



Definizione e applicazione di un modello matematico per la simulazione di terminali ferroviari intermodali

Definition and application of a mathematical model for the simulation of railway intermodal terminals

Dott. Ing. Fabrizio BRUNO^(*)

1. Introduzione

La crescita nei decenni passati del traffico merci a scala mondiale, le problematiche energetiche, le opportunità potenziali relative alle nuove connessioni trans-asiatiche, talvolta condizionate dalle criticità del traffico stradale, comportano sempre più l'utilizzo di modi di trasporto alternativi, o comunque complementari, al trasporto "tutto-strada", che per essere competitivi devono necessariamente integrare in modo efficiente le diverse modalità, realizzando il cosiddetto trasporto intermodale [2]. Tuttavia, al fine di rendere competitiva l'intermodalità, è fondamentale che le politiche in tema di trasferimento delle merci dei diversi Stati siano orientate verso la realizzazione di apposite reti dedicate al trasporto combinato.

I terminali intermodali, in particolare i terminali strada-rotaia, vengono così ad acquisire all'interno di tali reti un ruolo fondamentale. Al fine di garantire una corretta valutazione delle potenzialità che tali terminali possano offrire all'interno della catena logistica, i modelli analitici rappresentano uno strumento di supporto al dimensionamento delle diverse infrastrutture e degli impianti.

Al giorno d'oggi i terminali gateway, considerati i principali hub per il trasporto combinato, stanno sostituendo le vecchie stazioni di smistamento (o selle di lancio): mentre in quest'ultime i carri venivano smistati senza separare la merce trasportata dal carro medesimo, nei moderni terminali gateway sono le stesse unità per il trasporto intermodale che vengono trasferite tra i diversi carri mediante l'utilizzo di apparecchiature di movimentazione, senza la necessità di scomporre i convogli per la formazione dei nuovi treni costituiti da carri diretti verso la medesima destinazione.

Di seguito si propone un modello matematico che permette la simulazione di tali terminali - sia in fase pro-

1. Introduction

The growth of freight traffic at a global scale in the past decades, energy issues, potential opportunities for new trans-Asian connections, sometimes conditioned by critical aspects of road traffic, increasingly involve using alternative or however complementary modes of transport, to "all-road" transport that, to be competitive, must necessarily efficiently integrate the different modes, creating the so-called intermodal transport [2]. Nevertheless, in order to make intermodality competitive, it is essential that policies relating to the transfer of goods of different Countries are geared towards the realisation of special networks dedicated to combined transport.

Intermodal terminals, particularly rail-road terminals, thus gain a vital role within these networks. In order to ensure proper assessment of the potentials that these terminals can offer within the logistic chain, the analytical models are a support tool to the sizing of the different systems and infrastructures.

Nowadays the gateway terminals, considered to be the main hubs for combined transport, are replacing the old marshalling yards (or humps): while in the latter the wagons were drilled without separating the goods carried by the same wagon, in modern terminal gateways it is the same intermodal transport units that are transferred between different wagons using handling equipment, without the need to split up the convoys for the formation of new trains consisting of wagons headed towards the same destination.

Below is a mathematical model that allows the simulation of such terminals - both in the design phase and in the operating phase - in order to study their possible potential according to several variables, such as vehicle entry function, equipment and machinery for transfer operations, storage areas capacity, number of transiting trains.

^(*) Politecnico di Torino, Dipartimenti DIMEAS-DIATI, Trasporti.

^(*) Polytechnic of Turin, DIMEAS-DIATI Departments, Transport.

gettuale che in fase d'esercizio - al fine di studiarne le possibili potenzialità in funzione di diverse variabili, quali funzione di ingresso degli automezzi, attrezzature e macchinari per le operazioni di trasbordo, capacità delle zone di stoccaggio, numero di treni transitanti.

2. Principi di dimensionamento dei terminali intermodali: stato dell'arte

I terminali ferro-gomma rivestono la funzione principale di trasferire le unità per il carico dalla strada alla ferrovia e viceversa, nonché di consentire la sosta temporanea di dette unità in attesa del loro inoltro/ritiro, minimizzando il costo generalizzato del trasporto o, più in generale, massimizzando l'utilità degli utenti che effettuano il trasporto di beni attraverso una specifica catena di modalità di trasporto [3].

I servizi offerti da un terminal nel rispondere alle esigenze del *ferroviage* e/o della movimentazione delle UTI (unità di trasporto intermodale), hanno notevole influenza sulla definizione del lay-out: esso è infatti strettamente connesso al sistema operativo progettato (fig. 1).

Le funzioni predette, quali il trasferimento delle unità per il carico dai mezzi stradali ai convogli ferroviari, nonché talvolta il loro deposito temporaneo, si traducono in occupazioni di spazi e quindi nel dimensionamento del terminal stesso: attraverso le informazioni ricavate dall'analisi della domanda potenziale e futura eventualmente simulata, nonché dalla distinzione delle funzioni (primarie e secondarie) individuate, viene specificato il layout funzionale, mediante il quale si effettua il dimensionamento delle aree da destinare alle singole funzioni.

Le funzioni ed i flussi delle merci e dei veicoli in entrata ed in uscita costituiscono l'input per definire l'organizzazione interna del terminale. L'ottimizzazione dello svolgimento di tutte le operazioni all'interno di un terminale dipende in primo luogo dalla corretta disposizione dei fasci di binari.

I binari presso un terminal si possono suddividere in: operativi, di sosta e manovra, di presa e consegna.

I binari operativi sono quelli accessibili alle gru, detti anche "sotto gru"; i binari di sosta e manovra invece, sono quelli con funzione di "polmone", dove lasciare i treni carichi in attesa della partenza o vuoti prima dell'arrivo nel terminal, liberando così i binari operativi. I binari di presa e consegna hanno invece lo scopo di consentire una sosta tecnica per svolgere determinate operazioni, come il cambio di trazione dei convogli, operazioni di verifica del caricamento e il controllo documenti [1].

L'approccio attuale al dimensionamento di un terminal utilizza in genere una semplice metodologia che, partendo dai dati di traffico, individua il numero di moduli necessario a fornire un'offerta adeguata, identificando come elemento fondamentale il numero di binari operativi.

2. Principles of dimensioning of intermodal terminals: state of the art

Rail-road terminals have the main function of transferring the loading units from road to rail and vice versa, and of allowing the temporary stay of such units waiting for their delivery/pickup, minimising the generalised cost of transport or, more generally, maximising the utility of users engaged in the transport of goods through a specific transport mode chain [3].

The services offered by a terminal in meeting the needs of ferroviage and/or handling of ITUs (intermodal transport units), have considerable influence on the definition of the lay-out: it is in fact closely related to the operating system designed (fig. 1).

These functions, such as the transfer of loading units by road transport to trains, and sometimes their temporary storage, result in the occupation of spaces and therefore in the sizing of the same terminal: the functional layout is specified through the information obtained from the analysis of the potential and future possibly simulated demand, as well as the distinction of the functions identified (primary and secondary). The dimensioning of areas to be allocated to individual functions is performed through the functional layout.

The functions and flows of goods and incoming and



Fig. 1 - Vista di un terminal gateway adibito anche per il traffico combinato.

Fig. 1 - View of a gateway terminal used also for combined traffic.

La scelta del numero di moduli ferroviari necessari dipende dalla *potenzialità* (numero di UTI che è possibile movimentare nell'arco di un certo periodo di tempo, tipicamente l'anno) che il terminal stesso deve essere in grado di offrire, ma la relazione non è univoca, in quanto la potenzialità desiderata può essere ottenuta con metodologie di gestione differenti [1]. Essa è strettamente legata alla produttività e quindi al numero massimo di treni programmabili al giorno; di conseguenza assumono un ruolo decisivo le caratteristiche dell'infrastruttura (come il numero di binari), le dotazioni impiantistiche (mezzi di movimentazione e relative prestazioni e capacità), le caratteristiche operative (personale, organizzazione del servizio, etc.).

Particolarmente importante è la scelta del modello di gestione operativa del terminal stesso; se si opta per un *regime statico*, si ha una potenzialità di movimentazione pari ad una coppia di treni/giorno per binario operativo equivalente (un treno arriva alla mattina, viene scaricato, sosta vuoto per poi essere ricaricato e riammesso in linea alla sera); se si opta per un *regime dinamico* invece, su uno stesso binario virtuale equivalente si avvicendano più coppie di treni al giorno, dove il coefficiente di dinamicità, pari al rapporto tra il numero di coppie di treni/giorno gestite e il numero di binari equivalenti, è un indicatore dell'attività stessa dell'impianto [1].

A sua volta la tipologia di gestione del terminal è strettamente correlata alla definizione delle modalità di trasferimento modale o trasbordo delle unità di trasporto intermodale (UTI) dal veicolo stradale a quello ferroviario e viceversa.

Le tecniche attualmente impiegate nell'ambito del combinato strada-rotaia o *ferroutage* possono essere classificate in due categorie:

- orizzontali;
- verticali.

Nell'ambito di quelle orizzontali, è possibile o movimentare le sole UTI - unità di trasporto intermodali, cioè le casse mobili, i container ed i semi-rimorchi - posate sopra i carri ferroviari oppure smistare i carri ferroviari completi, il che ovviamente non implica di per sé un trasporto intermodale. Per poter smistare i carri ferroviari ovvero coppie o terne di essi ("tagli" di treni) occorre ricorrere tipicamente alle stazioni di smistamento anche riconosciute come "selle di lancio": dopo avere sfrenato tutti i carri, i singoli tagli vengono lanciati o lasciati avanzare per gravità dalla sommità della sella, avente una quota tipica di pochi metri di altezza, verso i vari binari, al fine di comporre nuovi treni in base alla destinazione degli stessi. Le stazioni di smistamento non sono strutture intermodali, tuttavia costituiscono la base concettuale per lo smistamento della merce che, in chiave moderna, è interpretato dai terminal gateway nel trasporto intermodale, mediante la movimentazione delle UTI invece che dei carri con i relativi carichi.

L'utilizzo delle stazioni di smistamento tende a lascia-

outgoing vehicles constitute the input to define the internal organisation of the terminal. The optimisation of the performance of all operations within a terminal depends firstly on the correct arrangement of sets of tracks.

The tracks at a terminal can be divided into: operational, holding and shunting, pickup and delivery.

The operational tracks are those accessible to cranes, also known as sub-cranes tracks; the holding and shunting tracks on the other hand, are those with lung function, where trains are left loaded awaiting departure or empty prior to arrival in the terminal, thereby freeing operational tracks. The pickup and delivery tracks instead are meant to allow a technical stopover to perform certain operations, such as the change of traction of convoys, load test operations and documents checking [1].

The current approach to the dimensioning of a terminal typically uses a simple methodology that, starting from the traffic data, determines the number of modules needed to provide an appropriate offer, identifying the number of operational tracks as a fundamental element.

The choice of the number of railway modules required depends on the potential (number of ITUs that can be handled within a certain period of time, typically a year) that the same terminal must be able to offer, but the relation is not univocal, since the desired potential can be achieved with different management methodologies [1]. It is strictly related to productivity and therefore to the maximum number of programmable trains per day; as a result infrastructure characteristics (such as the number of tracks), engineering equipment (handling means and related performance and capacity), operational characteristics (personnel, service organisation, etc.) play a decisive role.

The choice of the operational management model of the same terminal is particularly important; if a static regime is chosen, there is a handling potential equal to a pair of trains/day per equivalent operating track (a train arrives in the morning, is unloaded, stays empty to be then reloaded and allowed back online in the evening); if instead a dynamic regime is chosen, multiple pairs of trains alternate per day on the same equivalent virtual track, where the dynamic factor, equal to the ratio between the number of pairs of trains per day managed and the number of equivalent tracks, is an indicator of the same activity of the system [1].

In turn the type of terminal management is closely related to the definition of modal transfer modes or transshipment of intermodal transport units (ITUs) from road to rail vehicle and vice versa.

The techniques currently employed within the combined road-rail transport or ferroutage can be classified in two categories:

- *horizontal;*
- *vertical.*

In the context of horizontal ones, either only the ITUs

re il passo sempre più alle tecniche di movimentazione verticale, che comportano lo spostamento, ad esempio, dal carro ferroviario al pianale di carico del veicolo stradale, mediante appositi mezzi di movimentazione (gru semoventi, gru a portale...).

Il carico verticale richiede l'investimento in attrezzature per la relativa movimentazione, ma permette la gestione tanto di semirimorchi quanto di container e casse mobili.

Tra le tecniche orizzontali, dove è possibile movimentare solo le UTI poste sopra i carri ferroviari, diversi sono i sistemi che hanno trovato applicazione in alcuni terminal europei, alcuni dei quali con movimentazione delle unità per il carico attraverso l'impiego di dotazioni esterne ai veicoli (Cargobeamer, Kombilifter, Metrocarg, Kocksum), altri invece in grado di effettuare il trasbordo attraverso dotazioni supplementari installate sui veicoli stessi (Cargodomino, Acts).

Per il caricamento dei carri ferroviari con movimentazione verticale delle UTI, invece, si ha necessità di utilizzare attrezzature di sollevamento e trasporto dotate di apparecchiature di presa denominate *spreader*, come carrelli cavalieri (*straddle carrier*), carrelli frontali, carrelli laterali, gru semoventi frontali, gru a portale su gomma o rotaia, *reach stacker* [5].

3. La simulazione dell'esercizio di un terminal intermodale per le scelte progettuali

Per la verifica e la conseguente scelta tra i progetti alternativi è utile ricorrere a modelli di simulazione che prevedano come variabili di ingresso non solo il volume di traffico merci, ma anche la struttura e le caratteristiche del flusso.

I sistemi di simulazione devono in generale condurre all'ottimizzazione della capacità e dell'efficienza di:

- attrezzature (capacità, impiego, tempi operativi);
- sistema dei binari (carico, rotazione, movimenti di entrata, uscita e riordino);
- sistema di magazzinaggio (capacità, rotazione);
- veicoli stradali (movimenti, tempi di servizio, tempi d'attesa) [1].

Una progettazione basata su strumenti di simulazione rappresenta sicuramente ormai un punto cardine del processo di dimensionamento e costruzione di un'infrastruttura logistica.

Tra i modelli utilizzati per la simulazione di terminali intermodali proposti in letteratura, si ricordano quello di COSTANTINOS e ATHANASIOS [6], in cui sono richiesti in input il volume di merce movimentata nell'unità di tempo, il tipo di UTI utilizzate, il costo e la disponibilità del terreno, il tipo di operazioni di carico/scarico per i convogli, il tipo di attrezzature, l'altezza di stoccaggio e le tecnologie di supporto.

can be handled - intermodal transport units, i.e. mobile crates, containers and semi-trailers - placed on the railway wagons or complete rail wagons can be sorted, which obviously does not imply an intermodal transport. In order to route the railway wagons or pairs or triads of the same ("cuts" of trains) marshalling yards must typically be used, also known as humps: after having released the brakes of all wagons, the individual cuts are launched or left to advance by gravity from the top of the hump, with a typical height of a few metres, towards the various tracks, in order to compose new trains according to their destination. Marshalling yards are not intermodal facilities, however, they are the conceptual basis for the sorting of goods that, in a modern way, is interpreted by the gateway terminals in intermodal transport, using the handling of the ITUs instead of wagons and their loads.

The use of marshalling yards tends to increasingly give way to vertical movement techniques that involve displacement, for example, from the railway wagon to the loading platform of the road vehicle, using suitable handling means (self-propelled cranes, gantry cranes, ...).

The vertical load requires investment in equipment for its handling, but allows the management of semi-trailers as well as containers and mobile crates.

Among horizontal techniques, where only the ITUs placed on railway wagons can be handled, there are many different systems that have found application in some European terminals, some with handling of load units through the use of equipment external to vehicles (Cargobeamer, Kombilifter, Metrocarg, Kocksum), while others can transfer through additional equipment installed on the same vehicles (Cargodomino, Acts).

For the loading of railway wagons with vertical movement of the ITUs, instead, there is the need to use lifting and transportation equipment fitted with pick-up devices called spreaders such as straddle carriers, frontal carriers, side carriers, self-propelled frontal cranes, rubber-tyre or rail gantry cranes, reach stackers [5].

3. The simulation of the operation of an intermodal terminal for design choices

For verification and subsequent choice between alternative projects it is useful to resort to simulation models that include not only the volume of freight traffic, but also the flow structure and characteristics as input variables.

Simulation systems should in general lead to the optimisation of the capacity and efficiency of:

- equipment (capacity, use, operating times).
- tracks system (load, rotation, entry movement, exit and reclassifying);
- storage system (capacity, rotation);
- road vehicles (movements, service times, waiting times) [1].

La progettazione avviene confrontando la produttività di diversi layout proposti dal sistema: ogni progetto viene accettato se i tempi di servizio dei treni e degli autocarri non determinano tempi di attesa troppo elevati. In condizioni ordinarie il sistema dà priorità al carico treno-autocarro [6].

Il modello di RIZZOLI et al. [7], invece, prevede la scelta dell'attrezzatura, ma fornisce i tempi di coda e di servizio dei mezzi. Il layout infatti prevede l'utilizzo di gru a portale su binari operativi e sul deposito ed un'area di stoccaggio con gru frontali. Forniti in input la struttura del terminale e i tempi di arrivo, la simulazione genera tre processi: il carico-scarico delle UTI dal treno, il deposito delle UTI nell'area di stoccaggio e l'arrivo e la partenza tramite autocarri [7].

Per entrambi i modelli presentati, i servizi avvengono in modalità FIFO (First In First Out), ovvero il primo arrivato è servito per primo.

Anche il modello di BENNA e GRONALT [8] richiede in input i tempi di arrivo dei mezzi stradali nell'unità di tempo e prevede trasbordo diretto o messa a deposito per le UTI: anche in questo caso, come nel modello di COSTANTINOS e ATHANASIOS, le UTI possono avere dimensioni e priorità; tale modello richiede la lunghezza dei convogli ferroviari, il layout del terminal e la capacità di stoccaggio. Tuttavia esso è sostanzialmente diverso dai modelli presenti in letteratura, poiché non è costruito per consentire all'utente di valutare diversi lay-out (come per il caso dei modelli precedenti), ma al fine di valutare le prestazioni della configurazione scelta (in questo caso quindi le gru a portale), in funzione di determinati parametri (ad esempio la velocità delle gru, la percentuale di UTI scaricate dal treno, i tempi di arrivo degli automezzi...) [8].

In ambito portuale, si ricorda il modello proposto da BALDASSARRA, IMPASTATO, RICCI [10], sviluppato tramite il software Planimate, che permette, attraverso una simulazione ad eventi discreti, di riprodurre le attività svolte all'interno di un terminal intermodale, calcolare il *transit time* relativo alle unità per il carico, nonché di identificare i "colli di bottiglia" del sistema; al fine di ottimizzare le operazioni di *handling*, sono stati simulati differenti scenari per valutare le variazioni di alcuni indici di performance. Il modello proposto è stato inoltre applicato all'analisi del terminal container del Porto di Livorno.

Tra i differenti modelli proposti, si ricorda anche la recente simulazione sviluppata da DALLA CHIARA, MANTI, MARINO [9], in cui l'utilizzo del software AutoMod ha permesso il calcolo della potenzialità di un nuovo terminal intermodale, riferendosi a livello esemplificativo all'attuale area di Alessandria Smistamento, ad oggi non utilizzata a pieno, con particolare attenzione alle prestazioni delle attrezzature ed ai tempi di servizio per gli utenti, fungendo sia da terminal intermodale che da terminal gateway. In base alla specifica sequenza di carico scelta, alla frequenza dei treni e degli autocarri in arrivo, alla velocità del portale e del carrello delle gru, nonché alle per-

A design based on simulation tools is now a cornerstone of the design and construction process of a logistics infrastructure.

Among the models used for simulating intermodal terminals available in literature, there is that of COSTANTINOS and ATHANASIOS [6], in which the volume of goods handled in the unit of time, the type of ITUs used, the cost and availability of land, the type of loading/unloading operations for convoys, the type of equipment, the storage height and support technologies are required in input.

The design is done by comparing the productivity of different layouts proposed by the system: each project is accepted if the service times of trains and trucks do not determine excessive waiting times. In normal conditions the system gives priority to the train-truck loading [6].

The RIZZOLI et al. model [7], however, envisages the choice of equipment, but provides queue and service times of the transportation means. The layout in fact involves the use of gantry cranes on operating rails and deposit and a storage area with frontal cranes. Given the terminal structure and arrival times in input, the simulation generates three processes: the loading-unloading of ITUs from the train, the deposit of ITUs in the storage area and the arrival and departure by means of trucks [7].

For both models presented, the services take place in FIFO (First In First Out) mode - the first come is first served.

Even the BENNA and GRONALT model [8] requires the arrival times of road transport in the unit of time in input and involves direct transfer or deposit for ITUs: in this case also, as in the COSTANTINOS and ATHANASIOS model, the ITUs can have dimensions and priorities; this model requires the length of trains, the layout of the terminal and the storage capacity. However it is substantially different from the models in literature, because it is not built to allow the user to evaluate different lay-outs (as in the case of previous models), but in order to evaluate the performance of the chosen configuration (in this case therefore the gantry cranes), depending on certain parameters (such as the speed of the crane, the percentage of ITUs unloaded from the train, vehicle arrival times ...) [8].

Within the harbour, there is the model proposed by BALDASSARRA, IMPASTATO, RICCI [10], developed using the Planimate software, that allows reproducing activities carried out within an intermodal terminal, calculating the "transit time" concerning loading units, as well as identifying system bottlenecks, through a discrete events simulation; in order to optimise handling operations, different scenarios were simulated to assess changes in some performance indices. The proposed model has also been applied to the analysis of the container terminal at the port of Livorno.

Among the various models proposed, one must also remember the recent simulation developed by DALLA CHIARA, MANTI, MARINO [9], where using the AutoMod software has allowed the calculation of the potential of a new intermodal terminal, referring for example to the current marshalling

centuali di scaricamento dei convogli, il modello fornisce il numero di UTI potenzialmente movimentabili nell'arco di un anno, sia in condizioni ordinarie, che in condizioni di guasto [9].

Sulla logica di tale modello, viene proposto il modello che verrà successivamente descritto, il quale, a differenza di quest'ultimo, si basa su un approccio analitico-numerico, attraverso l'utilizzo del software Matlab.

4. Alcuni metodi matematici per la simulazione dei terminali ferroviari

Si parla di *simulazione deterministica* quando l'evoluzione nel tempo del modello costruito è univocamente determinata dalle sue caratteristiche e dalle condizioni iniziali. Quando nel modello sono presenti grandezze aleatorie che a seconda del valore che assumono possono portare a diversi comportamenti, si parla invece di *simulazione stocastica*.

Con *simulazione continua* invece si intende invece una simulazione in cui il valore delle variabili coinvolte varia in modo continuo nel tempo (anche se poi esse saranno in pratica valutate in istanti discreti).

Si ha invece una *simulazione discreta* quando lo stato del sistema studiato, e quindi il valore delle variabili relative, cambia in ben definiti istanti di tempo.

Tra i principali modelli analitici adatti alla simulazione di un sistema, in particolare applicabili allo studio di un terminal intermodale, si ricordano quelli che si basano sui seguenti rami della statistica e della matematica applicata:

- teoria matematica dei controlli;
- teoria matematica delle code;
- teoria delle equazioni differenziali ordinarie.

Elemento comune delle diverse tipologie di approccio matematico, è la schematizzazione del terminal ferroviario attraverso una serie di blocchi funzionali in sequenza, connessi tra di loro da archi, dove l'ingresso di un blocco funzionale coincide con l'uscita del blocco precedente.

5. Costruzione di un modello matematico differenziale per la simulazione dei terminali

Tra i diversi approcci matematici indicati, la teoria delle equazioni differenziali risulta maggiormente rispondente alle esigenze riguardanti la modellazione, e di conseguenza la simulazione, di un terminal intermodale: essa consente infatti, non solo di simulare il "sistema terminal" nel suo complesso, ma permette di monitorare in maniera precisa anche le sue singole componenti.

Il primo passo del processo di modellazione consiste nel definire il "sistema", ovvero le diverse componenti della realtà che si vuole analizzare (in tal caso le diverse zone funzionali del terminale), e le "variabili rappresenta-

area di Alessandra, so far not fully used, with particular attention to the performance of equipment and service times for users, acting both as intermodal terminal and gateway terminal. According to the specific load sequence chosen, the frequency of trains and lorries arriving, the speed of the crane gantry and trucks, as well as to the unload percentages of convoys, the model provides the number of ITUs potentially handled per year, both in normal conditions and in fault conditions [9].

On the logic of such a model, the model that will later be described is proposed, which, unlike the latter, is based on a numerical-analytical approach, through the use of the Matlab software.

4. Some mathematical methods for the simulation of railway terminals

We are talking about deterministic simulation when the evolution over time of the constructed model is uniquely determined by its characteristics and initial conditions. When the model contains random quantities that can lead to different behaviours depending on the value, we are rather talking about stochastic simulation.

With continuous simulation a simulation is meant instead, in which the value of the variables involved varies continuously over time (although they will be basically evaluated at discrete moments).

There is instead a discrete simulation when the state of the system studied, and therefore the value of the related variables, changes in well-defined moments of time.

Among the main analytical models for the simulation of a system, applicable in particular to the study of an intermodal terminal, there are those based on the following branches of statistics and applied mathematics:

- mathematical theory of controls;
- mathematical theory of queues;
- theory of ordinary differential equations.

The schematisation of the railway terminal through a series of sequential blocks, connected to each other by strings, where the entry of a functional block coincides with the release of previous block, is a common element of the different types of mathematical approach.

5. Construction of a differential mathematical model for the simulation of terminals

Among the various mathematical approaches indicated, the theory of differential equations is more responsive to the needs of modelling, and consequently of simulation, of an intermodal terminal: it allows not only to simulate the terminal system as a whole, but allows to accurately monitor also its individual components.

The first stage of the modelling process is to define the system, that is the various components of the reality that

ture" che entrano nel sistema stesso (nel caso in esame connesse con le unità di carico). Successivamente, una volta impostate le condizioni iniziali (ovvero il numero di automezzi in ingresso e il numero di unità per il carico che giungono attraverso i convogli nel terminal), si osserva come il sistema possa evolvere nel tempo: in particolare ciò che maggiormente interessa è il numero di unità presenti in ogni singola parte del sistema ad un determinato istante temporale, nonché la loro permanenza (sia all'interno di una singola zona funzionale sia all'interno del sistema intero) [4].

Si sottolinea come l'approccio che si tende ad utilizzare al fine di studiare il sistema nella sua globalità sia un approccio di tipo "macroscopico", in cui si segue l'evoluzione di un insieme di unità che entrano nel sistema: dunque il loro comportamento viene definito mediante determinate regole che dipendono fortemente dalle componenti del sistema stesso, le quali ne dettano l'evoluzione temporale [11]. In questo specifico caso, le unità per il carico possono essere interpretate come singole unità discrete che nel loro complesso costituiscono un "flusso", rispondente al "principio di conservazione della massa o legge della conservazione del flusso", per cui il numero di unità entranti in una parte del sistema (ad esempio un blocco funzionale in cui si svolge una determinata attività) è pari al numero di unità uscenti, ovvero vige semplicemente la legge di conservazione della massa. Definendo la variabile di stato come "numero di unità" del sistema o di una parte del sistema, ciò si traduce in:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = y_{uscita} - y_{ingresso}, \text{ per ogni istante } t \text{ di tempo} \quad (1)$$

In termini più semplici, si può affermare che la variazione temporale del numero di unità presenti all'interno di un sotto-sistema in un determinato intervallo temporale è pari alla differenza tra il numero di unità entranti e il numero di unità uscenti nel medesimo intervallo.

Al fine di indagare il comportamento dinamico del sistema, lo studio del segno della derivata prima può portare alla descrizione del sotto-sistema, infatti:

- se $\frac{\partial y}{\partial t} > 0 \rightarrow y_{uscita} > y_{ingresso}$, il numero di unità in uscita è maggiore del numero di unità entranti, ovvero il sotto-sistema smaltisce le unità che entrano al suo interno con un tasso di operatività molto maggiore rispetto alla frequenza degli arrivi; il sotto-sistema quindi può essere sovradimensionato;
- se $\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \rightarrow y_{uscita} = y_{ingresso}$, tante unità entrano quante unità escono nello stesso intervallo temporale; il sistema quindi funziona a "regime" e si può affermare che il sotto-sistema sia correttamente dimensionato (situazione ideale, senza guasti);
- se $\frac{\partial y}{\partial t} < 0 \rightarrow y_{uscita} < y_{ingresso}$, il numero di unità uscenti è minore del numero di unità entranti, ovvero il sotto-sistema smaltisce tali unità con un tasso di operatività

we want to analyse (in this case the different functional areas of the terminal), and the representative variables that enter the system itself (in this case connected with the load units). Later, once the initial conditions are set (i.e., the number of incoming vehicles and the number of units for loading arriving through the convoys in the terminal), we observe how the system can evolve over time: in particular what concerns most is the number of units present in each part of the system at a certain instant of time as well as their stay (both within a single functional area and within the entire system) [4].

We must stress that the approach that we tend to use to study the system in its entirety is a macroscopic type approach where the evolution of a set of units that enter the system is followed: hence their behaviour is defined using certain rules that strongly depend on the components of the system itself, which will decide the time evolution [11]. In this specific case, the units for load can be interpreted as individual discrete units that together constitute a flow, complying with the "principle of preservation of mass or flow conservation law", whereby the number of incoming units in a part of the system (such as a functional block where a particular task is performed) is equal to the number of outgoing units, that is the law of mass conservation simply applies. By defining the status variable y as "number of units" of the system or part of the system, this results in:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = y_{out} - y_{in}, \text{ for each instant of time } t \quad (1)$$

In simpler terms, we can say that the temporal variation of the number of units within a sub-system in a given time interval is equal to the difference between the number of incoming units and the number of outgoing units in the same interval.

In order to investigate the dynamic behaviour of the system, the study of the sign of the first derivative can lead to the description of the sub-system, in fact:

- *if $\frac{\partial y}{\partial t} > 0 \rightarrow y_{out} > y_{in}$, the number of outgoing units is greater than the number of incoming units, i.e. the sub-system disposes of units that come in it at an operation rate much greater than the incoming frequency; the sub-system may then be oversized;*
- *if $\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \rightarrow y_{out} = y_{in}$, there are as many incoming units as the outgoing units in the same time span; the system then works at "full capacity" and it can be said that the system is correctly dimensioned (ideal situation, without failures);*
- *if $\frac{\partial y}{\partial t} < 0 \rightarrow y_{out} < y_{in}$, the number of outgoing units is less than the number of incoming units, i.e. the sub-system disposes of these units at a lower operational rate than the incoming frequency: therefore a queue will probably be created; in this case the sub-system is undersized.*

It is necessary to clarify that the variation of the number of units present in every functional block depends on

molto minore rispetto alla frequenza degli arrivi: probabilmente dunque, si creerà una coda; il tal caso il sotto-sistema è sottodimensionato.

E' necessario chiarire che la variazione del numero di unità presenti in ogni blocco funzionale dipende da diversi fattori; nell'esempio di fig. 2, rappresentante due zone funzionali in serie del terminal di capacità fisica massima m , il numero di unità entranti nel blocco 1 dipenderà:

- dal tasso di lavoro delle risorse (attrezzature, macchinari) a monte del blocco stesso (a)
- dalla capacità disponibile in quel determinato istante di tempo ($m_1 - y$),

mentre il numero di unità in uscita sarà funzione del tasso di lavoro caratterizzante le attività a valle, nonché dalla capacità disponibile del blocco successivo.

Esempi di blocchi funzionali caratterizzati da una determinata capacità fisica m_i che sono stati rappresentati nel modello proposto sono:

- le zone di stoccaggio delle unità per il carico;
- i convogli ferroviari;
- i varchi di ingresso al *gate*;
- le zone di sosta degli automezzi in attesa di essere scaricati.

Esempi invece di attività caratterizzate da un tasso di lavoro o tasso di operatività, sono:

- le operazioni di controllo e accettazione in arrivo;
- il lavoro svolto da parte dei *reach stacker* per lo scarico/carico degli automezzi;
- le operazioni di trasbordo svolte dalle gru a portale per lo scaricamento e caricamento dei treni.

Risulta evidente quindi come un terminale intermodale, ma in generale qualunque sistema dinamico caratterizzato da una sequenza di attività in serie, possa essere modellato come un insieme di blocchi funzionali di capacità fisica assegnata, connessi tra loro da una serie di archi rappresentanti determinate attività: secondo tale principio è possibile costruire una rete di n blocchi funzionali, la cui evoluzione può essere descritta da un sistema di n equazioni differenziali del I° ordine; la risoluzione del sistema consiste, quindi, nel definire il valore delle n funzione del tempo $y_i(t)$, che rappresentano il numero di unità presenti in un determinato blocco in un preciso istante di tempo [4].

In particolare la singola i -esima equazione differenziale del I° ordine si presenterà nella seguente forma:

$$\frac{dy_i}{dt} = a \cdot \text{heaviside}(y_{i-1}) \cdot \text{heaviside}(m_i - y_i) - b \cdot \text{heaviside}(y_i) \cdot \text{heaviside}(m_{i+1} - y_{i+1}) \quad (2)$$

con l'associata condizione iniziale

$$y_i(t=0) = y_{i0}$$

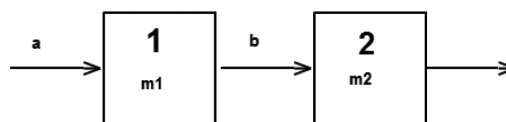


Fig. 2 - Esempio di due blocchi in serie connessi da un'attività.
Fig. 2 - Example of two blocks in series connected by an activity.

several factors; in the example of fig. 2, representing two functional areas in series of the maximum physical capacity terminal m , the number of incoming units in block 1 will depend on:

- the work rate of resources (equipment, machinery) upstream of the block (a)
- the capacity available at that given instant of time ($m_1 - y$),

while the number of outgoing units will be a function of the work rate featuring the downstream activities and the available capacity of the next block.

Examples of functional blocks characterised by a particular physical ability m_i that were represented in the proposed model are:

- the storage areas of the units for loading;
- the trains;
- the entrances to the gate;
- the parking areas for vehicles waiting to be unloaded.

Examples instead of activities characterised by a work rate or operational rate, are:

- control and acceptance operations upon arrival;
- the work done by the reach stackers for unloading/loading of vehicles;
- transfer operations conducted by gantry cranes for loading and unloading of trains.

It is evident therefore how an intermodal terminal, but in general any dynamic system characterised by a sequence of activities in series, can be modelled as a set of functional blocks of allocated physical capacity, connected to each other by a series of strings representing certain activities: according to this principle a network of n functional blocks can be built, whose evolution can be described by a system of n differential equations of the first order; the resolution of the system consists, therefore, in defining the value of n functions of time $y_i(t)$, representing the number of units present in a given block in a specified instant of time [4].

In particular, the i -th single differential equation of the first order will be in the following form:

$$\frac{dy_i}{dt} = a \cdot \text{heaviside}(y_{i-1}) \cdot \text{heaviside}(m_i - y_i) - b \cdot \text{heaviside}(y_i) \cdot \text{heaviside}(m_{i+1} - y_{i+1}) \quad (2)$$

with the associated initial condition

$$y_i(t=0) = y_{i0}$$

Si ravvisa che per ragioni legate alla convergenza numerica del metodo, in seguito ad alcuni tentativi di simulazione, i fattori moltiplicativi a e b dell'equazione tipo (2) siano stati modificati in $\min(a, a \cdot y_{i-1})$ e in $\min(b, b \cdot y_i)$; ciò ha permesso di risolvere alcuni problemi che si manifestavano nel caso in cui i tassi di lavoro del sistema assumessero valori molto simili.

Analizzando la struttura dell'equazione (2), a primo membro è presente la derivata temporale della variabile i -esima, mentre a secondo membro si può notare la presenza di due termini: un primo termine, costituente la frazione di unità in ingresso nel nodo, è caratterizzato da un prodotto tra i seguenti fattori:

- il tasso di lavoro a tipico delle risorse presenti a monte del nodo;
- la funzione gradino;

$$\text{heaviside}(y_{i-1}) = \begin{cases} 1 & \text{se } y_{i-1} \geq 0 \\ 0 & \text{se } y_{i-1} < 0 \end{cases}$$

che svolge il ruolo di *limitatore di flusso*, arrestando o consentendo l'avanzamento delle unità per il carico al blocco successivo (se il blocco precedente y_{i-1} non contiene unità all'istante t , allora ragionevolmente non vi saranno ingressi al blocco $i+1$ durante l'intervallo Δt , viceversa se il blocco precedente contiene unità);

- la funzione gradino

$$\text{heaviside}(m_i - y_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } m_i \geq y_i \\ 0 & \text{se } m_i < y_i \end{cases}$$

anch'essa *limitatore di flusso*, in quanto se il blocco in esame, all'istante t , contiene un numero di unità inferiore alla capacità massima, allora ragionevolmente potranno essere accolte unità provenienti dal blocco precedente, viceversa, essendo già saturo, arresta il flusso di unità.

In maniera analoga il secondo termine si compone di un prodotto tra i seguenti fattori:

1. il tasso di lavoro b tipico delle risorse presenti a valle del nodo;
2. la funzione gradino

$$\text{heaviside}(y_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } y_i \geq 0 \\ 0 & \text{se } y_i < 0 \end{cases}$$

per cui, se nel blocco in esame non sono presenti unità all'istante t , allora ragionevolmente non vi saranno uscite dirette al blocco $i+1$ durante l'intervallo Δt , viceversa vi sarà un'uscita diretta al blocco $i+1$;

3. la funzione gradino

$$\text{heaviside}(m_{i+1} - y_{i+1}) = \begin{cases} 1 & \text{se } m_{i+1} \geq y_{i+1} \\ 0 & \text{se } m_{i+1} < y_{i+1} \end{cases}$$

per cui, se il blocco successivo, all'istante t , contiene un numero di unità inferiore alla capacità massima, allora ragionevolmente potranno uscire unità provenienti dal

We can see that for reasons related to the numerical convergence of the method, after some simulation attempts, the multiplicative factors a e b of the standard equation (2) have been modified in $(a, a \cdot y_{i-1})$ and in $(b, b \cdot y_i)$; this has allowed us to solve some problems that arose in case the system work rates took on very similar values.

Analysing the structure of the equation (2), at the first member there is the time derivative of the i -th variable, while at the second member we can notice the presence of two terms: a first term, constituting the fraction of the incoming unit in the node, is characterised by a product of the following factors:

- *the work rate a typical of the resources present upstream of the node;*
- *the heaviside function;*

$$\text{heaviside}(y_{i-1}) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_{i-1} \geq 0 \\ 0 & \text{if } y_{i-1} < 0 \end{cases}$$

that acts as a flow limiter, arresting or allowing the progress of the units for loading to the next block (if the previous block y_{i-1} does not contain units at instant t , then reasonably there will be no entrances to block y_i during the interval Δt , conversely if the previous block contains units);

- *the heaviside function*

$$\text{heaviside}(m_i - y_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_i \geq y_i \\ 0 & \text{if } m_i < y_i \end{cases}$$

also a flow limiter, because if the block under study, at instant t , contains a number of units below the maximum capacity, then reasonably units from the previous block may be accepted, vice versa, being it already saturated, the flow of units stops.

Similarly the second term consists of a product between the following factors:

1. *the work rate b typical of the resources present upstream of the node;*
2. *the heaviside function*

$$\text{heaviside}(y_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i \geq 0 \\ 0 & \text{if } y_i < 0 \end{cases}$$

so, if in the block under study there are no units at instant t , then reasonably there will be no direct exits at block $i+1$ during the interval Δt , conversely there will be a direct exit to block $i+1$;

3. *the heaviside function*

$$\text{heaviside}(m_{i+1} - y_{i+1}) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_{i+1} \geq y_{i+1} \\ 0 & \text{if } m_{i+1} < y_{i+1} \end{cases}$$

so, if the next block, at instant t , contains a number of units below the maximum capacity, then reasonably units from the i -th block can exit, vice versa, being it already saturated, it cannot receive additional units.

From these observations it is possible to say that a necessary condition, so that a functional block can receive

blocco i-esimo, viceversa, essendo già saturo, non potrà accogliere ulteriori unità.

Da queste osservazioni è possibile affermare quindi che condizione necessaria affinché un blocco funzionale possa accogliere unità in un determinato istante temporale è che esso non sia saturo e che siano presenti unità in uscita dal blocco precedente; tuttavia affinché un numero di unità possano uscire da un blocco è necessario che il blocco successivo non sia saturo.

Poiché le equazioni sono accoppiate, il termine descrivente l'uscita da un blocco funzionale coincide con il termine in ingresso del blocco funzionale successivo, in virtù del principio di conservazione del flusso precedentemente enunciato.

In sintesi, una volta individuate le zone del terminal in grado di svolgere la funzione di accumulo temporaneo per le unità (nodi) e le attività che le mettono in relazione (archi), è possibile procedere alla scrittura del sistema di equazioni ordinarie differenziali accoppiate, con le relative condizioni iniziali.

La validazione del modello è stata di tipo fisico, verificando quindi che il numero di unità entranti nel sistema coincidesse con quello delle unità in uscita; si è inoltre verificato che, in condizioni ordinarie, il *transit-time* di tali unità rispecchiasse i tassi di lavoro delle apparecchiature e la disponibilità di slot liberi nel deposito. Ai fini dell'implementazione del modello, è possibile utilizzare il software numerico Matlab, che offre la possibilità di scegliere il metodo di integrazione più adeguato in relazione alla precisione numerica che si vuole ottenere. Per quanto riguarda l'algoritmo di risoluzione numerica, si è scelto di utilizzare la funzione predefinita "ODE45", che presenta il vantaggio di essere una funzione di tipo *adattativo*, ovvero il passo di integrazione viene calcolato dalla *function* stessa, in modo da assicurare che l'errore locale sia di ordine pari ad una tolleranza prefissata dall'utente.

6. Esempi di simulazioni di un terminal intermodale

Le simulazioni a cui si fa riferimento in questo contesto sono state riferite sia ad un terminal intermodale caratterizzato da una movimentazione delle unità per il carico orizzontale sia ad un terminal tradizionale dotato di gru a portale.

Tra le differenti ipotesi progettuali, si è scelto di assumere un'operatività giornaliera del terminal pari a 23 ore (superiore all'operatività ordinaria dei terminal attuali, di circa 13-14 ore al giorno), con un ingresso consentito agli automezzi pari a 18 ore, al fine di valutare le massime potenzialità del sistema.

Nel dimensionamento funzionale del terminal, in base alle diverse condizioni operative proposte, si è tenuto conto anche del livello di servizio da garantire agli automezzi in arrivo (in particolare si è scelto di ridurre al minimo i

units in a given instant of time, is that it is not full and that there are outgoing units from the previous block; however for a number of units to exit a block it is necessary that the next block is not saturated.

Since the equations are coupled, the term describing the exit from a functional block coincides with the entry term of the next functional block, by virtue of the principle of conservation of the previously stated flow.

In summary, once identified the terminal areas that can perform the temporary storage function for the units (nodes) and the activities that correlate them (strings), we can proceed with writing the ordinary differential coupled equations system, with the related initial conditions.

The model validation was of a physical type, checking that the number of incoming units in the system coincides with that of the outgoing units; it was also verified that, in normal conditions, the transit time of these units reflects the work rates of equipment and the availability of free slots in the deposit. For the purposes of the implementation of the model, we can use the Matlab numerical software that offers the possibility of choosing the most appropriate integration method in relation to the numerical precision to be obtained. Regarding the algorithm of numerical solution, it was decided to use the ODE45 built-in function, which has the advantage of being an adaptive type function, i.e. the integration step is calculated by the function itself, so as to ensure that the local error is of order equal to a tolerance pre-set by the user.

6. Examples of simulations of an intermodal terminal

The simulations referenced in this context have been referred to both an intermodal terminal with handling of horizontal units for load and a traditional terminal equipped with gantry cranes.

Between the various design assumptions, we chose to assume a day-to-day terminal operation equal to 23 hours (higher than the ordinary operation of current terminals, of approximately 13-14 hours a day), with an allowed entrance to the vehicles of 18 hours, in order to assess the maximum potential of the system.

In the functional dimensioning of the terminal, according to the different operating conditions proposed, account was taken also of the level of service to ensure to the incoming vehicles (in particular it was chosen to minimise waiting time, assuming a maximum stay inside the terminal equal to 60 minutes); the temporary layover time of ITUs at storage areas was determined iteratively, sizing the amplitude of such areas as a function of the most critical time window of the day (the one with highest concentration of incoming ITUs) for each scenario assumed.

Convoys consisting of 20 SGNS type wagons were considered pulled by E. 402B type locomotives.

For the purpose of analyses of potential, two different

tempi d'attesa, supponendo una permanenza massima all'interno del terminal pari a 60 minuti); il tempo di sosta temporaneo delle UTI presso le zone di stoccaggio è stato determinato in maniera iterativa, dimensionando per ogni scenario ipotizzato l'ampiezza di tale aree in funzione della finestra temporale più critica della giornata (quella con maggiore concentrazione di UTI in arrivo).

Sono stati considerati convogli costituiti da 20 carri di tipo SGNS, trainati da locomotori di tipo E.402B.

Al fine delle analisi di potenzialità, sono state prese in considerazione due diverse funzioni matematiche descrittive il numero e la distribuzione degli ingressi degli automezzi al terminal durante la giornata, in particolare:

- una funzione costante a valore unitario, corrispondente ad una frequenza d'ingresso pari ad 1 automezzo/min, per un totale di 1080 automezzi giornalieri;
- una funzione costante a tratti e non sempre a valore unitario, con un totale di 347 automezzi in ingresso al giorno; in tal caso, si è fatto riferimento a dati reali inerenti al numero medio di arrivi presso i gate del Porto di Genova, durante una giornata tipo.

Per quanto riguarda la modellazione matematica, si riporta la proposta progettuale avanzata in relazione al lay-out di un modulo ferroviario tipo di un terminal dotato di gru a portale, nonché la conseguente rappresentazione attraverso l'uso di blocchi funzionali ed archi e il relativo modello matematico (figg. 3 e 4).

Dalla rappresentazione grafica è possibile osservare che ogni "modulo tipo" presenta i seguenti elementi funzionali:

- due binari passanti, di lunghezza adeguata per ospitare convogli merci costituiti da 20 carri;
- una zona adibita all'accoglienza degli automezzi in ingresso al modulo (gate);
- una zona di sosta temporanea per gli automezzi che attendono di essere scaricati dai reach stacker;
- due gru a portale che eseguono le operazioni di caricamento/scaricamento dei treni prelevando/depositando le UTI dalla/nella zona di stoccaggio, operando simultaneamente;
- 2 corsie stradali per gli automezzi di larghezza (due per il carico/scarico le due per lo scorrimento dei veicoli);
- 1 corsia riservata al movimento dei reach stacker;

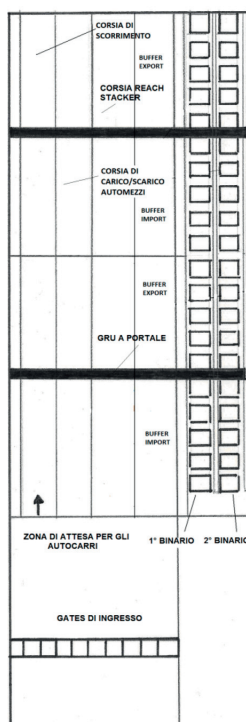


Fig. 3 - Proposta di layout di un modulo del terminal con gru a portale e relativo schema di modellazione matematica.

Fig. 3 - Layout proposal of a terminal module with gantry cranes and its mathematical modelling scheme.

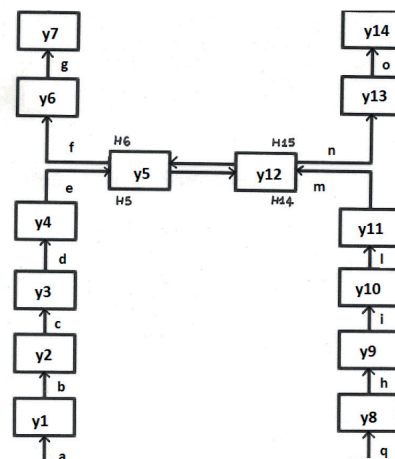
mathematical functions describing the number and distribution of vehicle entrances to the terminal during the day have been taken into consideration, in particular:

- a constant function of unit value, corresponding to an entry frequency of 1 vehicle/min, for a total of 1080 daily vehicles;
- a constant function at time and not always with a unitary value, with a total of 347 inbound vehicles per day; in this case, reference was made to actual data relating to the average number of arrivals at the gates of the Port of Genoa, during a typical day.

With regard to mathematical modelling, the project proposal in relation to the lay-out of a railway type module of a terminal equipped with gantry cranes is reported, and the consequent representation through the use of functional blocks and strings and its mathematical model (figg. 3 and 4).

From the graphical representation, we can see that each module type has the following functional elements:

- two through tracks, of adequate length to accommodate cargo convoys consisting of 20 wagons;



$$\begin{aligned}
 y'_1 &= a - \min(b, y_1, b) \cdot G(y_1) \cdot G(m2 - y_2) \\
 y'_2 &= \min(b, y_1, b) \cdot G(y_1) \cdot G(m2 - y_2) - \min(c, y_2, c) \cdot G(y_2) \cdot G(m3 - y_3) \\
 y'_3 &= \min(c, y_2, c) \cdot G(y_2) \cdot G(m3 - y_3) - \min(d, y_3, d) \cdot G(y_3) \cdot G(m4 - y_4) \\
 y'_4 &= \min(d, y_3, d) \cdot G(y_3) \cdot G(m4 - y_4) - [\min(e, y_4, d) \cdot G(y_4) \cdot G(m5 - y_5)] \cdot H_H \\
 y'_5 &= [\min(e, y_4, d) \cdot G(y_4) \cdot G(m5 - y_5)] \cdot H_5 - [\min(f, y_5, f) \cdot G(y_5) \cdot G(m6 - y_6)] \cdot H_6 \\
 y'_6 &= [\min(f, y_5, f) \cdot G(y_5) \cdot G(m6 - y_6)] \cdot H_6 - \min(g, y_6, g) \cdot G(y_6) \cdot G(m7 - y_7) \\
 y'_7 &= \min(g, y_6, g) \cdot G(y_6) \cdot G(m7 - y_7) \\
 y'_8 &= q - \min(h, y_8, h) \cdot G(y_8) \cdot G(m9 - y_9) \\
 y'_9 &= \min(h, y_8, h) \cdot G(y_8) \cdot G(m9 - y_9) - \min(i, y_9, i) \cdot G(y_9) \cdot G(m10 - y_{10}) \\
 y'_{10} &= \min(i, y_9, i) \cdot G(y_9) \cdot G(m10 - y_{10}) - \min(l, y_{10}, l) \cdot G(y_{10}) \cdot G(m11 - y_{11}) \\
 y'_{11} &= \min(l, y_{10}, l) \cdot G(y_{10}) \cdot G(m11 - y_{11}) - [\min(m, y_{11}, m) \cdot G(y_{11}) \cdot G(m12 - y_{12})] \cdot H_{14} \\
 y'_{12} &= [\min(m, y_{11}, m) \cdot G(y_{11}) \cdot G(m12 - y_{12})] \cdot H_{14} - [\min(n, y_{12}, n) \cdot G(y_{12}) \cdot G(m13 - y_{13})] \cdot H_{15} \\
 y'_{13} &= [\min(n, y_{12}, n) \cdot G(y_{12}) \cdot G(m13 - y_{13})] \cdot H_{15} - \min(o, y_{13}, o) \cdot G(y_{13}) \cdot G(m14 - y_{14}) \\
 y'_{14} &= \min(o, y_{13}, o) \cdot G(y_{13}) \cdot G(m14 - y_{14})
 \end{aligned}$$

Fig. 4 - Sistema di equazioni differenziali del 1° ordine per la simulazione numerica del terminal proposto. G rappresenta la funzione gradino (heaviside) precedentemente esposta.
Fig. 4 - System of differential equations of the first order for the numerical simulation of the proposed terminal. G is the heaviside function (heaviside) previously explained.

- 1 fila destinata allo stoccaggio delle UTI sotto gru (un buffer import e un buffer export per ogni gru).

Secondo tale schema, gli autocarri percorrono un tratto di circa 500 m prima di giungere ai *gate* di ingresso relativi al binario in cui devono rilasciare l'unità di carico da essi trasportata; tale percorso può essere considerato come la distanza che intercorre tra il punto di accesso al terminal e la barriera di accettazione e controllo preposta ad ogni binario. In seguito ad un'eventuale sosta di attesa presso una zona caratterizzata da un preciso numero di stalli, gli automezzi percorrono la corsia stradale a loro riservata, sotto gru, al fine di raggiungere una delle due zone di competenza delle gru, dove saranno scaricati dal primo *reach stacker* disponibile, che provvederà a prelevare l'UTI e a posizionarla nella zona di stoccaggio adiacente.

Successivamente l'automezzo raggiungerà la "zona export" del modulo, dove un altro *reach stacker* provvederà a caricare l'unità prelevata dall'area di stoccaggio, in cui vengono depositati dalla gru le unità giunte nel terminal via ferrovia.

Le UTI in arrivo dal trasporto stradale, anche in questo caso, dopo essere state depositate dai *reach stacker* nella "zona export", verranno prelevate dalla gru a portale e posizionate sul carro di uno dei due treni; una volta che un treno giunto su uno dei due binari sia stato scaricato (completamente o anche solo parzialmente) dalla gru, la stessa provvederà all'operazione di caricamento, prelevando le unità presenti nella zona di stoccaggio di competenza (lato import) per posizionarla sui carri ferroviari.

In relazione alla funzione gateway, si è ipotizzato che le due gru effettuino contemporaneamente le operazioni di trasbordo delle unità tra i due treni contigui, le quali avvengono dopo lo scaricamento dei treni ma pri-

- an area dedicated to the reception of incoming vehicles to the module (gate);
- a temporary parking area for vehicles that are waiting to be unloaded by reach stackers;
- two gantry cranes that perform loading/unloading of trains collecting/depositing the ITUs from/in the storage area, operating simultaneously;
- 2 road lanes for vehicles 3.5 m wide (two for loading/unloading the two for vehicle flow);
- 1 lane reserved for reach stacker movement;
- 1 row intended for storage of ITUs under crane (one import buffer and one export buffer for each crane).

According to this scheme, trucks running along a stretch of about 500 metres before arriving at the entrance gates of tracks where they must release the loading unit carried; this path can be considered as the distance between the point of access to the terminal and the acceptance and control barrier designated for each track. Following an eventual waiting stop in an area characterised by a precise number of stalls, vehicles travel the road lanes reserved to them, under the crane, in order to reach one of two areas of competence of the cranes, where they will be unloaded by the first reach stacker available, that will pick up the ITU and place it in the adjacent storage area.

The vehicle will then reach the export area of the module, where another reach stacker will load the unit taken from the storage area, in which the units arrived in the terminal via rail are deposited by the crane.

The ITUs coming from road transport, even in this case, after having been deposited by the reach stackers in the export area, will be picked up by the gantry crane and placed on the wagon of one of the two trains. Once a train arrived on one of the two tracks has been unloaded (fully or even partially) by the crane, the same will take care of the loading operation, taking the units present in the competent storage area (import side) and placing them on the train wagons.

In connection with the gateway function, it has been suggested that the two cranes carry out the transshipments of the units between the two trains simultaneously, which take place after unloading of the trains but before loading of the ITUs coming from road transport.

Each train, once it reaches the relevant track, only after being unloaded and loaded (both of the ITUs from vehicles and the ITUs from the train on the adjacent track) can leave the terminal, clearing the track, which will accommodate a new train.

According to this functional scheme, 14 state variables y are identified, corresponding to the number of units for

ma del caricamento delle UTI provenienti dal trasporto stradale.

Ogni treno, una volta giunto al binario di pertinenza, solo dopo esser stato scaricato e caricato (sia delle UTI provenienti dagli automezzi sia delle UTI provenienti dal treno del binario adiacente) potrà lasciare il terminal, liberando il binario, che accoglierà un nuovo treno.

Secondo tale schema funzionale, si individuano 14 variabili di stato y , corrispondenti al numero di unità per il carico presenti presso una particolare zona o dispositivo del sistema in un determinato istante di tempo; in particolare per il "ramo" relativo al 1° binario si individuano:

- $y1$: numero di mezzi pesanti presenti nello spazio che intercorre tra l'ingresso del terminal e i *gate* di accesso del binario di un modulo;
- $y2$: numero di mezzi pesanti che sono serviti ai varchi del *gate* d'ingresso;
- $y3$: numero di mezzi pesanti che sostano temporaneamente nella zona d'attesa, prima di essere scaricati dai *reach stacker*;
- $y4$: numero di unità per il carico presenti nelle zone di stoccaggio (import);
- $y5$: numero di unità presenti sul treno;
- $y6$: numero di unità presenti nelle zone di stoccaggio export;
- $y7$: numero di unità caricate sugli automezzi.

In maniera speculare, per il ramo relativo al 2° binario, si avranno i medesimi blocchi funzionali.

Si sottolinea tuttavia che alcuni parametri assunti come fissi, in realtà, potrebbero essere anche considerati variabili, quali ad esempio il numero di carri costituenti i convogli, oppure la scelta di utilizzare determinate apparecchiature. A seconda del tipo di analisi, il progettista, a monte delle simulazioni, può quindi scegliere quali elementi del sistema considerare variabili e quali no.

In particolare, per entrambe le tipologie di terminal sono state effettuate simulazioni caratterizzate da diverse percentuali di scaricamento dei convogli ferroviari (40%-80%-100%, con sbilanciamento verso il traffico combinato oppure verso la funzione gateway).

In reazione alla funzione di ingresso (domanda) il modello matematico quindi ha permesso di:

- dimensionare il terminal (numero di moduli ferroviari, numero e condizioni operative delle attrezzature, capacità delle zone di stoccaggio, livelli di servizio offerti per gli automezzi, numero e frequenza di treni giornalieri);
- valutare la potenzialità massima dell'impianto, intesa come capacità residua totale al fine di quantificare il numero totale di treni servibili e di unità complessivamente movimentabili.

Si riporta qui di seguito un esempio di simulazione

the load present in a particular area or system device at a given instant of time; in particular for the "branch" relating to the 1st track, the following are identified:

- $y1$: *number of heavy vehicles present in the space between the entrance to the terminal and the track access gate of a module;*
- $y2$: *number of heavy vehicles that are served at the entrance gates passages;*
- $y3$: *number of heavy vehicles that stop temporarily in the waiting area before being unloaded by the reach stackers;*
- $y4$: *number of units for loading in these storage areas (import);*
- $y5$: *number of units present on the train;*
- $y6$: *number of units present in the export storage areas;*
- $y7$: *number of units loaded on vehicles.*

Symmetrically, for the branch relating to the 2nd track, we will have the same functional blocks.

We must however underline that some parameters given as fixed, in fact, might also be considered as variable, such as the number of wagons constituting the convoys, or the choice of using certain equipment. Depending on the type of analysis, the designer, upstream of the simulations, can then choose which elements of the system to consider as variables and which not.

In particular, simulations were carried out for both types of terminals with different percentages of unloading of trains (40% -80% -100%, with unbalance towards combined traffic or gateway function).

In response to the input function (demand) the mathematical model therefore allowed:

- *sizing the terminal (rail modules number, number and operating conditions of equipment, capacity of storage areas, service levels offered for vehicles, number and frequency of daily trains);*
- *evaluate the maximum potential of the system, understood as residual total capacity in order to quantify the total number of useful trains and units altogether handled.*

Below is an example of numerical simulations carried out in relation to a terminal equipped with devices for vertical transshipment of ITUs (rail gantry cranes), considering a condition of unloading/loading of trainsets equal to 40%. Among the main output provided by the Matlab numerical software, the entry function at one of the tracks (fig. 5), the number of load units present in the waiting area between the gates and buffers (fig. 6), sequencing of unloading/loading operations of trains (fig. 7) and the number of units for load taken sequentially from vehicles (fig. 8) are reported.

Among the many simulations carried out, certainly those related to a non-constant entry function and with variable value, have allowed highlighting some interesting aspects in relation to the potential of such intermodal nodes. Although a horizontal transshipment terminal pre-

numerica effettuata, in relazione ad un terminal dotato di apparecchiature per il trasbordo verticale delle UTI (gru a portale su rotaia), considerando una condizione di scaricamento/caricamento dei convogli pari al 40%. Tra i principali output forniti dal software numerico Matlab, sono riportati la funzione di ingresso presso uno dei binari (fig. 5), il numero di unità per il carico presenti nella zona di attesa tra i *gate* e i *buffer* (fig. 6), la sequenzialità delle operazioni di scarico/carico dei convogli ferroviari (fig. 7) e il numero di unità per il carico prelevate sequenzialmente dagli automezzi (fig. 8).

Tra le molteplici simulazioni effettuate, sicuramente quelle inerenti ad una funzione di ingresso non costante e a valore variabile, hanno permesso di mettere in luce alcuni aspetti interessanti in relazione alle potenzialità di tali nodi intermodali. Benché un terminal a trasbordo orizzontale presenti numerosi vantaggi rispetto ad un terminal tradizionale (minor numero di binari ferroviari, minor estensione delle zone di stoccaggio, minori tempi d'attesa per gli automezzi, maggior rapidità delle operazioni di caricamento/scaricamento dei treni), esso prevede più elevati investimenti in attrezzature e macchinari, nonché impianti di controllo e rilevamento complessi.

Tuttavia si è riscontrato che per entrambe le tipologie, in relazione ad esempio ad una domanda reale corrispondente al numero medio di automezzi che giungono giornalmente presso il terminal portuale di Genova (domanda di 347 automezzi), la minor produttività dell'impianto si verifica nel caso di convogli scaricati completamente, con funzione del terminal rivolta solo al traffico combinato (lunghi tempi delle operazioni di carico/scarico e alto numero di unità caricate sui treni) mentre quella massima si raggiunge nel caso di convogli scaricati/caricati al 40% con sbilanciamento maggiore verso la funzione gateway (tempi di caricamento piuttosto brevi e poche unità caricate su ogni treno).

Relativamente al caso di maggior produttività (tabella 1), si è calcolata la capacità residua nei due casi, ovvero quanti treni aggiuntivi sarebbe possibile programmare rispetto alla domanda di riferimento (quindi quante unità in più sarebbe possibile movimentare) al fine di valutarne le potenzialità massime: tale calcolo è stato effettuato considerando un tempo complessivo di 150 minuti riservato alle operazioni di manutenzione e un distanziamento temporale minimo pari a 5 minuti tra due treni successivi che si apprestano ad occupare il medesimo binario. I tempi di attesa degli automezzi sono funzione del numero di automezzi presenti in coda all'ingresso del terminal stesso (quindi della distribuzione della domanda), nonché della disponibilità o meno di slot libere nella zona di buffer.

Considerando la domanda di 347 automezzi/giorno, un terminal con funzione mista, indipendentemente dalla tecnica di carico impiegata, con percentuale di scaricamento media dei convogli pari al 40% e sbilanciamento verso la funzione gateway, permette un incremento delle

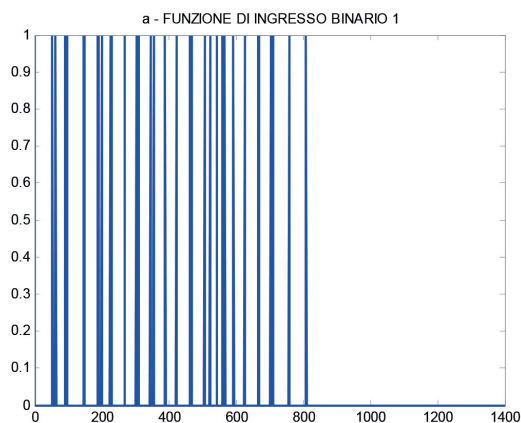


Fig. 5 - Distribuzione temporale del numero di automezzi che giungono presso uno dei binari del modulo ferroviario (domanda costante a tratti per ogni singolo binario).

Fig. 5 - Time distribution of the number of vehicles arriving at one of the tracks of the railway module (constant demand at intervals for every single track).

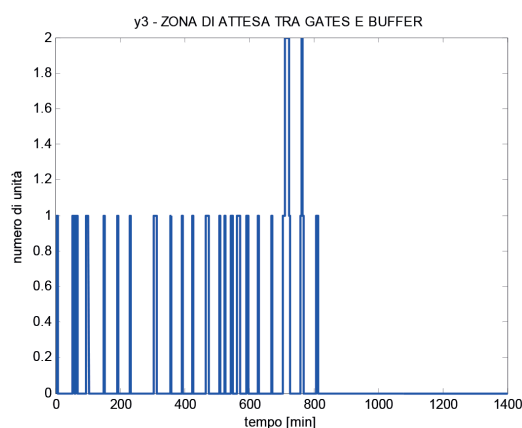


Fig. 6 - Distribuzione temporale del numero di unità per il carico presenti nella zona di attesa tra i gate e il buffer, in attesa di essere prelevate da reach stacker.

Fig. 6 - Time distribution of number of units for load in the waiting area between the gates and the buffer, waiting to be picked up by reach stackers.

sents numerous advantages compared to a traditional terminal (less railway tracks, minor extension of storage areas, less waiting time for vehicles, faster train load/unload operations), it envisages higher investments in equipment and machinery, as well as complex tracking and control systems.

However it was found that for both types, in relation for example to a real demand corresponding to the average number of vehicles that arrive daily at the port terminal in Genoa (demand of 347 vehicles), the reduced productivity

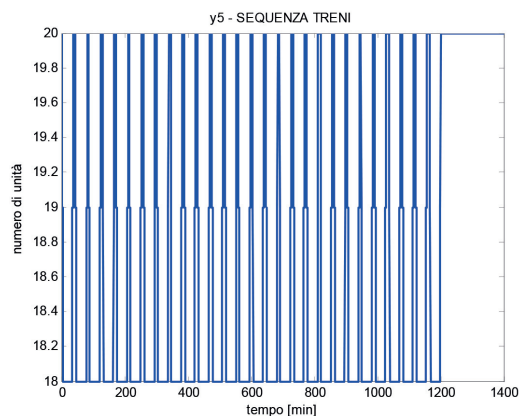


Fig. 7 - Sequenzialità delle operazioni di scarico/carico dei convogli ferroviari che si apprestano ad essere serviti presso un binario; ogni spezzata, rappresentante un singolo convoglio giunto presso il binario operativo in esame, è costituita da due rami: il ramo sinistro rappresenta il numero di unità che vengono scaricate dal convoglio (2 unità) mentre il ramo destro rappresenta il numero di unità che vengono caricate (2 unità). Il tratto orizzontale invece simula il periodo di tempo necessario al trasbordo relativo di unità per il carico tra i due treni contigui dello stesso modulo ferroviario (ogni treno "cede" e "acquista" 6 unità al/dal treno contiguo, con incremento netto del numero di unità pari a zero). Si noti che nel caso specifico si susseguono sul medesimo binario 28 convogli.

Fig. 7 - Sequencing of unloading/loading operations of trains that are about to be served at a track; each segment, representing a single convoy arrived at the operating track under consideration, consists of two branches: the left represents the number of units that are unloaded from the convoy (2 units) while the right branch represents the number of units that are loaded (2 units). The horizontal section instead simulates the transfer time necessary relating to the units for loading between two contiguous trains of the same rail module (each train "gives up" and "acquires" 6 units to/from the contiguous train, with a net increase in the number of units equal to zero). Note that in this case 28 convoys follow one another on the same track.

unità movimentate pari al +20,7% per un terminal a trasbordo orizzontale e pari al +13,22% per un terminal tradizionale, per un totale di circa 1.200.000 unità annue.

Si è riscontrato inoltre che i terminal progettati esclusivamente per il traffico combinato, presentano una capacità residuale maggiore: ciò mette in evidenza come tale esclusiva funzione non permetta di sfruttare a pieno la potenzialità intrinseca del terminal stesso; risulta quindi evidente la necessità di terminal che svolgano anche la funzione gateway al fine di smaltire maggiori volumi di traffico.

7. Risultati finali

Le simulazioni effettuate hanno permesso di individuare alcuni parametri caratteristici, raccolti nella tabella tabella 2, che potrebbero essere direttamente utilizzati da

of the system occurs in the case of convoys unloaded completely, with the terminal function only addressed to combined traffic (long loading/unloading times and high number of units loaded on trains), while the maximum one is reached in case of convoys unloaded/loaded at 40% with increased imbalance towards the gateway function (rather short loading times and a few units loaded on each train).

Concerning the case of greater productivity (table 1), the residual capacity was calculated in both cases - how many additional trains would it be possible to programme compared to the reference demand (hence how many more units would it be possible to handle) in order to evaluate the maximum potential: this calculation was carried out considering an overall time of 150 minutes reserved for maintenance operations and a minimum time delay of 5 minutes between two subsequent trains that are preparing to occupy the same track. The vehicle wait times are a function of the number of vehicles present in the queue at the entrance of the terminal itself (therefore the distribution of the demand), as well as the availability or not of free slots in the buffer area.

Considering the demand of 347 vehicles/day, a terminal with mixed function, regardless of the loading technique used, with a convoy unload average percentage of 40% and

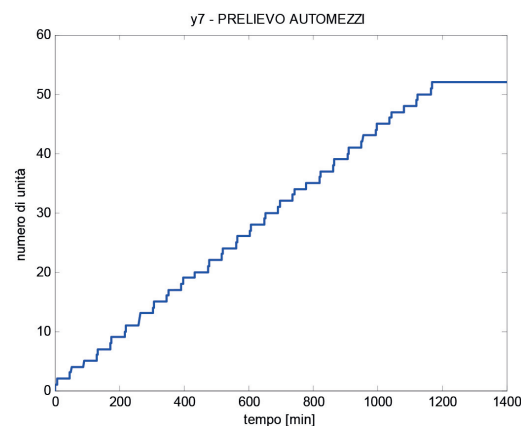


Fig. 8 - Distribuzione temporale del numero di unità per il carico presenti nella zona di buffer e prelevate in successione dagli automezzi; ogni gradino rappresenta il momento temporale in cui una singola unità viene prelevata dal buffer tramite reach stacker e caricata su un singolo automezzo. Si ipotizza quindi presso ogni binario la presenza di un automezzo sempre disponibile in grado di prendere in consegna un'unità, senza che essa debba attendere il suo arrivo. Si osserva che in questo caso giunge presso il binario un automezzo ogni 40 minuti.

Fig. 8 - Time distribution of the number of units for loading in the buffer zone and picked up in succession by the vehicles; each step represents the moment in time when a single unit is picked up by the buffer via the reach stackers and loaded on a single vehicle. The presence of a vehicle always available capable of taking over a unit is therefore assumed at each track, without it having to wait for its arrival. It is noted that in this case a vehicle arrives at the track every 40 minutes.

TABELLA 1 – TABLE 1

CARATTERISTICHE DELLE SIMULAZIONI INERENTI AGLI SCENARI DEI TERMINAL CARATTERIZZATI DA MASSIMA PRODUTTIVITÀ. IL NUMERO DI MODULI NECESSARI DERIVA DAGLI SCENARI SIMULATI A MAGGIOR PRODUTTIVITÀ (SCARICAMENTO/CARICAMENTO DEI TRENI PARI AL 40%, CONSIDERANDO PER OGNI TRENO UNO SCARICAMENTO/CARICAMENTO DI SOLO 2 UNITÀ PER LA FUNZIONE COMBINATO E 6 UNITÀ PER IL SERVIZIO GATEWAY), PER FAR FRONTE AD UNA DOMANDA IN INGRESSO PARI A 347 AUTOMEZZI/GIORNO

SIMULATION FEATURES RELATING TO TERMINAL SCENARIOS CHARACTERISED BY MAXIMUM PRODUCTIVITY. THE NUMBER OF MODULES NEEDED DERIVES FROM THE SCENARIOS SIMULATED AT GREATER PRODUCTIVITY (UNLOADING/LOADING OF TRAINS EQUAL TO 40%, CONSIDERING FOR EACH TRAIN AN UNLOAD/LOAD OF ONLY 2 UNITS FOR THE COMBINED FUNCTION AND 6 UNITS FOR THE GATEWAY SERVICE), TO DEAL WITH AN ENTRANCE DEMAND OF 347 VEHICLES/DAY

	Terminal a trasbordo orizzontale <i>Horizontal transshipment terminal</i>	Terminal tradizionale (gru a portale) <i>Traditional terminal (gantry crane)</i>
Numero di moduli <i>Number of modules</i>	5 (10 binari) <i>5 (10 tracks)</i>	6 (12 binari) <i>6 (12 tracks)</i>
Macchine e attrezzature per modulo ferroviario <i>Machinery and equipment for rail module</i>	2 carri tr. per combinato <i>2 wagons for combined</i> 4 carri tr. per gateway <i>4 wagons for gateway</i> 3 reach stackers 2 gru a portale (90-110 m/min) <i>2 gantry cranes (90-110 m/min)</i>	2 gru a portale con velocità: <i>2 gantry cranes with speed:</i> 100 m/min per il portale <i>100 m/min for the gantry</i> 130 m/min per il carrello <i>130 m/min for the trolley</i> 2 reach stackers
Capacità zone di stoccaggio <i>Capacity of the storage areas</i>	2 zone di stoccaggio 10 slot <i>2 storage areas – 10 slot</i>	2 zone di stoccaggio (1 da 10 slot l'altra da 20-30 slot) <i>2 storage areas (1 composed of 10 slots and the other of 20-30 slots)</i>
Treni/giorno <i>Trains/day</i>	420	394
Tempo di sosta dei convogli <i>Convoy sosta times</i>	28,89 min	38,09 min
Tempo di attesa automezzi <i>Truck waiting times</i>	7 min	7 ÷ 55 min
Unità movimentate / giorno <i>Units handled / day</i>	3359 <i>3359</i>	3351 <i>3151</i>
Unità movimentate / anno <i>Units handled / year</i>	1209240 302400 per combinato 907200 per gateway <i>1209240</i> 302400 for combined 907200 for gateway	1134360 283320 per combinato 851040 per gateway <i>1134360</i> 283320 for combined 851040 for gateway

parte delle Amministrazioni o negli studi di progettazione per una valutazione di massima delle caratteristiche impiantistico-operative e delle potenzialità che un determinato terminale ferroviario debba avere, sia in relazione alla domanda di traffico del momento, sia in un'ottica di espansione dello stesso, facendo riferimento a possibili scenari di crescita futuri del traffico merci. Si sottolinea infatti come la progettazione dei terminali ferroviari si sia basata fino ad oggi prevalentemente sullo studio dei layout e sull'analisi delle prestazioni di terminal già esistenti, in relazioni alla specifica domanda che li caratterizza; tuttavia tale approccio non sempre ha portato a risultati soddisfacenti: non è raro infatti riscontrare nel passato la realizzazione di terminali, ma in generale di opere infrastrutturali e impianti, che in poco tempo abbiano raggiunto livelli di saturazione non preventivati a causa di una forse

imbalance towards the gateway function, allows an increase of units handled equal to +20.7% for a horizontal transshipment terminal and equal to +13.22% for a traditional terminal, for a total of approximately 1.200.000 units per year.

It was also found that the terminals designed exclusively for combined transport, have an increased residual capacity: this highlights how this exclusive feature does not allow to take full advantage of the intrinsic potential of the terminal itself; the need for terminals that perform the gateway function in order to work off higher volumes of traffic is therefore clear.

7. Final results

The simulations undertaken have made it possible to identify some characteristic parameters, collected in the

scorretta analisi della domanda in sede di progettazione; viceversa non è così inusuale riscontrare opere che presentino caratteristiche e prestazioni eccessivamente elevate rispetto all'effettiva domanda da soddisfare, spesso con un ingiustificato spreco di fondi pubblici.

In tal contesto, si sottolinea come le simulazioni siano state effettuate ipotizzando che la rete e il mercato fossero in grado di generare ed assorbire elevate quantità di treni, prescindendo quindi dall'effettiva domanda potenziale di traffico localizzata (oltre alla funzione già definita) nell'intorno del terminal e della potenzialità delle linee; il modello potrebbe tuttavia prevedere l'inserimento di alcune connessioni con lo "spazio esterno" al terminal, includendo l'effettiva capacità della linea ferroviaria e di quella stradale che giungono in prossimità del terminal stesso, tenendo in considerazione quindi anche le condizioni al contorno.

Analizzando i risultati numerici ottenuti dal modello di DALLA CHIARA, MANTI, MARIGO [9], benché sussistano alla base differenti scelte progettuali (lunghezza dei convogli, vincoli di layout, numero di moduli ferroviari, sequenza delle operazioni di carico/scarico), ma ipotesi d'esercizio comuni (365 giorni/anno per circa 24 ore/giorno, con funzione sia di terminal per lo smistamento ferroviario che per il traffico combinato delle UTI), è possibile riscontrare una forte analogia con i risultati qui proposti; entrambi i modelli di simulazione, infatti, forniscono una stima simile della massima potenzialità teorica che un moderno terminal gateway potrebbe offrire; tale valore si attesta intorno al milione di unità movimentabili annualmente, mediante l'impiego di una decina di binari operativi, valore ben superiore all'effettivo utilizzo della maggior parte dei terminal attuali.

Facendo riferimento ai dati reali relativi alle unità movimentate giornalmente presso il terminal intermodale Hupac di Busto Arsizio, si rileva che esso è in grado di movimentare circa 1000 UTI/giorno: esso dispone di 5 binari, 4 gru a portale su rotaia ed una gru a portale gommatata [1]. Avanzando un paragone con i risultati ottenuti in tal contesto per la simulazione relativa ad uno scaricamento dei convogli pari all'80% con sbilanciamento verso il traffico combinato, disponendo di 6 binari e impiegando 3 gru a portale, sarebbe possibile in realtà movimentare circa 1500 UTI/giorno, con un incremento effettivo del 50%, a fronte di un minor investimento in attrezzature (due gru a portale in meno).

Tali risultati sono in linea con l'auspicabile crescita del trasporto intermodale ferroviario, in cui i terminali rappresentano il vero punto di forza per garantire un più efficace e veloce trasferimento delle merci, soprattutto su lunghe e lunghissime distanze. I terminal gateway, attraverso la loro capacità di accogliere un elevato numero di UTI in transito, nonché di consentirne il trasferimento da un modo all'altro di trasporto, costituiscono dunque una risorsa fondamentale per lo sviluppo dell'intermodalità, se correttamente dimensionati e regolati nel loro esercizio (tabella 2).

table in table 2, which could be used directly by Administrations or in design studios for a rough assessment of plant-operative characteristics and of the potential that a given railway terminal should have, both in relation to the traffic demand of the moment, and in the expansion perspective of the same, referring to possible future freight traffic growth scenarios. We must underline how the design of railway terminals is until today based mainly on the study of the lay-outs and on the performance analysis of existing terminals, in relation to the specific demand that characterises them; however, this approach has not always led to satisfactory results: it is indeed common to see the realisation of terminals in the past, but generally of infrastructural works and systems, that before long have reached not budgeted saturation levels due to a perhaps incorrect demand analysis in design; vice versa it is not so unusual to see works with excessively high performance and characteristics compared to the actual demand to meet, often with an unjustified waste of public funds.

In this context, we must stress how the simulations were performed assuming that the network and the market were able to generate and absorb large amounts of trains, irrespective of the actual localised traffic potential demand (in addition to the already defined function) in the range of the terminal and potential of the lines; the model could nevertheless provide for the inclusion of some connections with "outer space" at the terminal, including the actual ability of the railway line and the road that come close to the terminal itself, taking into account also the operating conditions.

Analysing the numerical results obtained by the model DALLA CHIARA, MANTI, MARIGO [9], although there are different underlying design choices (length of convoys, layout constraints, number of rail modules, sequence of loading/unloading), but common operating hypothesis (365 days/year for about 24 hours per day, with both terminal function for rail shunting and for combined transport of ITUs), we can notice a strong analogy with the results proposed here; both simulation models, in fact, provide a similar estimate of the maximum theoretical potential that a modern gateway terminal could offer; this value is around one million units handled annually, using a dozen operating tracks, a value well in excess of the actual use of most of the current terminals.

Referring to actual data concerning units handled daily at the Hupac intermodal terminal of Busto Arsizio, we found that it can handle about 1000 ITUs/day: it has 5 tracks, 4 rail gantry cranes and a wheeled gantry crane [1]. Making a comparison with the results obtained in this context for the simulation on an unloading of convoys equal to 80% with imbalance towards combined transport, with 6 tracks and using 3 gantry cranes, it would actually be possible to handle around 1500 ITUs/day, with an effective increase of 50%, with respect to a smaller investment in equipment (two gantry cranes less).

These results are in line with the desirable growth of intermodal transport, where rail terminals represent the real strong point to ensure a more efficient and fast

TABELLA 2 – TABLE 2

PROPOSTA DI SCHEMA VALUTATIVO PER IL DIMENSIONAMENTO DI TERMINAL FERROVIARI
EVALUATION SCHEME PROPOSAL FOR THE SIZING OF RAILWAY TERMINALS

% scaricamento dei treni % train unloading	40%	40%	80%	80%	100%
Sbilanciamento Imbalance	Combinato Combined	Gateway	Combinato Combined	Gateway	Solo combinato Only combined
Numero dei binary Number of tracks	4 4	10÷12 10÷12	4÷6 4÷6	6÷8 6÷8	4 4
Numero di treni/giorno Number of trains/day	118÷138	394÷420	94÷96	130÷166	29÷31
Tempo di sosta treni Train stabling time	34'÷41'	28'÷38'	50'÷81'	45'÷80'	102'÷148'
Tempo di attesa degli automezzi Truck waiting time	7'÷10'	7'÷55'	10'÷60'	7'÷22'	7'÷10'
Capacità zone stoccaggio per modulo Capacity of storage areas for module	30÷50 slot	10÷30 slot	20÷40 slot	10÷30 slot	10÷30 slot
Unità combinato al giorno Combined units for day	707÷821	787÷839	937÷957	779÷995	1.127÷1.207
Unità gateway al giorno Gateway units for day	236÷272	2.364÷2.520	564÷576	1.300÷1.660	0
Unità totali al giorno Overall units for day	943÷1.093	3.151÷3.359	1.501÷1.533	2.079÷2.655	1.127÷1.207
Unità combinato annue Combined units for year	254.520÷ 295.560	283.320÷ 302.040	337.320÷ 344.520	280.440÷ 358.200	405.720÷ 434.520
Unità gateway annue Gateway units for year	84.960÷ 97.920	851.040÷ 907.200	203.040÷ 207.360	468.000÷ 597.600	0
Unità totali annue Overall units for year	339.400÷ 393.480	1.134.360÷ 1.209.240	540.360÷ 551.880	748.440÷ 955.800	405.720÷ 434.520

8. Conclusioni

Il modello rappresenta uno strumento analitico in grado di simulare le prestazioni di nuovi terminali, al fine di compiere scelte di natura tecnica e gestionale, calibrate sulla base di risultati attendibili.

Esso può risultare utile sia in fase di pre-dimensionamento, al fine di fornire un'idea di massima sull'estensione del terminal per soddisfare una determinata domanda di traffico e per valutare gli effetti derivanti dall'adozione di differenti tecniche di carico, sia in fase di esercizio, per valutare l'effetto dei ritardi dei convogli e degli automezzi sulla potenzialità stessa dell'impianto, nonché il suo funzionamento in condizioni di degrado, dovuto ad esempio a guasti dei macchinari e delle apparecchiature.

Il modello risulta particolarmente vantaggioso sotto diversi aspetti:

- consente di verificare il numero di unità per il carico presenti in ogni zona funzionale del terminal (gate, zone di stoccaggio, treni) ad ogni istante temporale

transfer of goods, especially on long and very long distances. Terminal gateways, through their ability to accommodate a large number of ITUs in transit, and allow their transfer from one transport mode to another, hence constitute a fundamental resource for the development of intermodality, if properly sized and adjusted in their operation (table 2).

8. Conclusions

The model represents an analytical tool capable of simulating the performance of new terminals, in order to make choices of technical and managerial nature, calibrated on the basis of reliable results.

It may be useful both in the pre-sizing phase, in order to provide a rough idea about the extension of the terminal to meet a particular demand for traffic and to assess the effects arising from the adoption of different load techniques, and during the operation phase, to assess the effect of the delays of convoys and vehicles on the same potential of the

durante tutta la giornata, permettendo di determinare il tempo di occupazione di tali aree;

- è adattabile a qualsiasi tipo di sistema dinamico, in quanto è possibile aggiungere o rimuovere blocchi funzionali, modificare la geometria della rete di connessione tra i blocchi stessi ed il valore dei parametri operativi; in relazione ai terminali intermodali, ciò implica che il modello è adattabile a qualsiasi scelta di disposizione delle aree funzionali;
- “accetta” in ingresso qualsiasi tipo di funzione analitica descrivente la distribuzione degli arrivi degli automezzi al terminal (costante, costante a tratti, sinusoidale, trapezoidale, lineare), permettendo di valutare le prestazioni del sistema a seconda del flusso in entrata; tuttavia è possibile anche inserire funzioni in ingresso di tipo probabilistico, considerando che le probabilità di arrivo degli automezzi siano descritte da una distribuzione di Poisson e che la distribuzione degli intervalli di tempo tra due arrivi consecutivi segua un'esponenziale negativa, al fine di valutare i possibili margini di propagazione dei ritardi nella sequenza delle operazioni, nonché i tempi medi di attesa;
- a differenza di molti software commerciali di simulazione, in cui non sempre si conosce l'algoritmo matematico di funzionamento, tale modello permette all'utente di conoscere le approssimazioni numeriche riguardanti il livello di precisione dei risultati; inoltre, rispetto a molti simulatori, in cui una volta inseriti i dati di input il programma restituisce solamente i risultati (output), il modello costruito su Matlab permette di “monitorare” il flusso in ingresso lungo tutto il suo percorso all'interno del sistema, conferendo nello stesso tempo sia un buon livello di dettaglio sia una buona panoramica dell'intero processo sistemico.

La scelta delle attrezzature e della tecnica di carico da adottare per il terminal potrebbe essere facilitata se il modello prevedesse, in appoggio alla sua struttura funzionale di controllo del flusso, anche alcuni funzionali che ottimizzassero ad esempio alcuni parametri operativi: si potrebbe individuare una certa funzione obiettivo che durante il processo di simulazione minimizzasse o massimizzasse tale valore, in relazione alla disponibilità di risorse impiegate (si potrebbe definire ad esempio una funzione “costo delle movimentazioni” che tenga conto dell'utilizzo dell'energia elettrica o di carburanti dei macchinari o delle attrezzature utilizzate in ogni scenario simulato). In generale, l'introduzione di un parametro di controllo adottato come vincolo esterno oppure da ottimizzare, permetterebbe al modello di assumere anche una funzione strumentale nella valutazione economico-gestionale di esercizio o dimensionamento di un terminal.

Per quanto riguarda l'esercizio, inoltre, potrebbe essere utile inserire tale modello in una rete telematica, al fine di mettere in comunicazione la sala di controllo del terminal con gli automezzi stradali in arrivo attraverso

system, as well as its operation in conditions of degradation, due for example, to damage to the machinery and equipment.

The model is particularly advantageous in many ways:

- it allows checking the number of units for loading in each functional area of the terminal (gate, storage areas, trains) at every instant of time throughout the day, allowing to determine the occupation time of these areas;
- it is adaptable to any kind of dynamic system, since blocks can be added or removed, the geometry of the network connection between the same blocks and the value of operating parameters can be modified; in relation to intermodal terminals, this implies that the model is adaptable to any selection of arrangement of the functional areas;
- it accepts at entry any type of analytic function describing the distribution of vehicle arrivals at the terminal (constant, constant at intervals, sinusoidal, trapezoidal, linear), allowing the evaluation of the system performance depending on the incoming flow; however, incoming probabilistic type functions can also be entered, considering that the probabilities of vehicles arriving are described by a Poisson distribution and that the distribution of time intervals between two subsequent arrivals follows a negative exponential distribution, in order to evaluate the possible propagation margins of delays in the sequence of operations, as well as the average waiting times;
- unlike many commercial simulation softwares, where the mathematical algorithm of operation is not always known, this model allows the user to know the numerical approximations regarding the level of accuracy of the results; in addition, compared to many simulators, where once the input data is entered the programme returns only the results (output), the model built on Matlab allows monitoring the incoming flow along its entire path within the system, giving both a good level of detail and at the same time a good overview of the entire systemic process.

The choice of equipment and loading technique to be adopted for the terminal may be facilitated if the model called for, in support to its functional flow control structure, even some functions that could optimise for example certain operational parameters: some objective function could be found that during the simulation process minimises or maximises a certain value, in relation to the availability of the resources employed (a “handling costs” function could be defined taking into account the use of electricity or fuels of machinery or equipment used in each simulated scenario). In general, the introduction of a control parameter adopted as external constraint or to optimise, would allow the model to take on even an instrumental function in the operational economic and management evaluation or dimensioning of a terminal.

Furthermore with regard to the operation it might be

l'uso di sistemi ITS installati a bordo: ciò permetterebbe al gestore del terminal di aggiornare via via la funzione di ingresso del modello; in tal modo esso potrebbe diventare uno strumento dinamico per la gestione in tempo reale del servizio offerto, fungendo da mediatore tra gli orari di programmazione dei treni e gli orari di arrivo degli automezzi; ovviamente quest'ultima applicazione richiederebbe l'adeguamento del parco veicolare, attraverso l'installazione di sistemi georeferenziali.

L'uso della telematica al fine di ottimizzare la gestione dell'esercizio dei terminali infatti, risulta sempre più necessario se si intende puntare all'offerta di un servizio affidabile, puntuale e capace di smorzare gli inconvenienti dovuti a fattori esterni, non direttamente riconducibili al gestore del terminale o alla rete ferroviaria.

Si può osservare in definitiva come la modellistica matematica costituisca in generale un potente strumento di simulazione per lo studio di fenomeni relativi all'Ingegneria ferroviaria.

useful to insert this model in a telematic network, in order to connect the terminal control room with road vehicles arriving, through the use of ITS systems installed on board: this would allow the terminal manager to gradually update the input function of the model; in doing so it could become a dynamic tool for real-time management of the offered service, acting as a mediator between train scheduling times and the arrival times of vehicles; obviously the latter application would require the adaptation of the fleet, through the installation of geo-referenced systems.

The use of telematics to optimise management of terminal operation is indeed increasingly necessary if we intend to focus on the offer of a reliable, punctual service and capable of dampening the inconveniences caused by external factors, not directly connected to the terminal operator or railway network.

We ultimately can see how mathematical modelling is generally a powerful simulation tool for the study of phenomena related to Railway engineering.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] DALLA CHIARA B., "Sistemi di trasporto intermodali: progettazione ed esercizio", EGAF, 2009.
- [2] DALLA CHIARA B., "Considerazioni sulla domanda ed impiego di energia nei sistemi di trasporto / Considerations on the demand and use of energy in the transport systems", Ingegneria ferroviaria, vol. LXV, ISSN: 0020-0956, n. 7-8, pagg. 673-685, july-august 2010.
- [3] DALLA CHIARA B., PELLICELLI M., "On the cost of road-rail combined transport / Sul costo del trasporto combinato strada-rotaia", Ingegneria ferroviaria, vol. LXVI, ISSN: 0020-0956, n. 11, pagg. 951-965, novembre 2011.
- [4] MONACO R., "Le equazioni differenziali e loro applicazioni", ISBN: 8876612165, Celid, Torino, 2003.
- [5] DALLA CHIARA B., "Tecniche di trasbordo", Logistica, anno XLII, ISSN: 0394-4867, n. 4, aprile 2011, pagg. 58-63.
- [6] COSTANTINOS A., ATHANASIOS B., "Development of an expert system for the evaluation of conventional and innovative technologies in the intermodal transport area", European Journal of Operational Research 152, pagg. 410-419, 2004.
- [7] RIZZOLI A.E., FORNARA N., GAMBARDILLA L.M., "A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals", Journal of Mathematics and Computers in Simulation, IMACS Elsevier Science, 2002.
- [8] BENNA T., GRONAT. M., "Generic simulation for rail-road container terminals", Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008.
- [9] DALLA CHIARA B., MANTI E., MARINO M., "Intermodal terminals with gateway function: simulation of their engineering on a study case / Terminali intermodali con funzione gateway: simulazione progettuale su un caso studio", Ingegneria ferroviaria, vol. LXVIII, ISSN: 0020-0956, n. 6, giugno 2013.
- [10] BALDASSARRA A., IMPASTATO S., RICCI S., "Intermodal terminal simulation for operations management", European Transport / Trasporti Europei, n. 46, 2010.
- [11] BELLOMO N., DE ANGELIS E., DELITALA M.E., "Lectures Notes on Mathematical Modelling from Applied Sciences to Complex Systems", ISBN: 9788890570872, 2010.