

Ottimizzazione della circolazione del materiale rotabile e dei processi manutentivi nel breve periodo

Short-term rolling stock rostering and maintenance scheduling optimization

Dott. Ing. Donato CARILLO^(*),
Dott. Ing. Andrea D'ARIANO^(**),
Dott. Ing. Giovanni Luca GIACCO^(***),
Dott. Ing. Dario PACCIARELLI^(***)

Sommario - Questo articolo descrive un nuovo approccio integrato alla turnificazione del materiale rotabile e alla programmazione delle attività manutentive negli impianti di manutenzione. Particolare attenzione è data a nuove formulazioni matematiche per l'ottimizzazione della manutenzione e alla loro sperimentazione sulla base dei risultati della turnificazione del materiale rotabile. Le soluzioni di istanze reali, ottenute mediante l'utilizzo di un solutore commerciale, sono comparate con i programmi manutentivi adottati nella pratica da Trenitalia presso l'impianto di manutenzione di Napoli. Dai risultati dell'analisi emerge che l'integrazione della turnificazione del materiale rotabile con lo scheduling della manutenzione comporta una significativa riduzione sia dei costi operativi sia dei ritardi maturati durante l'esercizio, mediante la minimizzazione dei tempi di attraversamento nelle fasi manutentive, coniugando quindi il rispetto di un alto livello di servizio con la sostenibilità dei costi di esercizio.

1. Introduzione

Molti problemi del settore del trasporto ferroviario possono essere analizzati e risolti utilizzando tecniche della Ricerca Operativa. La gestione del materiale rotabile è una delle principali voci di costo per un'impresa di trasporto ferroviario. La riduzione dei costi operativi passa inevitabilmente per una gestione attenta delle forti relazioni tra turnificazione del materiale rotabile e schedulazione della manutenzione. In un mercato ormai competitivo e multimodale, il RSM (Rolling Stock Management) è un fattore fondamentale di competitività visto che costituisce una leva importante per innalzare i livelli di produttività e allo stesso tempo il livello della qualità erogata di-

Summary - This paper describes an optimization framework for rolling stock rostering and maintenance scheduling at a busy workshop. A new mixed-integer linear-programming formulation is provided for the maintenance scheduling problem faced by Trenitalia (train operating company) managers, with input data taken from the rolling stock rostering plan. The computational results are carried out on a Trenitalia's maintenance site located in Naples. The solutions computed via a commercial MILP solver are compared with practical solutions. A relevant cost reduction is possible by using the proposed framework, involving both rostering and maintenance scheduling. We also show how the proposed method can be used as an effective tool to absorb real-time timetable perturbations while respecting the agreed level of service.

1. Introduction

The railway industry witnesses a variety of the problems that can be modelled and solved by using Operations Research techniques. Rolling Stock Management (RSM) is the main cost factor for Rail Undertakings. In order to reduce the costs due to railway operations, every company should address the joint problem of rolling stock rostering and maintenance scheduling since they are strongly related parts of the same problem. Maintenance optimization can be a key factor to increase the productivity of railway companies. At the same time, in a competitive globalized and multimodal market, RSM is one of the competitiveness key factors because services quality level depends on it. The strategic relevance of RSM, in particular of maintenance scheduling, is thus due to the reduction of needs (such as platforms) and to the enhancement of quality standards

^(*) Direzione Pianificazione Industriale, Trenitalia, Roma.

^(**) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Roma Tre.

^(***) Direzione Pianificazione Industriale, Trenitalia, Roma. Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Roma Tre.

^(*) Direzione Pianificazione Industriale, Trenitalia, Roma.

^(**) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Roma Tre.

^(***) Direzione Pianificazione Industriale, Trenitalia, Roma. Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Roma Tre.

pende fortemente da esso. La rilevanza strategica del RSM, ed in particolare della schedulazione della manutenzione, è dovuta infatti alla riduzione attesa di risorse (binari, postazioni e persone) e all'innalzamento dei livelli di qualità erogata (affidabilità e pulizia) che il RSM può comportare. La letteratura scientifica sull'argomento appare principalmente focalizzata sullo studio di alcuni specifici sotto-problemi (tra cui scheduling e routing dei convogli [1, 4, 5, 9], turnificazione dell'asset [7, 8], gestione della capacità delle infrastrutture ferroviarie [11], turnificazione delle risorse [15] e manutenzione sui convogli con l'obiettivo di ridurre i tassi di guasto [19]), mentre la gestione integrata dell'asset e degli impianti manutentivi necessita di ulteriori approfondimenti. In questo articolo affrontiamo il problema della gestione delle operazioni manutentive finalizzata all'innalzamento dei livelli di disponibilità ed affidabilità dei convogli. Ci si è limitati ad analizzare alcune delle pubblicazioni più recenti apparse nella letteratura scientifica, lavori di analisi più sistematici possono essere trovati in [6, 10, 17, 20].

PENICKA et al. [14] propongono una formulazione matematica relativa al problema della gestione della manutenzione negli impianti. Tuttavia il modello proposto non tiene conto della turnificazione del materiale rotabile e dei conseguenti vincoli manutentivi. Gli autori considerano che i vincoli manutentivi vadano inseriti nella formulazione del problema della turnificazione solo in casi di treni a lunga percorrenza.

MAROTI and KROON [13] presentano una formulazione di programmazione intera mista relativa al problema della manutenzione in cui viene considerata la fase di shunting come collo di bottiglia dell'intero processo.

BUDAI et al. [2] discutono il problema dello scheduling della manutenzione preventiva e del minimo tempo necessario per erogare le operazioni manutentive previste. Mediante algoritmi euristici gli autori trovano soluzioni vicine all'ottimo testando varie combinazioni di attività manutentive.

WANG et al. [18] propongono un approccio multi-criterio e valutano differenti strategie manutentive per differenti attrezzaggi.

CAPRARA et al. [3] studiano il problema della programmazione degli orari dei servizi commerciali modellando le operazioni manutentive come vincoli fissi. Gli autori propongono una euristica lagrangiana per la soluzione del problema. Test effettuati su vari tipi di treni evidenziano che i vincoli di manutenzione possono compromettere seriamente la qualità del processo di timetabling.

MARCOS et al. [12] integrano in un modello per la pianificazione del materiale rotabile i vincoli legati agli insediamenti in impianto e verificano la difficoltà di trovare soluzioni esatte per il risultante modello di flusso multi-commodity. Sulla base di questa osservazione, scelgono di affrontare il problema in modo euristico.

SATO and FUKUMURA [16] presentano modelli lineari a

(such as vehicle reliability and cleaning). From our point of view the literature is focused on the study of individual sub-problems (such as vehicle scheduling and routing [1, 4, 5, 9], rolling stock rostering [7, 8], railway capacity management [11], workforce scheduling [15] and vehicle maintenance in order to reduce the occurrence of a failure [19]), while the coordination of maintenance and rolling stock scheduling is still underinvestigated.

This work studies how to manage the maintenance operations in order to increase availability and reliability of railway services. In view to the literature reviews related to maintenance operations [6, 10, 17, 20], we limit ourselves to review the following recent papers.

PENICKA et al. [14] provide a formal model of the train maintenance routing problem. However, the rostering problem with maintenance constraints and the maintenance routing are not addressed in this paper. Furthermore, in their case study rostering and rolling stock maintenance are considered as an appropriate method for long-distance trains only.

MAROTI and KROON [13] describe a mixed integer formulation for the maintenance routing problem in which the shunting process is considered the process bottleneck.

BUDAI et al. [2] discuss the preventive maintenance scheduling problem and the minimization of the time required for performing maintenance operations. Heuristic algorithms compute nearly-optimal solutions by combining maintenance activities on each track.

WANG et al. [18] propose a multiple criteria decision-making problem and evaluated maintenance strategies for different equipments.

CAPRARA et al. [3] study a train timetabling problem in which maintenance operations are modeled as fixed constraints. An integer linear programming formulation is proposed and solved by a Lagrangian heuristic. Tests on an Italian test bed with various train types show that maintenance constraints may seriously affect the quality of the timetabling process.

MARCOS et al. [12] integrate maintenance routing requirements in a mathematical model for scheduling rolling stock. They observe that such requirements can easily be modelled but are quite difficult to consider exactly in a multi-commodity flow model. Based on this observation, they choose to deal with that problem in a heuristic manner.

SATO and FUKUMURA [16] present integer programming formulations for real-time freight locomotive rescheduling. The problem is to assign locomotives to the trains with the objective of minimizing the costs of the selected paths. Maintenance works are not modelled but inspection checks only.

This paper presents an original point of view on the RSM problem with respect to the state of the art that combines maintenance and rolling stock scheduling. We present a mathematical formulation for rolling stock maintenance with the aim to reduce the overall maintenance costs. This

variabili intere per la riprogrammazione dell'utilizzo delle locomotive in tempo reale in ambito trasporto merci. Gli autori descrivono il problema dell'assegnazione delle locomotive con l'obiettivo di minimizzare i costi dei percorsi selezionati prendendo in considerazione soltanto visite ispettive.

Il presente articolo presenta un punto di vista originale sul problema dello RSM rispetto alla letteratura in cui viene considerata la gestione della manutenzione e la turnificazione del materiale rotabile. Presentiamo una formulazione matematica per la minimizzazione dei costi di gestione della manutenzione del materiale rotabile. Questa formulazione è integrata in un framework per lo scheduling della manutenzione, del routing e della turnificazione del materiale rotabile. La nuova formulazione migliora i risultati in termini di qualità delle soluzioni e tempo di calcolo ottenuti da precedenti modelli proposti in GIACCO et al. [8].

Questo articolo è organizzato nel seguente modo. Nella Sezione 2 descriviamo il framework adottato. Nella Sezione 3 introduciamo la formulazione matematica per l'ottimizzazione della manutenzione. I risultati sperimentali sono presentati nella Sezione 4. Le conclusioni e i possibili sviluppi futuri trovano spazio nella Sezione 5.

2. Descrizione del problema e framework adottato

L'impianto di manutenzione IDP di Napoli è uno dei cardini del sistema ferroviario italiano per i servizi di manutenzione offerti. Il layout di questo impianto è costituito da due platee e tettoie utilizzabili per operazioni di manutenzione, da un tornio in fossa, due aree di lavaggio e binari per la pulizia e il ricovero dei convogli (fig. 1).

La tabella 1 riporta le principali operazioni manutentive che l'impianto è in grado di erogare. Ogni riga descrive brevemente un intervento complesso di manutenzione indicandone l'identificatore (Colonna 1), la descrizione (Colonna 2), la scadenza (Colonna 3) e la durata media (Colonna 4). Le attività iden-

TIPICHE OPERAZIONI MANUTENTIVE
TYPICAL MAINTENANCE ACTIVITIES

ID	Descrizione breve Short description	Scadenza Expiry	Durata Duration [h]
I	Controllo pantografi e carrelli Pantograph and bogies check	Ad ogni rientro in impianto Each return to workshop	8
II	Controllo pantografi e carrelli Pantograph and bogies check	7.500 km (+/-10%)	8
III	Controllo pantografi e carrelli Pantograph and bogies check	30.000 km (+/-10%)	8
IV	Controllo pantografi, carrelli e bordini Pantograph, bogies and wheel flanges check ultrasonic	60.000 km (+/-10%)	24
V	Controllo con ultrasuoni Flaw detection	180.000 km (+/-10%)	72
VI	Tornitura sale Wheel truing	360.000 km (+/-10%)	108

formulation is integrated in a framework for maintenance scheduling, routing and rolling stock rostering. The new formulation outperforms the one proposed in GIACCO et al. [8], both in terms of solution quality and computation time.

The paper is organized as follows. We describe the problem and framework in Section 2. Our new integer programming model for maintenance optimization is presented in Section 3. The computational results are shown in Section 4. Conclusions and further research directions follow in Section 5.

2. Problem description and adopted framework

The Naples workshop is one of the key points of the Italian railway system for several maintenance services. The

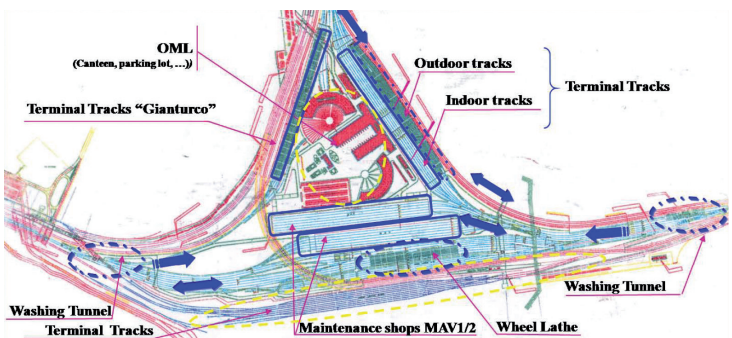


Fig. 1 - Layout dell'impianto.
Fig. 1 - Naples workshop layout.

tificate con I, II e III sono simili per operazioni manutentive e durata ma hanno differenti scadenze chilometriche. Le attività identificate con IV, V e VI hanno scadenze che sono multipli di 60.000 km. Si noti che l'attività V estende la IV aggiungendovi il controllo agli ultrasuoni mentre l'attività VI aggiunge alla V la tornitura delle ruote.

La fig. 2 mostra due possibili stradamenti in impianto indicati con Route #1 e #2. Entrambi i percorsi prevedono il passaggio per aree dell'impianto in cui sia possibile effettuare operazioni di manutenzione (indoor terminal tracks), lavaggio (washing tunnel) e pulizia (outdoor terminal tracks per il percorso denominato Route #1 e terminal Gianturco per Route #2). Si noti che l'itinerario Route #1 prevede due movimentazioni interne all'impianto, mentre l'itinerario Route #2 ne prevede tre. Vista la considerevole complessità del problema, si rende necessario dividere il problema. Nella pratica, le imprese ferroviarie tendono a programmare prima le risorse con un lungo tempo di acquisizione (ad esempio binari o unità di attività) e successivamente le risorse con elevato grado di flessibilità (es. risorse umane). In questo articolo facciamo riferimento alle risorse con grado di flessibilità minore. Il problema affrontato può essere definito nella seguente maniera: Dati gli schemi orario, la flotta e le operazioni di manutenzione si vuole determinare un programma di gestione del materiale rotabile a minimo costo in termini di numero di unità di asset utilizzate, di numero di invii a vuoto e di numero di movimentazioni tra aree dell'impianto.

La fig. 3 mostra il framework complessivo proposto per risolvere il problema. Questa figura rappresenta, tramite blocchi colorati, i diversi sotto-problemi analizzati (turnificazione, impianto di manutenzione e stazione) e con frecce le loro principali interrelazioni.

La gestione dell'integrazione tra le soluzioni dei vari moduli avviene attraverso un approccio sequenziale. Il nostro metodo prevede che venga risolto inizialmente il problema di turnificazione per ogni tipo di asset e successivamente gli altri due sotto-problemi relativi alla stazione passeggeri e all'impianto di manutenzione. E' in fase di sviluppo una procedura automatica per la gestione dell'integrazione dei moduli e per l'analisi delle cause di non ammissibilità dei sotto-problemi. Di seguito descriviamo brevemente tutti i moduli e i modelli sviluppati per risolvere il sotto-problema collegato.

2.1. Turnificazione del materiale rotabile

Il modulo di turnificazione individua un turno in grado di coprire tutti i servizi commerciali da erogare minimizzando il numero di elementi dell'asset necessari, incluso il numero di invii a vuoto. Nello specifico, si ottimizzano le

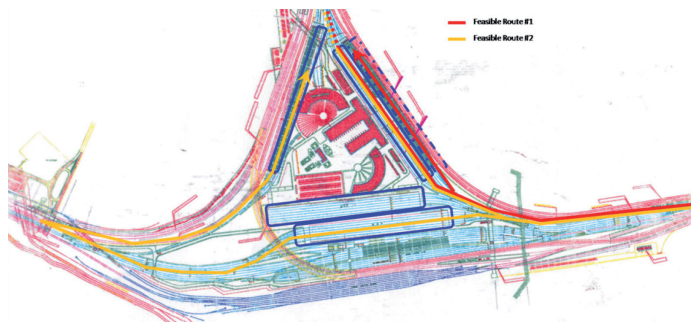


Fig. 2 - Percorsi ammissibili in impianto.
Fig. 2 - Typical routes in the workshop.

layout of the studied workshop consists of various indoor/outdoor tracks for light maintenance, wheel profiling, washing, cleaning, inspection and other services (fig. 1).

Each row of table 1 indicates a typical maintenance activity at the workshop with its identifier (Column 1), description (Column 2), expiry (Column 3) and mean duration (Column 4). The activities named I, II, and III are similar in terms of maintenance operations and duration, but have three different expiries. The activities named IV, V and VI have expiries that are multiples of 60.000 km. Specifically, Activity V incorporates Activity IV and extends it with an addition of ultrasonic flaw detection. Similarly, Activity VI extends Activity V by adding the turning of wheel flanges.

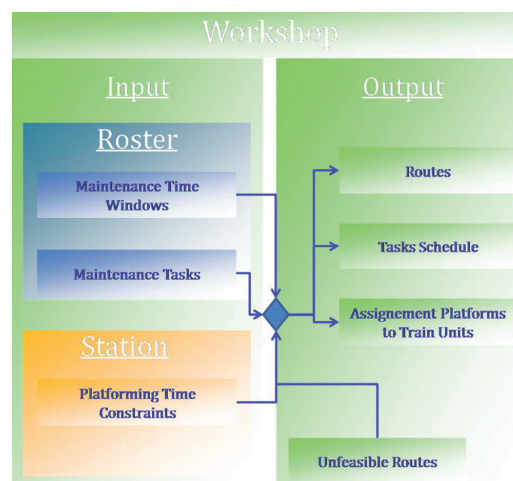


Fig. 3 - Legami tra i moduli relativi a turnificazione, impianto di manutenzione e stazione.

Fig. 3 - Interaction between the roster, station and workshop modules.

distanze percorse tra due operazioni manutentive dello stesso tipo. In questo lavoro si ipotizza che il timetable sia ciclico e che l'assegnazione delle tracce al materiale sia data e fatta sulla base di principi del marketing. Come descritto in GIACCO et al. [7], il problema della turnificazione corrisponde alla ricerca di un circuito Hamiltoniano su grafo i cui nodi rappresentano i servizi commerciali e i cui archi rappresentano i possibili allacciamenti e le possibili attività erogabili tra coppie di servizi commerciali successivi. Questo problema è trattato come un caso di "Problema del Commesso Viaggiatore" con vincoli e variabili aggiuntive per garantire il rispetto delle scadenze manutentive e gli alti livelli di efficienza del processo. L'output è un turno ciclico comprensivo delle operazioni manutentive, espresse come finestre temporali per effettuare le manutenzioni previste e impianto individuato per la loro erogazione.

2.2. Scheduling in stazione e nell'impianto di manutenzione

Un problema di enorme importanza consiste nella verifica che stazione passeggeri e impianto di manutenzione siano in grado di erogare le operazioni manutentive ipotizzate in fase di rostering.

Un impianto deve essere in grado di gestire diversi convogli in contemporanea e allo stesso tempo deve assorbire parte dei ritardi maturati durante l'esercizio di ciascun treno all'interno della finestra temporale che intercorre tra due servizi commerciali successivi. In genere, la durata della finestra manutentiva è maggiore della somma dei tempi delle operazioni manutentive da erogare. Infatti il materiale rotabile trascorre buona parte del tempo in impianto su binari di ricovero e senza subire alcuna operazione manutentiva. L'impianto potrebbe quindi essere considerato non solo come un possibile ricovero per i convogli in attesa di impiego in esercizio ma anche come buffer temporale da cui attingere per ridurre le perturbazioni della circolazione.

Una funzione obiettivo di interesse pratico è la minimizzazione delle movimentazioni all'interno dell'impianto di manutenzione. Nella prossima sezione, viene presentata una nuova formulazione per il problema della gestione della manutenzione negli impianti. Il nostro obiettivo è la minimizzazione delle movimentazioni interne ai processi manutentivi.

Studiamo inoltre la robustezza del sistema, ovvero la sua capacità di trovare soluzioni ammissibili in caso di perturbazioni della circolazione.

3. Formulazione del problema della gestione della manutenzione in impianto

Questa sezione descrive una nuova formulazione, basata sull'approccio big M , per la soluzione del problema della gestione della manutenzione. Chiamiamo *job* una sequenza di tempi di attesa e di operazioni manutentive. Le

Fig. 2 shows two different routes in the workshop, named Routes #1 and #2. Both routes visit parts of the workshop where it is possible to provide maintenance operations (indoor terminal tracks for both routes), washing (washing tunnel) and cleaning (outdoor terminal tracks for Route #1 and terminal Gianturco tracks in Route #2). Note that Route #1 has two movements between workshop sites, while Route #2 has three movements.

In practice, the high complexity of the workshop problem requires to divide it into smaller sub-problems. Since rail companies tend to schedule first the resources with a long time of acquisition (e.g. rail tracks or asset units) and then the resources with higher degree of flexibility (e.g. human resources), this work is focused on the former type of resources.

The general problem addressed here can be defined as follows: Given timetables, rolling stock assets, maintenance operations, a rolling stock circulation solution has to be computed with minimum costs, that are expressed in terms of the number of used asset units, empty runs, and train movements between station platforms and the workshop.

Fig. 3 shows the framework proposed to solve the problem. Each coloured module (i.e. roster, station and workshop) represents a specific sub-problem and is divided in input and outputs data, that are exchanged with the other modules. A sequential method is developed in order to integrate the solutions provided by each module. Our approach is to first solve the rostering problem for each asset unit type and then solve the other two modules involving passenger stations and workshop operations. An automatic procedure is under development to manage the interaction between the modules and a feedback information is returned in case an infeasibility is provided by some modules. In the following, we briefly describe each module and the models we developed to solve it.

2.1. Rolling stock rostering

The rostering module computes a rolling stock roster that covers a set of commercial services and minimizes the costs related to the asset units, including the empty runs. Specifically, this module optimizes the distance run by asset units of various types between consecutive maintenance operations. We suppose the timetable is cyclic and the assignment of commercial services per asset kind follows brand promise principles. As described in GIACCO et al. [7], the rolling stock rostering problem corresponds to find a Hamiltonian path on a graph made by commercial services (nodes) and by feasible pairs (edges), representing service or maintenance activities to be provided. This problem is treated as a kind of traveling salesman problem with additional constraints and variables to guarantee the respect of maintenance expiry and to guarantee maintenance efficiency. The output is a cyclic roster including the schedule of maintenance activities, as time windows to provide the required maintenance, and an assigned workshop location.

variabili del problema sono i tempi di inizio e fine di ogni operazione manutentiva. Utilizziamo inoltre un set di variabili per gestire *job alternativi* e la loro scelta.

3.1. Notazioni

- $A = [a_1, a_2, \dots, a_a]$ è il set di attività che l'impianto è in grado di erogare;
- a è il numero di attività che appartengono al set A ;
- $U = [u_1, u_2, \dots, u_u]$ è il set di convogli in asset coinvolti nel problema;
- u è il numero di convogli appartenenti a U ;
- $R = [r_1, r_2, \dots, r_r]$ è l'insieme dei percorsi ammissibili nell'impianto di manutenzione;
- r è il numero di percorsi ammissibili nell'impianto;
- t_u^{ini} è il tempo in cui il convoglio u arriva in impianto;
- t_u^{fin} è il tempo in cui il convoglio u deve lasciare l'impianto;
- $J_{ru} = [r, (t_u^{ini}, t_u^{fin})]$ è il job sul percorso r per il convoglio u con finestra manutentiva (t_u^{ini}, t_u^{fin}) ;
- $J = [j_1, j_2, \dots, j_n]$ è il set di job ammissibili;
- n è il numero di job ammissibili;
- $B = [b_1, b_2, \dots, b_b]$ è il set di risorse dell'impianto (binari);
- b è il numero di risorse dell'impianto;
- x_{ruob} è una variabile binaria che assume valore 1 se l' o -esimo task nel percorso r dell'unità u è assegnato alla risorsa b ;
- o_r^{max} è il massimo numero di elementi nella sequenza del percorso r ;
- y_{ru} una variabile binaria che assume valore 1 se il percorso r è scelto per il convoglio u ;
- M è un numero intero molto elevato;
- s_{ac} è una variabile binaria che assume valore 1 se l'attività a è schedulata prima dell'attività c , con a e c ;
- W_{ac} è una variabile binaria che assume valore 1 se la fine dell'attività a precede l'inizio dell'attività c per più di 1440 minuti (1 giorno);
- W_{ca} è una variabile binaria che assume valore 1 se la fine dell'attività c precede l'inizio dell'attività a per più di 1440 minuti (1 giorno);
- kr è il numero di movimentazioni interne al percorso r ;
- t_{ruo}^i (t_{ruo}^f) una variabile non negativa che rappresenta l'inizio (la fine) dell' o -esimo task nel percorso r del convoglio u ;
- $ar(o)$ è l' o -esimo task del percorso r ;
- $pr(a)$ è l' o -esimo task dell'attività a del percorso r ;
- $dar(o)$ è la durata minima permessa per l'attività $ar(o)$.

2.2. Station and workshop scheduling

Maintenance operations have to be scheduled in passenger station and workshop. There are constraints on the maintenance activities that have to be performed by each train and on the time windows that are defined in the rolling stock rostering plan. A workshop must manage some asset units simultaneously and must be able to absorb small perturbations of the circulation. A time window for the maintenance operations between two commercial services is thus considered. Generally, the time windows are bigger than the sum of all activities and the workshop has some recovery time. Also, the workshop could be considered as a space buffer to store trains. An objective function of practical interest is the minimization of the number of train movements in the workshop area.

The following section will present a new formulation for the workshop maintenance problem with minimization of train movements within the workshop. The system robustness will be investigated, i.e. the feasibility of the workshop schedule in presence of disturbances.

3. Formulation of the maintenance problem at a workshop

This section describes a big M formulation for the workshop scheduling module. We call job a sequence of scheduled waiting times and maintenance operations. The problem variables are the initial and final times for each maintenance activity. We also model alternative jobs as additional variables.

3.1. Notation

- $A = [a_1, a_2, \dots, a_a]$ is the activities set that the workshop can provide;
- a is the number of the activities belonging to A ;
- $U = [u_1, u_2, \dots, u_u]$ is the set of asset units we have to analyze;
- u is the number of asset units belonging to U ;
- $R = [r_1, r_2, \dots, r_r]$ is a feasible route (or sequence) in the workshop;
- r is the number of feasible routes in the workshop;
- t_u^{ini} is the time in which the rolling stock u arrives at the workshop;
- t_u^{fin} is the time in which the rolling stock u should leave the workshop;
- $J_{ru} = [r, (t_u^{ini}, t_u^{fin})]$ is the job on route r for the asset unit u with time window (t_u^{ini}, t_u^{fin}) ;
- $J = [j_1, j_2, \dots, j_n]$ is the set of feasible jobs;
- n is the number of feasible jobs;
- $B = [b_1, b_2, \dots, b_b]$ is the set of workshop resources (platforms);
- b is the number of resources of the workshop;

3.2. Vincoli

I vincoli del modello sono di quattro tipi:

- uno e un solo job (tra le possibili alternative) deve essere scelto per ciascun convoglio in analisi,
- non sono permesse sovrapposizioni di convogli sulle risorse dell'impianto;
- ogni attività manutentiva può essere erogata al massimo su una risorsa;
- la durata delle finestre manutentive e la durata massima delle attività deve essere rispettata.

Mostriamo in questa sezione come sono modellati i vincoli del problema.

$$\sum_{r \in R} y_{ru} = 1 \quad \forall u \in U \quad (1)$$

Il set di equazioni (1) impone che uno e un solo percorso manutentivo sia scelto per ciascun treno.

$$\sum_{b \in B} x_{ruob} = y_{ru} \quad \forall (r, u, o) \in RxUxO \quad (2)$$

Le equazioni (2) garantiscono che tutte le attività del percorso manutentivo scelto siano assegnate alle risorse dell'impianto.

$$t_{ruo}^f - t_{ruo}^i \geq \text{dar}(o) \sum_{b \in B} x_{ruob} \quad \text{con } \text{dar}(o) = \max(d_j) \quad (3)$$

$\forall (r, u, o) \in RxUxO$ con j task paralleli sul percorso r e in posizione o

Le disequazioni (3) sono necessarie per verificare che il tempo allocato per svolgere le operazioni manutentive sia maggiore della loro durata minima. La durata delle attività $t_{ruo}^f - t_{ruo}^i$ è pari a 0 se l'attività non appartiene al percorso scelto per il convoglio u , in caso contrario la durata è pari al tempo effettivo di sosta del convoglio u sul binario b .

$$t_{ruo}^i = t_u^{\text{ini}} \quad \text{con } o = 1 \quad (4)$$

Le equazioni (4) verificano il rispetto dell'inizio delle finestre manutentive definite dal modello di rostering.

$$t_{ruo}^f = t_u^{\text{fin}} \quad \text{con } o = O_r^{\text{max}} \quad (5)$$

Le equazioni (5) verificano il rispetto della fine delle finestre manutentive definite dal modello di rostering.

$$t_{r_1u_1c}^f \geq t_{r_2u_2a}^f - M(1 - s_{ac}) - M(1 - x_{r_2u_2pr(a)b}) - M(1 - x_{r_1u_1pr(c)b}) \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \text{ con } u_1 \neq u_2 \quad (6)$$

$$t_{r_1u_1c}^f - M s_{ac} - M(1 - x_{r_2u_2pr(a)b}) - M(1 - x_{r_1u_1pr(c)b}) \geq t_{r_2u_2a}^f \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \text{ con } u_1 \neq u_2 \quad (7)$$

Le disequazioni (6) e (7) sono usate per eliminare eventuali impegni contemporanei dei binari. Se due attività sono schedate sulla stessa risorsa e, per esempio, l'attività a precede l'attività c , l'inizio di c deve essere schedato dopo la fine di a . Pertanto, dato il binario b , il Vincolo (6) garantisce che $t_{r_1u_1c}^f \geq t_{r_2u_2a}^f$ se a è schedata prima di c ($s_{ac} = 1$), a è assegnata alla risorsa b ($x_{r_2u_2pr(a)b} = 1$) e c è assegnata alla risorsa b ($x_{r_1u_1pr(c)b} = 1$). Analogamente, il Vincolo (7)

- x_{ruob} is a binary variable that assumes value 1 if the o -th task in route r of asset unit u is assigned to resource b ;
- O_r^{max} is the maximum number of elements in the sequence of route r ;
- y_{ru} is a binary variable that assumes value 1 if route r is chosen for asset unit u ;
- M is a BIG integer (i.e. a sufficiently large number);
- s_{ac} is a binary variable that assumes value 1 if activity a is scheduled before c ;
- W_{ac} is the binary variable that assumes value 1 if the end of activity a precedes the start of activity c by more than 1440 minutes (i.e. 1 day);
- W_{ca} is the binary variable that assumes value 1 if the end of activity c precedes the start of activity a by more than 1440 minutes (i.e. 1 day);
- kr is the number of movements within the route r ;
- t_{ruo}^i (t_{ruo}^f) is a non-negative variable that represents the start (end) time of the o -th task in route r of unit u begins (ends);
- $ar(o)$ is the o -th task of route r ;
- $pr(a)$ is the o -th task of activity a of route r ;
- $\text{dar}(o)$ is the minimum allowed duration of activity $ar(o)$.

3.2. Constraints

Model constraints are of four types:

- one and only one alternative job is chosen for each asset unit;
- no overlap between activities is allowed on each resource;
- only one assignment is possible for each maintenance activity;
- time windows and maximum allowed duration of activities are respected.

We next show the inequalities that model the various types of constraints.

$$\sum_{r \in R} y_{ru} = 1 \quad \forall u \in U \quad (1)$$

Inequality (1) imposes that one and only one route must be chosen for each train.

$$\sum_{b \in B} x_{ruob} = y_{ru} \quad \forall (r, u, o) \in RxUxO \quad (2)$$

Inequality (2) constrains all the activities of a chosen route to be assigned to workshop resources.

$$t_{ruo}^f - t_{ruo}^i \geq \text{dar}(o) \sum_{b \in B} x_{ruob} \quad \text{with } \text{dar}(o) = \max(d_j) \quad (3)$$

$\forall (r, u, o) \in RxUxO$ with j parallel tasks on the route r and in the position o

Inequality (3) is to check whether a sufficient processing time is given to each maintenance activity. The duration of activities $t_{ruo}^f - t_{ruo}^i$ is 0 if route r is not chosen for

garantisce che $t_{r_2u_2a}^i \geq t_{r_1u_1c}^f$ se c è schedulata prima di a ($s_{ac} = 0$), a è assegnata alla risorsa b ($x_{r_2u_2pr(a)b}=1$) and c è assegnata alla risorsa b ($x_{r_1u_1pr(c)b}=1$).

Vista l'ipotesi di orario ciclico, dobbiamo verificare che non vi sia sovrapposizione di attività nel loro protrarsi oltre la mezzanotte. Per questa ragione sono necessarie le Disequazioni (8) e (9):

$$t_{r_1u_1c}^f - 1440 \leq t_{r_2u_2a}^i + M(1-s_{ac}) + \quad (8)$$

$$M(1-x_{r_2u_2pr(a)b}) + M(1-x_{r_1u_1pr(c)b}) \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \text{ con } u_1 \neq u_2$$

$$t_{r_2u_2a}^f - 1440 \leq t_{r_1u_1c}^i + Ms_{ac} + M(1-x_{r_2u_2pr(a)b}) + \quad (9)$$

$$M(1-x_{r_1u_1pr(c)b}) \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \text{ con } u_1 \neq u_2$$

Se l'attività a precede c , entrambe le attività sono schedulate sulla risorsa b e c finisce dopo la mezzanotte ($t_{r_1u_1c}^f \geq 1440$), è necessario verificare che la fine di c e l'inizio di a non si sovrappongano.

La disequazione (8) verifica se la fine di c meno 1440 sia schedulata prima dell'inizio di a . Questo set di vincoli è valido anche se $t_{r_1u_1c}^f < 1440$.

Le disequazioni (9) sono usate quanto l'attività c è schedulata prima dell'attività a . Questi vincoli sono utilizzabili solo nel caso in cui due attività consecutive schedulate sulla stessa risorsa sono separate da meno di 1440 minuti. In alternativa, le disequazioni (8) e (9) devono essere sostituite dalle disequazioni (10) – (15):

$$W_{ac} > (t_{r_1u_1c}^i - t_{r_2u_2a}^f - 1440)/2880 \quad \forall r_1, r_2, u_1, u_2, a, c \quad (10)$$

$$W_{ac} \leq +1(t_{r_1u_1c}^i - t_{r_2u_2a}^f - 1440)/2880 \quad \forall r_1, r_2, u_1, u_2, a, c \quad (11)$$

Con le disequazioni (10) e (11), le variabili W_{ac} sono poste ad 1 se la fine dell'attività a e l'inizio dell'attività c sono separate da più di 1440 minuti.

$$W_{ac} > (t_{r_2u_2a}^i - t_{r_1u_1c}^f - 1440)/2880 \quad \forall r_1, r_2, u_1, u_2, a, c \quad (12)$$

$$W_{ac} \leq +1(t_{r_2u_2a}^i - t_{r_1u_1c}^f - 1440)/2880 \quad \forall r_1, r_2, u_1, u_2, a, c \quad (13)$$

Con le disequazioni (12) e (13), le variabili sono poste a 1 se la fine dell'attività c e l'inizio dell'attività a sono distanziate da più di 1440 minuti.

$$t_{r_1u_1c}^f - 1440 \leq t_{r_2u_2a}^i + M(1-s_{ac}) + M(1-x_{r_2u_2pr(a)b}) + \quad (14)$$

$$M(1-x_{r_1u_1pr(c)b}) + Mw_{ac} \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2$$

$$t_{r_1u_1a}^f - 1440 \leq t_{r_2u_2c}^i + Ms_{ac} + M(1-x_{r_2u_2pr(a)b}) + \quad (15)$$

$$M(1-x_{r_1u_1pr(c)b}) + Mw_{ca} \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2$$

Per evitare sovrapposizioni su una stessa risorsa, usiamo le disequazioni (14) e (15). Se le attività a e c sono entrambe schedulate sul binario b , a è schedulata prima di c e ci sono più di 1440 minuti tra la fine di a e l'inizio di c , allora il tempo di fine di a - 1440 deve essere inferiore al tempo di inizio di c .

3.3. Funzioni obiettivo

La funzione obiettivo utilizzata per gestire l'impianto di manutenzione è la minimizzazione del numero di movimentazioni in impianto, che costituiscono una significativa voce

asset unit u , otherwise it represents the processing time for unit u on the platform b .

$$t_{ruo}^i = t_u^{ini} \text{ with } o = 1 \quad (4)$$

In inequality (4), workshop must manage the rolling stock constraints delivered by the rostering optimizer on the time window start, including scheduled waiting times.

$$t_{ruo}^f = t_u^{fin} \text{ with } o = 0_r^{max} \quad (5)$$

In inequality (5), the workshop must manage the rolling stock constraints delivered by the rostering optimizer on the time window end.

$$t_{r_1u_1c}^i \geq$$

$$t_{r_2u_2a}^f - M(1-s_{ac}) - M(1-x_{r_2u_2pr(a)b}) - \quad (6)$$

$$M(1-x_{r_1u_1pr(c)b}) \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \text{ with } u_1 \neq u_2$$

$$t_{r_2u_2a}^i \geq$$

$$t_{r_1u_1c}^f - Ms_{ac} - M(1-x_{r_2u_2pr(a)b}) - \quad (7)$$

$$M(1-x_{r_1u_1pr(c)b}) \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \text{ con } u_1 \neq u_2$$

Inequalities (6) and (7) are used to avoid overlaps on each resource. If two activities are scheduled on the same resource and activity a precedes activity c , the start of c must be scheduled after the end of a . For this reason, given a resource b , Constraint (6) guarantees that $t_{r_1u_1c}^i \geq t_{r_2u_2a}^f$ if a is scheduled before c ($s_{ac} = 1$), a is assigned to resource b ($x_{r_2u_2pr(a)b}=1$) and c is assigned to resource b ($x_{r_1u_1pr(c)b}=1$). Similarly, Constraint (7) guarantees that $t_{r_2u_2a}^i \geq t_{r_1u_1c}^f$ if c is scheduled before a ($s_{ac} = 0$), a is assigned to resource b ($x_{r_2u_2pr(a)b}=1$) and c is assigned to resource b ($x_{r_1u_1pr(c)b}=1$).

Let's now suppose that overlaps of activities beyond the end of a work day should be avoided. For modelling this situation, inequalities (8) and (9) are necessary:

$$t_{r_1u_1c}^f - 1440 \leq t_{r_2u_2a}^i + M(1-s_{ac}) + \quad (8)$$

$$M(1-x_{r_2u_2pr(a)b}) + M(1-x_{r_1u_1pr(c)b}) \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \text{ with } u_1 \neq u_2$$

$$t_{r_2u_2a}^f - 1440 \leq t_{r_1u_1c}^i + Ms_{ac} + M(1-x_{r_2u_2pr(a)b}) + \quad (9)$$

$$M(1-x_{r_1u_1pr(c)b}) \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \text{ with } u_1 \neq u_2$$

If activity a precedes c , both activities are scheduled on resource b and c ends after midnight ($t_{r_1u_1c}^f \geq 1440$), we have to check that the end of c and the start of a do not overlap. To this aim, inequality (8) checks if the completion of c minus 1440 is scheduled before the start of a . This constraints set is valid even if $t_{r_1u_1c}^f < 1440$.

Inequalities (9) are used when activity c is scheduled before activity a . These constraints only work if two consecutive activities on the same resource are separated by less than 1440 minutes. Alternatively, Inequalities (8) and (9) have to be replaced by Inequalities (10) – (15):

$$W_{ac} > (t_{r_1u_1c}^i - t_{r_2u_2a}^f - 1440)/2880 \quad \forall r_1, r_2, u_1, u_2, a, c \quad (10)$$

$$W_{ac} \leq +1(t_{r_1u_1c}^i - t_{r_2u_2a}^f - 1440)/2880 \quad \forall r_1, r_2, u_1, u_2, a, c \quad (11)$$

With inequalities (10) and (11), the variable W_{ac} is set to 1 if the end of activity a and the start of activity c are separated by more than 1440 minutes.

di costo improduttivo nell'impianto di manutenzione. Il numero di movimentazioni è calcolato attraverso il numero di successive variazioni di occupazione delle risorse da parte di un elemento dell'asset durante il processo manutentivo. Visto che questa funzione obiettivo può essere espressa equivalentemente utilizzando le variabili x_{ruob} o le y_{ru} , nei test presentati in seguito verranno valutate entrambe le alternative:

- *Approccio1* Min: $\sum x_{ruob}$ dove $ar(o)$ è una movimentazione
- *Approccio2* Min: $\sum k_v y_{ru}$

4. Risultati degli esperimenti

Le istanze testate si riferiscono a esempi pratici di schedulazione di attività manutentive nell'impianto dinamico polifunzionale (IDP) di Napoli per convogli Trenitalia. Sono stati analizzati 100 giorni di esercizio e sono stati comparati i programmi della manutenzione reali con quelli derivanti dall'uso del nostro modello. Sono stati presi in considerazione diversi tipi di asset e di interventi manutentivi. Durante l'analisi di ogni singolo giorno abbiamo considerato le attività non concluse nelle giornate precedenti come un vincolo sull'utilizzo delle risorse coinvolte. È stato inoltre effettuato un pre-processamento dei dati per generare 100 istanze sulla base delle quali effettuare il confronto tra la gestione reale e quella proposta dal nostro modello. Le istanze sono state risolte utilizzando CPLEX 12 su un PC di 2.27 GHz e 4 GB di memoria RAM. Abbiamo inoltre impostato il tempo massimo di calcolo a dieci minuti per CPLEX.

4.1. Confronto tra le soluzioni usate nella pratica e le soluzioni del modello

In questa sezione si vogliono confrontare le soluzioni del nostro modello con le soluzioni utilizzate nella pratica presso l'IDP di Napoli. La tabella 2 riporta i risultati ottenuti utilizzando i due approcci (le due differenti funzioni obiettivo) di Sezione 3.3: la percentuale delle soluzioni che sono state migliorate utilizzando il nostro approccio rispetto a quelle utilizzate nella pratica, la percentuale di soluzioni ottime, il risparmio in termini di numero di movimentazioni dei treni e il tempo di calcolo medio di CPLEX (in secondi).

Dai risultati presentati nella tabella 2, si evince che l'*Approccio1* offre la percentuale migliore di soluzioni migliorative della pratica ma il tempo di calcolo risulta piuttosto elevato. L'*Approccio2* ha il migliore guadagno medio, una buona percentuale di soluzioni migliorate e un basso tempo di calcolo. Il primo approccio è quindi preferibile al secondo per efficacia. Segnaliamo però che il secondo approccio, visti i tempi di calcolo ridotti, potrebbe essere utilizzato per la gestione delle operazioni in tempo reale.

I restanti esperimenti riportati in questo articolo sono riferiti all'*Approccio1*. Sono state utilizzate istanze con un ridotto numero di instradamenti alternativi. La fig. 4 offre un punto vista diverso sulla comparazione tra i casi pratici e le soluzioni del nostro modello riportando la

$$W_{ac} > (t_{r_2u_2c} - t_{r_1u_1c} - 1440)/2880 \quad \forall r_1, r_2, u_2, a, c \quad (12)$$

$$W_{ac} \leq +1(t_{r_2u_2a} - t_{r_1u_1c} - 1440)/2880 \quad \forall r_1, r_2, u_2, a, c \quad (13)$$

Similarly, with Inequalities (12) and (13), the variables are set to 1 if the end of activity c and the begin of activity a are separated by more than 1440 minutes.

$$t_{r_1u_1c} - 1440 \leq t_{r_2u_2a} + M(1 - s_{ac}) + M(1 - x_{r_2u_2pr(a)b}) + M(1 - x_{r_1u_1pr(c)b}) + M w_{ac} \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \quad (14)$$

$$t_{r_1u_1a} - 1440 \leq t_{r_2u_2c} + M s_{ac} + M(1 - x_{r_2u_2pr(a)b}) + M(1 - x_{r_1u_1pr(c)b}) + M w_{ca} \quad \forall b, r_1, r_2, u_1, u_2 \quad (15)$$

To avoid overlaps of activities on a same resource, we use inequalities (14) and (15). If activities a and c are both scheduled on resource b , a is scheduled before c and there are more than 1440 minutes between the end of a and the start of c , then the end of a -1440 must be previous of the start of c .

3.3. Objective functions

The objective function is expressed in terms of the minimization of the number of train movements. The number of train movements is computed as the number of changes of resources during maintenance routing in the workshop. Since this objective function can be formulated by using either the variables x_{ruob} or the variables y_{ru} in our test experiments both options will be evaluated:

- *Approach1* Min: $\sum x_{ruob}$ where $ar(o)$ is a movement
- *Approach2* Min: $\sum k_v y_{ru}$

4. Computational experiments

The results are based on real instances taken from a Trenitalia's maintenance site located in Naples. We analyze 100 working days and we compare the programs used in real life with our model solutions. We consider all asset units types and all maintenance types. Waiting time longer than one day is considered not as a variable but as a constraint on resources availability. A pre-processing was also performed in order to reduce the problem size to a sequence of

TABELLA 2 – TABLE 2

CONFRONTO TRA MODELLI COMPARISON BETWEEN MODELS

Approccio Approach	1	2
Soluzioni migliorate Improved solutions	60	43
Soluzioni ottime Optimal solutions	65	48
Risparmio medio di movimentazioni Average train movements saving	1.8	2.6
Tempo totale di calcolo (sec) Total computation time (sec)	531.2	152.9

Train Movements Saving

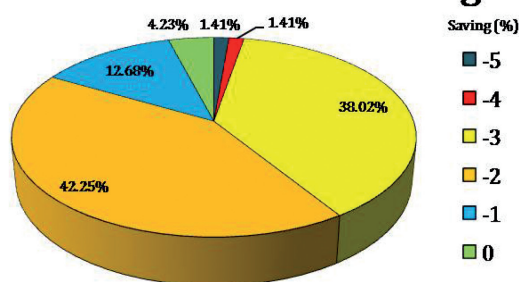


Fig. 4 - Risparmio del nostro modello rispetto alle soluzioni utilizzate in pratica.

Fig. 4 - Savings of our model solutions compared to the practical solutions.

percentuale di miglioramento delle movimentazioni dei treni nella finestra [0%, 5%]. Nel 95.8% dei casi il nostro modello offre una soluzione migliore rispetto a quella adottata nella pratica, mentre nei restanti casi (4.2% dei test) la soluzione reale è risultata identica a quella del modello. Questo risultato mostra chiaramente che l'utilizzo di strumenti di ottimizzazione può apportare miglioramenti significativi dei livelli di efficienza dei processi manutentivi. Notiamo che sono frequenti risparmi tra le 2 e le 3 movimentazioni. Segnaliamo inoltre che questa analisi è stata condotta prendendo in considerazione solo movimentazioni effettivamente eliminabili (le movimentazioni tra l'impianto e la stazione passeggeri sono considerate inamovibili dal piano della movimentazione).

4.2. Analisi dei tempi di calcolo

La fig. 5 presenta il tempo medio di calcolo in funzione del numero di job del problema. Il tempo massimo re-

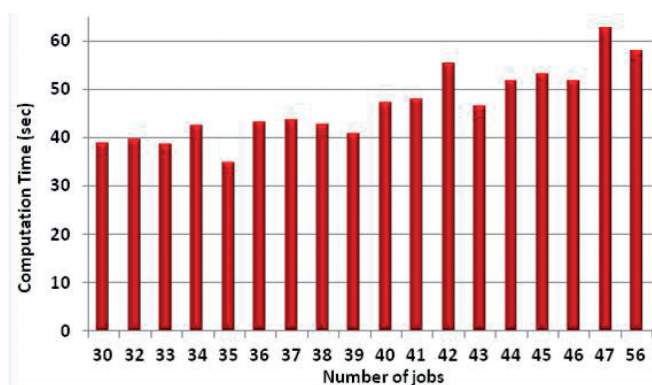


Fig. 5 - Tempo di calcolo per un numero via via crescente di job da schedare.

Fig. 5 - Computation time for an increasing number of jobs in the workshop.

one-day problems, so we generated 100 one-day cases. For each train, we consider all possible routes in the workshop. These instances are solved by CPLEX 12 on a PC with 2.27 GHz and 4 GB of RAM. Ten minutes of computation are allowed for the branch and bound code of CPLEX.

4.1. Practical versus model solutions

This section compares the solutions found by our maintenance scheduling formulation with the practical solutions at Naples workshop. Table 2 reports the average results on the 100 instances obtained for the two approaches (i.e. the two definitions of the same objective function) of Section 3.3: the percentage of solutions that have been improved via optimization compared to the practical solutions, the percentage of optimal solutions, the average saving in terms of train movements reduction and the total computation time of CPLEX (in seconds).

From the results of table 2, Approach1 offers the best percentage of improved solutions with a large computation time. However, Approach2 guarantees the best average gain, good percentage of improved solutions and a considerable smaller computation time. So, the former approach gives the largest % improvement while the latter approach can be better used for real-time maintenance control applications.

The remaining experiments of this paper are dedicated to a further evaluation of the potential impact of Approach1. We use the same set of instances but with a reduced set of routes available for each train. Fig. 4 shows a deeper average comparison between the real world solutions and our model solutions in terms of the percentage of saving between 0 and 5 train movements. In the 95.8% of the 100 one-day cases a better solution is obtained by our model, while in 4.2% of cases the practical solutions are identical to the model solutions. This result can be considered as remarkable since a better solution is very often achieved via optimization. Specifically, the number of savings is often between 2 and 3 train movements. We observe that this analysis is done only for unscheduled train movements between workshop and passenger stations, that are required for the computation of a feasible train schedule.

4.2. Assessment of the computation time

Fig. 5 shows the CPLEX performance when varying the number of jobs. The time to compute the CPLEX solution is up to around 1 minute, so we can conclude that the formulation can be quickly solved by CPLEX for real-world instances. Practical use of the proposed method can be envisaged both during maintenance planning and operational phases.

4.3. Robustness analysis

A robustness analysis is provided in order to evaluate the schedule quality in case

gistrato è di poco superiore al minuto e quindi possiamo concludere che CPLEX sia in grado di risolvere istanze reali molto rapidamente. L'uso del metodo proposto può essere previsto sia per la pianificazione della manutenzione sia per la fase di gestione operativa.

4.3. Analisi della Robustezza

L'analisi di seguito proposta ha l'obiettivo di verificare il comportamento del nostro modello in caso di perturbazioni della circolazione e il suo impatto sui piani manutentivi. L'obiettivo generale è di riequilibrare dinamicamente l'uso delle risorse degli impianti e di individuare nuove schedule ammissibili, ovvero nuovi programmi per le operazioni manutentive da erogare nel rispetto delle finestre temporali fissate dalla turnificazione.

Le figg. 6 e 7 rappresentano un job di esempio, costituito da tre attività da schedare sulle risorse dell'impianto. Facciamo una distinzione tra schedule comprimibili, cioè che presentano tempi comprimibili e schedule compresse, cioè che non presentano tempi di attesa assorbibili. In particolare, analizziamo il caso in cui per i ritardi di esercizio la finestra temporale prevista per l'erogazione della manutenzione sia posticipata.

Verifichiamo inoltre se sia possibile individuare delle soluzioni ammissibili riducendo i tempi di attesa e di recupero in modo da rispettare la data di consegna definita dalla fine della finestra manutentiva.

Definiamo il fattore di compressione come segue:

$$CF = \frac{\text{Tempo di recupero compresso}}{\text{Tempo Totale di Recupero}} \quad (16)$$

in cui il tempo totale di recupero è dato da $t_u^{fin} - t_u^{ini} - \sum d_i$ (30 minuti nel caso della fig. 6) e il tempo di recupe-

of short-term traffic disturbances that alter the off-line plan of operations. The objective is to re-balance the use of workshop resources to compute of a feasible schedule, i.e. a schedule of all workshop operations within the time windows given by the rolling stock rostering planner and perturbed by traffic disturbances.

Figg. 6 and 7 represent a sample job, made by three activities, to be scheduled in the workshop. We distinguish between a not compressed schedule, i.e. a schedule with some recovery time, and compressed schedule, i.e. a schedule with less recovery time or without recovery time. Specifically, we analyze the case in which the time window start is delayed by unforeseen events and the schedule needs to be compressed accordingly, without reducing the duration of the maintenance activities, in order to schedule all activities within the given time window.

Let's now define a compression factor

$$CF = \frac{\text{Recovery Time to be Compressed}}{\text{Total Available Recovery Time}} \quad (16)$$

where total available recovery time $t_u^{fin} - t_u^{ini} - \sum d_i$ (30 minutes in the case of Figure 6) and recovery time to be compressed is a reduction of time at workshop disposal due to traffic disturbances (20 minutes in the example case of Figure 7).

Fig. 8 reports results on a subset of 63 instances for 9 different values of compressed time windows (0.1, 0.2, ..., 0.9), obtained by delaying the start time of the time windows. For compression values equal to 0.1 – 0.4 we always obtain a feasible solution, while for 0.5 and upper values the number of feasible solutions decreases with the increase of the compression factor. However, we did not find, as we expected, an exact correlation between the computation time and the compression factor, i.e. a systematic increase of computation time when increasing the compression fac-

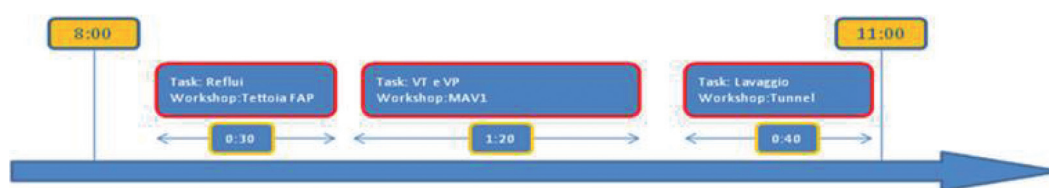


Fig. 6 - Finestra temporale non compressa.

Fig. 6 - Time window not compressed.

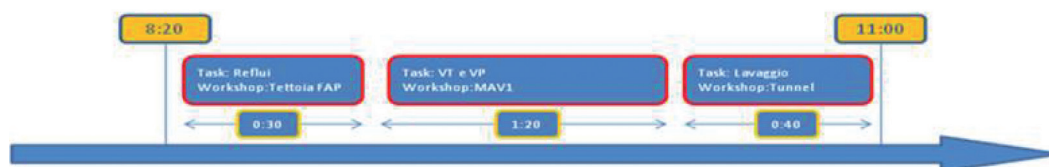


Fig. 7 - Finestra temporale compressa.

Fig. 7 - Time window compressed.

ro compresso è il ritardo con cui l'esercizio rilascia il convoglio alla manutenzione (20 minuti nel caso della fig. 7).

La fig. 8 riporta i risultati medi su un insieme test di 63 istanze per 9 valori differenti di fattori di compressione (0.1, 0.2, ..., 0.9), ottenuti ritardando l'inizio della finestra manutentiva. Per i valori di compressione da 0.1 a 0.4 otteniamo sempre una soluzione ammissibile mentre per valori superiori diminuisce il numero di istanze ancora risolubili. Inoltre, a conferma delle nostre aspettative, non abbiamo individuato una correlazione tra il fattore di compressione e il tempo di calcolo (ad esempio aumento dei tempi di calcolo a causa di un aumento del fattore di compressione). Abbiamo inoltre registrato che alcune istanze compresse sono più "semplici" da risolvere per CPLEX di quelle non compresse.

5. Conclusioni

Questo articolo descrive un approccio innovativo integrato per la turnificazione del materiale rotabile e lo scheduling della manutenzione. È stata proposta una nuova formulazione per il problema della gestione della manutenzione in impianto, ovvero per la ricerca di soluzioni ammissibili con un numero minimo di movimentazioni tra le risorse dell'impianto di manutenzione. Un solutore commerciale di PLI è stato in grado di risolvere casi reali del problema in pochi minuti e pertanto la formulazione proposta potrebbe anche essere utilizzata per il calcolo o l'aggiornamento di programmi manutentivi in tempo reale. Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, si vuole estendere il framework, effettuare analisi di sensibilità e sviluppare nuove formulazioni globali e approcci algoritmici.

Ringraziamenti

Questo lavoro è in parte supportato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, finanziamento numero RBIP06BZW8, progetto FIRB "Sistema avanzato di tracciatura delle merci nei trasporti intermodali". Si ringrazia Trenitalia per i suggerimenti e il supporto offerto nell'analisi dei dati.

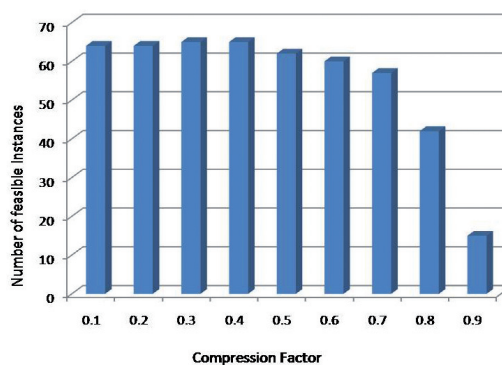


Fig. 8 - Studio del fattore di compressione.

Fig. 8 - Time window compressed.

tor. Surprisingly, for some practical cases we have that compressed instances are easier to solve by CPLEX than uncompressed instances.

5. Conclusions

This paper described a new framework for rolling stock and maintenance scheduling problems. A new formulation is proposed for the workshop maintenance sub-problem, that is to find feasible schedules with a minimum number of movements within the workshop. A commercial solver is able to solve practical-size instances of this problem in a few minutes, so the proposed formulation can also be adopted to compute good quality solutions in real-time. Future research will be dedicated to the improvement of the framework, the analysis of its sensitivity to uncertainty, and the investigation of global formulations and algorithmic approaches.

Acknowledgements

This work is partially supported by the Italian Ministry of Research, Grant number RBIP06BZW8, project FIRB "Advanced tracking system in intermodal freight transportation". We thank Trenitalia managers for their suggestions and support with railway data collection and analysis.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] AHUJA R.K., CUNHA C.B., SAHIN G. (2005), "Network Models in Railroad Planning and Scheduling", Tutorials in Operations Research, pp. 54-101.
- [2] BUDAI G., HUISMAN D., DEKKER R. (2006), "Scheduling Preventive Railway Maintenance Activities", Journal of the Operational Research Society, Vol. 57, N. 9, pp. 1035-1044.
- [3] CAPRARA A., MONACI M., TOTH P., GUIDA P.L. (2006), "A Lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem", Discrete Applied Mathematics, Vol. 154, N. 5, pp. 738-753.

- [4] CORDEAU J.F., TOTTH P., VIGO D. (1998), "A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling", *Transportation Science*, Vol. 32, N. 4, pp. 380-404.
- [5] D'ARIANO A. (2008), "Improving real-time train dispatching: models, algorithms and applications", TRAIL Research School, PhD Thesis T2008/6 (www.rstrail.nl).
- [6] GARG A., DESHMUKH S.G. (2006), "Maintenance management: literature review and directions", *Journal of Quality in Maintenance Engineering* Vol. 12, N. 3, pp. 205-238.
- [7] GIACCO G., D'ARIANO A., PACCIARELLI D. (2013), "Rolling stock rostering optimization under maintenance constraints", *Journal of Intelligent Transportation Systems* (in print). DOI: 10.1080/15472450.2013.801712
- [8] GIACCO G.L., D'ARIANO A., PACCIARELLI D. (2012), "Mixed-integer linear-programming formulations for a railway rolling stock circulation problem", *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Systems for Public Transport*, Santiago, Chile.
- [9] HANSEN I.A., PACHL J. (Eds.) (2008), "Railway Timetable & Traffic: Analysis, Modelling, Simulation", Eurailpress, Hamburg.
- [10] HIGGINS A. (1998), "Scheduling of railway maintenance activities and crews", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, N. 1, pp. 1026-1033.
- [11] KONTAXI E., RICCI S. (2010), "Railway capacity analysis: Methodological framework and harmonization perspectives", *Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research (WCTR 2010)*, J. VIEGAS, R. MACÁRIO (Eds.), Lisbon, Portugal.
- [12] MARCOS N., DE ALMEIDA D., WEBER C. (2008), "Solving Rolling Stock Scheduling Problems at SNCF", *World Congress on Railway Research*, Seoul 2008.
- [13] MÄRTI G., KROON L.G. (2005), "Maintenance routing for train units: the transition model", *Transportation Science*, Vol. 39, N. 4, pp. 518-525.
- [14] PENICKA M., STRUPCHANSKA A., BJØRNER D. (2003), "Train maintenance routing", *Symposium on Formal Methods for Railway Operation and Control Systems*, Hungary.
- [15] RAMOND F., DE ALMEIDA D., DAUZÈRE-PÉRES S., SHERALI H.D. (2012), "Optimized Rostering of Workforce Subject to Cyclic Requirements", *Informatica*, Vol. 36 N. 1, pp. 327-336.
- [16] SATO K., FUKUMURA N. (2012), "Real-time freight locomotive rescheduling and uncovered train detection during disruption", *European Journal of Operational Research*, Vol. 221, N. 3, pp. 636-648.
- [17] SRISKANDARAJAH C., JARDINE A.K.S., CHAN C.K. (1998), "Maintenance Scheduling of Rolling Stock Using a Genetic Algorithm", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, No. 11, pp. 1130-1145.
- [18] WANG L., CHU J., WU J. (2007), "Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process", *International Journal of Prod. Economics*, Vol. 107, N. 1, pp. 151-163.
- [19] WANG W., CHEN H., BELL M.C. (2005), "Vehicle breakdown duration modelling", *Journal of Transportation and Statistics*, 8(1), pp. 75-84.
- [20] WAEYENBERGH G., PINTELON L. (2002), "A framework for maintenance concept development", *International Journal of Production Economics*, Vol. 77, N. 3, pp. 299-313.

Sommaire

OPTIMISATION DE LA CIRCULATION DU MATÉRIEL ROULANT ET DU PROCESSUS D'ENTRETIEN DANS LE COURT TERME

Cet article décrit une nouvelle approche intégrée à la rotation du matériel roulant et à la programmation des activités dans les stations d'entretien. Du relief est donné en particulier aux nouvelles formulations mathématiques pour l'optimisation de l'entretien et à leur expérimentation sur la base des résultats de la rotation du matériel roulant. Les solutions pour de cas réels, obtenues à travers l'emploi d'un logiciel commercial, sont en suite comparées avec les programmes d'entretien adoptés couramment par Trenitalia auprès de la station d'entretien de Naples. Des résultats de l'analyse ressortent que l'intégration de la rotation du matériel roulant avec le calendrier d'entretien implique une réduction significative des coûts opérationnels ainsi que des délais maturés pendant le service, à travers la minimisation des temps de parcours dans les phases d'entretien, conjuguant donc le respect d'un haut niveau de service avec la durabilité des coûts d'emploi.

Zusammenfassung

OPTIMIERUNG DER ZUGVERKEHR UND UNTERHALTUNGS-MASSNAHMEN IN KURZEN ZEITFRISTEN

Ein neues Verfahren verbindet die Diensterteilung der Fahrzeugen in Umlauf Pläne mit der der notwendigen Unterhaltungsmaßnahmen.

Neue mathematische Verfahren und Experimente in Diensterteilung sowie in Unterhaltungsprogrammen wurden in dem Werkstatt Neapel geführt.

Die aus Betrieb gewonnene Beobachtungen bestätigen daß die kombinierte Diensterteilung der Fahrzeugen in Umlauf- und Unterhaltungsplänen zu eine bemerkenswerte Abnahme der Betriebskosten und der Verspätungen führt.

INSERZIONI PUBBLICITARIE SU "INGEGNERIA FERROVIARIA"

Materiale richiesto: CD con prova colore, file in formato TIFF o PDF con risoluzione 300 DPI salvati in quadricromia (CMYK)

c/o CIFI – Via G. Giolitti 48 – 00185 Roma
Indirizzo e-mail: redazionetp@cifi.it

Misure pagine: I di Copertina mm 210 x 160 (+ 3 mm di smarginato per ogni lato)
1 pagina interna mm 210 x 297 (+ 3 mm di smarginato per ogni lato)
1/2 pagina interna mm 180 x 120 (+ 3 mm di smarginato per ogni lato)

Consegna materiale: almeno 40 giorni prima dell'uscita del fascicolo

Variatione e modifiche: modifiche e correzioni agli avvisi in corso di lavorazione potranno essere effettuati se giungeranno scritte entro 35 giorni dalla pubblicazione

"FORNITORI DEI PRODOTTI E SERVIZI"

A richiesta è possibile l'inserimento nei "Fornitori di prodotti e servizi" pubblicato mensilmente nella rivista.

Per informazioni:

C.I.F.I. – Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani – Via G. Giolitti, 48 – 00185 Roma
Sig.ra MANNA Tel. 06.47307819 – Fax 06.4742987 – E-mail: redazionetp@cifi.it

C.I.F.I. – Sezione di Milano – P.za Luigi Di Savoia, 1 – 20124 Milano
Sig. RIVOIRA Tel. 339-1220777 – 02.63712002 – Fax 02.63712538 – E-mail: segreteria@cifimilano.it