings" to the optimised yard (specifically for Trieste Campo Marzio: Aurisina and Villa Opicina). These are the tracks (not included in the model) to which

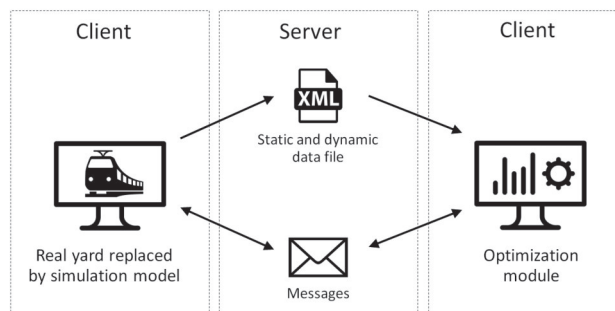


Figura 7 - Circuito chiuso tra ottimizzazione e simulazione. Figure 7 - Closed-loop between optimisation and simulation.

L'ambito del modello di rete si sovrappone a quello della parte di ottimizzazione/micro-simulazione in quanto arriva ai segnali di protezione e di partenza dello scalo. L'ambito di ottimizzazione/micro-simulazione si estende a 3 sezioni di blocco verso l'esterno, al fine di consentire ai treni di entrare ed uscire agevolmente fuori dallo scalo.

Il micro-simulatore di rete circostante Trieste e descritto nel §6 calcola le tracce orarie dei singoli treni. Il problema fondamentale della rete è l'interazione tra i treni merci da e per Campo Marzio, via Barcola (più spesso) e Villa Opicina (più raramente), con i treni passeggeri in entrata e in uscita da Trieste Centrale. Le simulazioni mostrano che la rete è affollata ma non vicina alla saturazione e che non dovrebbero esserci problemi nell'esecuzione delle simulazioni in tempo reale.

Il micro-simulatore di rete sviluppato in OptiYard non interagisce ancora con la parte di ottimizzazione/micro-simulazione ma offre un supporto per comprendere quali informazioni devono essere passate al modulo di ottimizzazione, come base per lo sviluppo del modello concettuale di software per la rete ferroviaria (cioè il futuro prodotto).

Come limite interno, è stato stabilito che il modello di rete dovrebbe comprendere i binari fino all'entrata/uscita dello scalo e fornire:

- tempi di arrivo previsti (ETA);
- disponibilità di tracce orarie, al software dello scalo basato su informazioni di rete statiche e in tempo reale e simulazione della traccia spazio-tempo del treno. La disponibilità di percorsi ferroviari è un fattore chiave per il software Villon utilizzato per la micro-simulazione dello scalo.

Come detto, il limite esterno del modello di rete è scelto considerando le località di servizio più vicine con una capacità sufficiente per essere considerati come "polmoni", e anche sulla base della disponibilità di dati affidabili sui treni in tempo reale. Nella Fig. 8 sono mostrati i punti di informazione del sistema informativo TIS nella rete. Questi sono sufficienti affinché il modello di rete sia in grado di elaborare informazioni aggiornate su ciò che sta accadendo nelle vicinanze di Campo Marzio e con ciò fornire previsioni dei tempi di arrivo ETA previsti allo scalo e delle tracce disponibili in partenza, utilizzando i dati disponibili al di fuori della rete circostante.

I blocchi grigi nella Fig. 8 rappresentano gli elementi al contorno per

ideally any amount of trains per hour may be sent without any significant congestion occurring, and vice versa that can feed the yard with any amount of trains.

The network model scope overlaps with that of the optimisation/microsimulation part in that it arrives up to the home and departure signals of the yard. The optimisation/microsimulation scope extends to 3 block sections outward, in order to allow the trains to enter and exit smoothly in and out of the yard.

The model of the network surrounding Trieste and described in §6 simulates the train trajectories within the network scope defined above. The key issue in the network is the interaction between freight trains to and from Campo Marzio via Barcola (more often) and Villa Opicina (more rarely) with the passenger trains in and out of Trieste Centrale. The simulations show that the network is crowded but not close to saturation, and also that there should be no problem in performing the simulations in real-time.

The simulation tool as developed in OptiYard does not yet interact with the optimisation / microsimulation part but offers support in understanding what information needs to be passed to the optimisation module, as a basis for the development of the concept for the network software (i.e. the future product).

As inner boundary, it was established that the network model should comprise the tracks up to the entrance/exit of the yard and provide:

- ETAs,
- availability of train paths, to the yard software based on real-time and static network information, and train-tra-

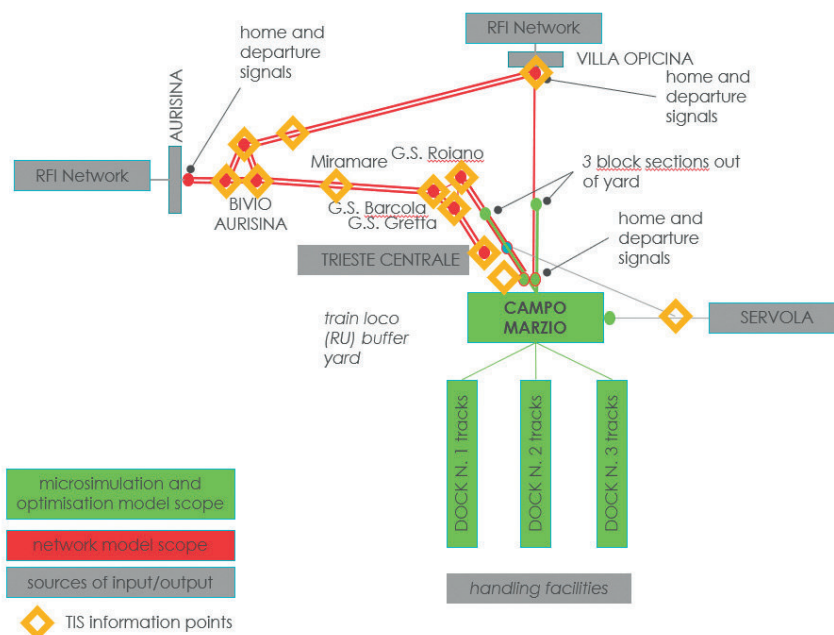


Figura 8 - Ambiti dei modelli di scalo, di rete e di ottimizzazione.
 Figure 8 - Scopes of the yard, network and optimisation models.

la piattaforma informatica complessiva comprendente ottimizzazione+micro-simulatore di scalo e modello di rete circostante. Le informazioni fondamentali provenienti dai blocchi di rete sono gli ETA dei treni ai confini (Aurisina, Villa Opicina e Trieste Centrale). Servola fornisce pochi treni al giorno, gestiti nel modello di scalo. Le principali informazioni portuali sono i tempi previsti per gli arrivi delle navi e l'indisponibilità delle risorse per caricare i treni nei terminal portuali.

c. Interazioni con i sistemi esterni

- Interazioni con i sistemi informativi di “data analytics”

L'interazione a tre tra algoritmo di ottimizzazione, micro-simulatore di scalo e micro-simulatore di rete, dall'interazione con sistemi al di fuori dell'ambito OptiYard.

Le interazioni chiave sono con il GI della rete adiacente allo scalo del caso di studio e le IF che operano nello scalo.

Il diagramma della Fig. 9 mostra come le informazioni, provenienti dall'esterno dell'ambiente OptiYard, possono essere utilizzate concettualmente. I parametri di input sono:

- caratteristiche statiche, di orario e di rete, che sono generalmente rese disponibili dal GI, nell'esempio RFI per il caso di studio di Trieste;
- e in tempo reale, per i quali i sistemi informativi esistenti del GI generalmente forniscono alcune informazioni.

In particolare, per le informazioni in tempo reale, le possibilità stanno aumentando a causa della cooperazione di diverse parti interessate. Entrambi gli scali identificati come casi di studio sono circondati da punti di informazione RNE TIS (tis@rne.eu), che forniscono dati, ad esempio il numero di treno internazionale, l'origine, gli orari di arrivo previsti e reali, i binari di arrivo previsti e l'IF del “cliente”. Già con queste informazioni, è possibile concepire un modello di rete con il quale identificarne i problemi in prossimità dello scalo (ad esempio un circuito di binario guasto vicino a Miramare nella Fig. 8), al fine di effettuare una previsione ETA più realistica di quella fatta dallo stesso TIS (o dal PIC del GI). Al momento l'informazione del TIS deve essere integrata con quella del sistema informativo esistente (PIC per Trieste) poiché il campo di applicazione del TIS è solo quello dei treni internazionali.

Le possibilità di informazione in tempo reale per i singoli carri sono importanti per il caso studio di Trieste, ma molto di più per Česká Třebová, che è uno scalo di smistamento a sella di lancio. La collaborazione internazionale all'interno dell'UIC ha dato origine a sistemi come l'ISR, che utilizza informazioni sui treni (TIS), sulle bolle di consegna (ORFEUS) e altre informazioni in una piattaforma che riunisce le IF per generare l'informazione del carro. Ad esempio, il messaggio “ReadyToPull” che

jectory simulation. The availability of train paths is a key input for the Villon software used for the yard microsimulation.

The outer boundary of the network model is chosen, as mentioned, considering the closest yards with sufficient capacity to be considered as buffers, and also on the basis of the availability of reliable real-time train data. In Fig. 8 the Train Information System (TIS) information points in the network are shown. These are sufficient for the network model to be able to draw up-to-date information on what is happening in the vicinity of Campo Marzio, and with that to make improved predictions, using the data available from outside the network within scope, of ETAs and available paths.

The grey blocks in Fig. 8 represent the boundary elements for the optimisation-microsimulation yard+network model. The key information coming from the network blocks is the ETA of trains at the boundaries (Aurisina, Villa Opicina and Trieste Centrale). Servola provides few trains per day that are handled within the yard model. Key port-side information is expected times for arrivals of vessels and unavailability of resources to load the trains in the port terminals.

c. Interactions with the outside systems

- Interactions with data analytics systems

The above three-way optimisation+yard-micro+network-micro interaction can benefit heavily, as already hinted, by interaction with systems outside the OptiYard scope.

The key interactions are with the Infrastructure Manager (IM) of the network surrounding the case study yard, and the Railway Undertakings (RU) operating in the yard.

The diagram in Fig. 9 shows how the information from outside the OptiYard environment may conceptually be used. The inputs are both:

- static, timetable and network characteristics, that are generally available from the IM, in the example RFI for the Trieste case-study;
- and real-time, for which the legacy systems of the IM generally provide some information.

In particular for real-time information, possibilities are growing due to cooperation of different stakeholders. Both case study yards are surrounded by RNE TIS (tis@rne.eu) information points, which provide data e.g. regarding international train number, origin, planned and real arrival times, expected arrival tracks, customer RU. Already with this information, it is possible to conceive a network model identifying network problems in the vicinity of the yard (e.g. malfunctioning track circuit near Miramare in Fig. 8) in order to make a more realistic ETA forecast than that made by TIS itself (or the IM's PIC). At the moment TIS has to be integrated with the legacy system (PIC for Trieste) since TIS's scope is only international trains.

l'IF inserisce nel sistema all'arrivo può sostituire l'immissione manuale direttamente nell'ambiente OptiYard (cfr. Fig. 9). Il messaggio può essere integrato con informazioni esterne provenienti dal crescente numero di carri dotati di GPS. Inoltre, lo scalo stesso può essere dotato di sistemi come l'IVG sviluppato nel progetto Shift2Rail FR8HUB o altri portali di identificazione dei carri, per integrare le esigenze di informazione, ancora identificabili nella Fig. 9.

• Interazioni con la gestione della rete

Il diagramma della Fig. 10 indica il modo in cui è stata ipotizzata l'interazione tra i sistemi informativi di scalo (OptiYard) e di rete.

Il diagramma è focalizzato sull'interazione con il GI per il quale è stato avviato un caso di studio specifico. Due scali ferroviari (di qualsiasi tipo: scali di smistamento, scali per il traffico intermodale) sono collegati per mezzo di una linea ferroviaria. Lo scalo gestito dal Gestore di Scalo YM1 è considerato lo scalo di invio e YM2 gestisce lo scalo di ricezione. Entrambi gli scali dispongono di un SSD OptiYard in tempo reale. Naturalmente, questi due ruoli possono essere scambiati: questa rappresentazione ha lo scopo di mostrare la differenza in termini di output generati dagli scali per i sistemi informativi del GI. Questi ultimi sono stati immaginati come comprendenti funzionalità di gestione di rete in tempo reale basate sull'algoritmo di "inserimento di singolo treno" descritto nel lavoro di Ljunggren et al. [23] ed utilizzato come riferimento per OptiYard. In questo specifico caso di studio reale, è stata presa come esempio la connessione Hallsberg-Malmö in Svezia. Naturalmente, ciò non preclude che analisi simili siano applicabili alle linee che iniziano a Česká Trebová o Trieste che sono i casi di studio di OptiYard.

Rete e scali operano il più vicino possibile alla programmazione predefinita. Tuttavia, con le attività di trasporto ferroviario delle merci è difficile mantenere la puntualità entro pochi minuti, anche nei giorni in cui non vi sono particolari perturbazioni alla circolazione. Si consideri ora proprio uno di questi giorni. Per quanto riguarda l'orizzonte temporale, durante lo sviluppo del caso di studio è stato notato che il focus di OptiYard SSD è essen-

Important for the Trieste case study, but much more so for Česká Trebová which is a hump marshalling yard, are the real-time information possibilities for single wagons. International collaboration within the International Union of Railways (UIC) has given rise to systems such as International Service Reliability (ISR), which uses train (TIS), consignment note (ORFEUS) and other information together in a platform bringing together the RUs for wagon information. Just as an example, the 'ReadyToPull' message that the RU inserts in the system on arrival may replace manual input directly into the OptiYard environment (see Fig. 9). The message may be integrated with outside information coming from the increasing number of GPS equipped wagons. Moreover, the yard itself may be equipped with systems such as the IVG Intelligent Video Gate developed in the Shift2Rail FR8HUB project or other wagon identification portals, to integrate the information needs represented in Fig. 9.

• Interactions with network management

The diagram of Fig. 10 indicates the way the interaction between the real-time yard and network systems has been imagined.

The diagram is focussed on the interaction with the IM for which a specific case study has been initiated. Two rail yards (of any type: marshalling yards, yards for intermodal traffic etc.) are connected by means of a railway line. The yard managed by Yard Manager YM1 is considered as the sending yard, and YM2 manages the receiving yard. Both yards have a real-time OptiYard Decision Support System. Of course, these two roles can be exchanged - this representation aims at showing the difference in terms of output of the yards to the Infrastructure Manager's IT systems. The latter are considered to comprise real-time network management capabilities based on the Single Train Insertion algorithm of Ljunggren et al. [23] which was used as a reference for OptiYard. The real-world case study that was taken as an example is the Hallsberg – Malmö connection in Sweden. Of course, this does not preclude similar analyses to be applicable to lines starting in Česká Trebová or Trieste which are the OptiYard case studies.

Network and yards operate as closely as possible to predefined planning. However, with rail freight operations it is difficult to maintain punctuality to within minutes, even on days when there are no particular disruptions. One such day is considered. Regarding the time-horizon, it was noticed during the development of the case study that the focus of the OptiYard DSS is essentially "within day" (hours only) – which is the main interest of the yard manager - whereas the

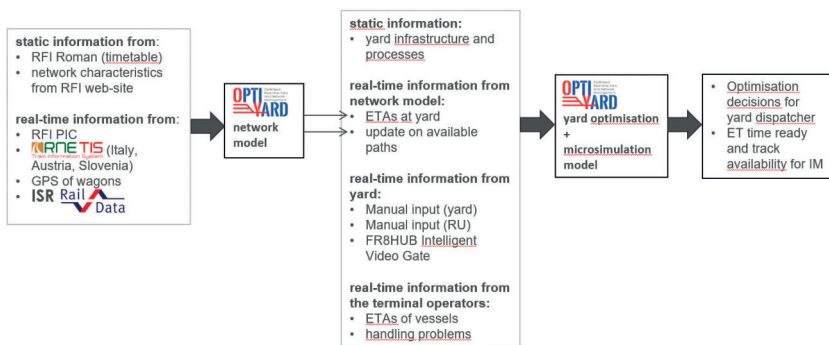


Figura 9 - Utilizzo di input esterni per l'ambiente OptiYard.
Figure 9 - Use of outside inputs for the OptiYard environment.

esempio ETA, Robust, ossia una traccia oraria ad elevata robustezza e tempo di percorrenza lungo, e ETA, Fast, a bassa robustezza con basso tempo di percorrenza) per il treno in ritardo. Il responsabile movimento del GI seleziona una preferenza (ad es. ETA, Fast, al fine di liberare al più presto capacità della rete). ETA, Fast viene inviata una richiesta al responsabile movimento dello Scalo 2, il quale esamina la disponibilità effettiva come proposto dal SSD OptiYard (in particolare se il risultato è “provvisorio”) e accetta o rifiuta. In caso di accettazione, il GI conferma il percorso del treno. In caso di rifiuto da parte dello scalo ricevente, viene proposto il percorso più veloce successivo e così via fino all'accettazione da parte dello scalo.

Per le tracce “ad hoc”, in cui una richiesta potrebbe essere fatta alcuni giorni prima che il treno effettivo debba essere effettuato, ad esempio su richiesta di una IF, sebbene l'orizzonte temporale di OptiYard sia entro il giorno, l'orario annuale è presente come input e le occupazioni del binario pianificate del gestore dello scalo disponibili in anticipo. Pertanto, l'algoritmo per l'inserimento di un treno singolo potrebbe cercare una traccia disponibile con qualche giorno di anticipo, supportando così la programmazione “ad hoc” attraverso la sua interazione con l'SSD dello scalo. Man mano che l'interazione evolve verso la piena capacità in tempo reale, questa ricerca potrebbe essere aggiornata se l'esercizio effettivo non dovesse seguire il programma.

Nell'interazione con la gestione della rete, gli elementi fondamentali relativi alla complessità delle attività ferroviarie sono considerati ancora nello schema della Fig. 10, come elencato di seguito:

- Co-presenza di passeggeri/merci. In figura è rappresentata come esempio una linea passeggeri contenuta nell'ambito del SSD OptiYard per lo Scalo 2, nonché una “linea passante” per il traffico merci. L'SSD OptiYard è concettualmente in grado di rivalutare i tempi di arrivo previsti allo scalo simulando le tracce dei treni nelle vicinanze dello scalo considerando le informazioni in tempo reale provenienti dai sistemi informativi del GI (sui corridoi il sistema di informazione dei treni TIS di RailNetEurope, altrimenti i sistemi nazionali esistenti, integrato con le informazioni sulle problematiche di rilievo in corso, connesse con lo stato dell'infrastruttura, tramite le informazioni di “asset management” attraverso lo “integration layer” SHIFT2RAIL). Come integrarlo con l'algoritmo di inserimento singolo treno è un problema aperto da risolvere una volta definito ulteriormente il modello di rete di OptiYard.
- Uso della capacità di rete per compensare la mancanza di capacità di scalo. Ciò è rappresentato attraverso le località polmone.
- Presenza di “checkpoint” lungo la linea in cui sono possibili vincoli di finestra temporale (ad es. cambio di conducente, cambio locomotore, separazione di carri).
- Interazioni con le imprese ferroviarie, di cui diverse potrebbero operare contemporaneamente negli scali.

given criteria (to be developed, e.g. considering number of available tracks for the required train characteristics, degree of yard saturation...). The Single Train Insertion algorithm receives this input, possibly in the form of a time-window, consistently with the algorithm's approach and uses the updated time-windows for yard 2, along with those coming from the intermediate service points along the track including buffer yards, and makes a first couple of path calculations (e.g. ETA,Robust, high-robustness, long-travel-time path, and ETA,Fast, low robustness, quick path) for the delayed train. The IM dispatcher selects a preference (e.g. Fast, in order to free up network capacity as soon as possible). A request is issued to the dispatcher of Yard 2, who examines actual availability as proposed by the OptiYard DSS (particularly if the result is “tentative”) and accepts or refuses. In case of acceptance the train path is confirmed by the IM. In case of refusal by the receiving yard, the next-fastest path is proposed, and so on until acceptance by the yard.

For ad-hoc time-timetabling, where a path request could be made a few days before the actual train is to be run e.g. upon request of a customer, although the OptiYard time-horizon is within day, the annual timetable is present as an input and the yard manager's planned track occupations available in advance. Therefore, the algorithm for single-train insertion could search for an available path a few days in advance, thus supporting ad-hoc timetabling through its interaction with the yard's DSS. As the interaction evolves towards full real-time capabilities, this search could be updated if actual operations do not actually follow the timetable.

In the interaction with network management, key elements of rail operations complexity are considered in the representation of Fig. 10, as listed below:

- *Presence of mixed passenger/freight. A passenger line contained within the scope of the OptiYard DSS is represented for Yard 2, as well as a “through-line” for freight traffic. The OptiYard DSS is conceptually capable of re-estimating the ETAs to the yard by simulating the train trajectories in the vicinity of the yard considering the real-time information coming from IM systems (on corridors the Train Information System TIS of RailNetEurope, otherwise legacy systems, integrated with information on on-going disruptions via the asset management information through the SHIFT2RAIL integration layer). How to integrate this with the Single Train Insertion algorithm is an open issue to be solved once the network model of OptiYard is further defined.*
- *Use of network capacity to make up for the lack of yard capacity. This is represented through the “buffer sidings”.*

Per il momento, quanto sopra è sviluppato considerando che le IF sono d'accordo con tutte le decisioni del gestore dell'infrastruttura e del gestore dello scalo.

9. Conclusioni e prospettive

Questo documento descrive lo stato di avanzamento raggiunto nel progetto di ricerca OptiYard nell'uso di algoritmi di ottimizzazione in interazione con la micro-simulazione dello scalo ferroviario e della rete circostante verso una gestione automatizzata dello scalo in tempo reale e in comunicazione con la rete. Sono stati sviluppati algoritmi e modelli di micro-simulazione che sono in grado di operare in tempo reale ed è stata stabilita l'interazione fisica tra ottimizzazione e micro-simulazione di scalo che costituisce la base per una dimostrazione dei risultati di OptiYard.

L'ottimizzazione dello scalo si basa sull'interazione tra algoritmi di ottimizzazione, in grado di fare scelte tra alternative al fine di ottimizzare specifici KPI (tempo di permanenza dei carri, perturbazioni sugli orari di partenza programmati) e micro-simulazione, in grado di convalidare la scelta come scalo virtuale all'interno del quale testare le alternative; nelle prime fasi di implementazione per un dato scalo, la micro-simulazione è fortemente utilizzata e, poiché gli algoritmi di ottimizzazione vengono migliorati sulla base dell'interazione durante il funzionamento reale, la micro-simulazione è gradualmente ridotta, fino a quando non si verifica un successivo cambiamento significativo nell'infrastruttura o nell'esercizio.

Il modello di rete è influenzato dalle immediate vicinanza dello scalo al fine di migliorare le previsioni (tempi di arrivo previsti) a supporto della gestione dello scalo e si occupa della comunicazione tra rete ferroviaria e con le imprese ferroviarie.

I sistemi informativi nazionali esistenti e i sistemi in fase di sviluppo come TIS e ISR sono sempre più utilizzati nella gestione degli scali per evitare input e duplicazioni manuali.

A supporto di quanto sopra descritto, si sviluppano gli accordi contrattuali tra le parti interessate.

L'SSD OptiYard per un caso come Česká Trebová (scalo di smistamento per gravità) potrebbe supportare le decisioni di distribuzione di treni verso una rete adiacente piuttosto congestionata, con l'obiettivo di ridurre al minimo i tempi di sosta dei carri e i ritardi alla partenza. Nei futuri sviluppi degli algoritmi di ottimizzazione, tale processo potrebbe essere utilizzato per sfruttare l'attuale situazione di sottocapacità per migliorare la "qualità della composizione del treno", sostenendo la creazione affidabile di treni con carri in un ordine specifico, consentendo così alle IF dinamiche di sviluppare metodi di produzione più flessibili (treni misti ecc.).

Per un caso come quello di Trieste, l'SSD OptiYard può supportare decisioni difficili sull'ordine in cui deviare determinati treni/parti di treno in modo da mantenere

- Presence of "checkpoints" along the line where time-window constraints are possible (e.g. driver change, loco change, dropping wagons etc.).
- Interactions with the railway undertakings, of which several could be operating in the yards. For the moment the above is developed considering that the RU(s) agree with all decisions by IM and YM.

9. Conclusions and outlook

This paper describes the state of advancement reached in the OptiYard research project in using optimisation algorithms in interaction with microsimulation of the rail yard and surrounding network towards real-time yard management and communication with the network. Algorithms and microsimulation models have been developed that are capable of functioning in real-time, and physical interaction between optimisation and yard microsimulation has been established which forms the basis for a demonstration of the OptiYard results.

Yard optimisation is based on the interaction between optimisation algorithms, that are capable of making choices between alternatives in order to optimise specific KPIs (dwell time of wagons, deviations from scheduled departure times), and microsimulation, capable of validating the choice as a virtual yard within which to test the alternatives; in the first stages of implementation for a given yard, microsimulation is heavily used, and as the optimisation algorithms are improved on the basis of interaction during real operation, the microsimulation is gradually reduced, until the next significant change occurs to the infrastructure or operations.

The network model is concerned about the immediate vicinity of the yard in order to improve predictions (ETAs) to support yard management, and deals with network and RU communication.

The legacy information systems and the systems under development such as TIS and ISR are increasingly used in yard management to avoid manual inputs and duplications.

Contractual agreements between the stakeholders are developed to support all the above.

The OptiYard DSS for a case such as Česká Trebová (hump marshalling yard) could support decisions in dispatching trains towards a surrounding network that is quite congested, with the objective of minimising dwell times of wagons and delays on departure. In future developments of the optimisation algorithms, it could be used to exploit the current under-capacity situation to improve the "quality of trains" by supporting the reliable creation of trains with wagons in specific order thus enabling dynamic Railway Undertakings to develop more flexible production methods (group trains etc.).

For a case like Trieste, the OptiYard DSS can support

la produttività dello scalo ai livelli attuali vicini alla saturazione.

L'ambiente di ottimizzazione+simulazione dello scalo consente l'inclusione nel sistema di merci prioritarie e pericolose in base al carro.

In entrambi i casi, è possibile migliorare il processo decisionale per eventi di guasto di una locomotiva, indisponibilità del personale, binari fuori servizio, treni agiuntivi, nonché la gestione giornaliera delle perturbazioni sull'orario di servizio.

Nel quadro di accordi corrispondenti tra gestori dello scalo, gestori di rete e operatori ferroviari, il supporto automatico della gestione dello scalo potrebbe diventare una parte fondamentale nel bilanciamento delle esigenze di ottimizzazione di tutte le parti interessate, verso un sistema di trasporto ferroviario merci ottimizzato, portando così vantaggi a tutti, compresa la società civile che ne ricaverebbe i maggiori benefici sociali e ambientali di una minore quantità di merci sulle strade.

difficult decisions on the order in which to shunt given trains/parts of trains so as to keep the throughput of the yard at the current levels close to saturation.

The optimisation+yard-simulation environment allows the inclusion in the picture of priority and dangerous goods on a wagon basis.

For both cases, decision-making in the case of shunting locomotive breakdowns, staff unavailability, tracks out of order, additional trains could be improved, along with the daily management of deviations with respect to schedule.

In the framework of corresponding agreements between yard managers, network managers and operators, the automatic support of yard management could become a key part of balancing the optimisation needs of all stakeholders towards an optimised rail freight system, thus bringing benefits to all, including society which would ultimately reap the social and environmental benefits of fewer goods on the roads.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] GUGLIELMINETTI P., PICCIONI C., FUSCO G., LICCIARDELLO R., MUSSO A., (2017), "Rail Freight Network in Europe: Opportunities Provided by Re-launching the Single Wagonload System", *Transportation Research Procedia*, 25, pp. 5185-5204.
- [2] ISLAM D.M.Z., RICCI S., NELLDAL B.L., (2016), "How to make modal shift from road to rail possible in the European transport market, as aspired to in the EU Transport White Paper 2011", *European transport research review*, 8(3), p. 18.
- [3] *Shift2Rail Joint Undertaking*, (2015), "Multi-Annual Action Plan", Brussels.
- [4] PELLEGRINI P., MARLIÈRE G., RODRIGUEZ, J., (2016), "A detailed analysis of the actual impact of real-time railway traffic management optimisation. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(1), pp. 13-31.
- [5] DALLA CHIARA B., MANTI E., MARINO, M., (2013), *Intermodal terminals with gateway function: simulation of their engineering on a case study*, *Ingegneria Ferroviaria*, 6, p. 587.
- [6] BRUNO F., (2013), *Definition and application of a mathematical model for the simulation of railway intermodal terminals*, *Ingegneria Ferroviaria*, 11, p. 965.
- [7] LORUSSO R., PERESSO A., MALAVASI G., (2009), "Automazione e applicazioni delle procedure di analisi della capacità di circolazione degli impianti ferroviari" ("Automation and applications of capacity analysis procedures of rail yards"). *Ingegneria Ferroviaria*, 6, p. 547.
- [8] SHI. T. and ZHOU. X., (2015), "A mixed integer programming model for optimizing multi-level operations process in railroad yards", *Transportation Research Part B: Methodological*, 80:19 39.
- [9] ANTOGNOLI M., CAPODILUPO L., MARINACCI C., RICCI S., RIZZETTO L., TOMBESI E., (2018), "Present and Future Operation of Rail Freight Terminals. In *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*" (pp. 233-273). Springer, Cham.
- [10] BOHLIN M., HANSMANN R., ZIMMERMANN U.T., (2018), "Optimisation of railway freight shunting. In *Handbook of Optimisation in the Railway Industry*", pp. 181-212. Springer.
- [11] BOYSEN N., FLIEDNER M., JAEHN F., PESCH E.,(2012), "Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications". *European Journal of Operational Research*, 220(1):1 14.
- [12] DAGANZO C.F., (1986), "Static blocking at railyards: Sorting implications and track requirements". *Transportation Science*, 20(3):189 199.
- [13] HAAHR J.T., LUSBY R.M., (2016), "A matheuristic approach to integrate humping and pullout sequencing operations at railroad hump yards". *Networks*, 67(2):126 138.

- [14] JAEHN F., RIEDER J., WIEHL A., (2015), "Single-stage shunting minimizing weighted departure times". *Omega*, 52:133-141.
- [15] YAGAR S., SACCOMANNO F., SHI. Q., (1983), "An efficient sequencing model for humping in a rail yard". *Transportation Research Part A: General*, 17(4):251-262.
- [16] BOHLIN M., GESTRELIUS S., DAHMS F., MIHALÆK M., FLIER H., (2015), "Optimisation methods for multistage freight train formation". *Transportation Science*, 50(3):823-840.
- [17] KRAFT E., (2000), "A hump sequencing algorithm for real time management of train connection reliability". In *Journal of the Transportation Research Forum*, volume 39.
- [18] GESTRELIUS S., ARONSSON M., JOBORN M., BOHLIN M., (2017), "Toward a comprehensive model for track allocation and roll-time scheduling at marshalling yards". *Journal of Rail Transport Planning and Management*.
- [19] Simcon, (2019), "Villon simulation tool". Simcon. Accessible on internet: <http://www.simcon.sk/en/tools/villon>.
- [20] KAVIČKA A., KLIMA V., ADAMKO N., (2007), "Simulations of Transportation Logistic Systems utilizing Agent-Based Architecture". *International Journal of Simulation Modelling* 6 (1): 13-24.
- [21] LIU R., YE H., WHITEING T., (2015), "Dynamic Simulation for Real Time Operations of ERTMS Level 3". DITTO Project Deliverable 3.1, RSSB. <http://www.its.leeds.ac.uk/fileadmin/documents/research/F2-DITTODeliverable31Milestone6.pdf>.
- [22] LIU R., YE H., WHITEING T., (2016), "Simulation and Control of ERTMS Level 2". DITTO Project Deliverable 3.2, RSSB. http://www.its.leeds.ac.uk/fileadmin/documents/research/F3-DITTO_Milestone7Deliverable_32Final.pdf.
- [23] LJUNGGREN F., PERSSON K., PETERSON A., SCHMIDT C., (2018), "Maximum Robust Train Path for an Additional Train Inserted in an Existing Railway Timetable, Conference on Advanced Systems in Public Transport and TransitData" (CASPT 2018), 23-25 July 2018 Brisbane, Australia.

Errata Corrige

Si informano i gentili lettori che nell'articolo: "**Ipotesi per il nodo ferroviario di Venezia**" / "**Hypotheses for the Venice railway vehicle**" di K. CALAMARI, G. PUPOLIN e S. SANTER, pubblicato nella rubrica Osservatorio del numero di Maggio del 2020 di *Ingegneria Ferroviaria*, il valore del costo del fabbricato nella Tabella 1 è di 150.000 e non di 1.500.000 come erroneamente inserito.

Di questo la redazione si scusa con il lettore.

La Redazione di
Ingegneria Ferroviaria