

**Alessandra Libardo**

**MORE TRAIN LESS PAIN**

**Un sistema integrato  
di modelli per  
l'ottimizzazione  
degli impianti  
ferroviari**

**FrancoAngeli**

**Collana Trasporti**

La collana trasporti ha iniziato le pubblicazioni ormai da oltre venti anni (1982), sotto la responsabilità scientifica di due prestigiosi studiosi della disciplina, i Professori Ilio Adorasio e Pier Paolo Sandonnini, che seppero caratterizzare i primi volumi per l'intelligente scelta degli argomenti ed il rigore del metodo seguito.

La responsabilità scientifica della collana è stata poi assunta nel 1992 dal Prof. Ennio Cascetta, uno degli attuali direttori, e dal Prof. Giorgio Salerno, che cessa la collaborazione e al quale vanno i nostri ringraziamenti per l'opera svolta.

Il settore dei trasporti sta attraversando una fase di notevoli cambiamenti, sia a livello internazionale che, ancor più, nel nostro Paese.

La crescita e, soprattutto, le modifiche strutturali della domanda di trasporto, la maggiore attenzione alla sicurezza e all'ambiente, la congestione sistematica di infrastrutture e servizi di trasporto, la flessione dei finanziamenti pubblici disponibili, l'avvio di un mercato concorrenziale dei servizi, lo sviluppo tecnologico dei veicoli e dei sistemi di controllo, l'evoluzione delle riflessioni sulla città e le sue opportunità localizzative, hanno fatto crescere enormemente la complessità dei sistemi di trasporto e dei problemi connessi alla loro progettazione e alla loro gestione.

In tutti questi anni, la collana con le sue pubblicazioni, ha saputo evidenziare alcune delle principali tematiche affrontandole con metodologie innovative e grande rigore scientifico che hanno portato a dei contributi originali per la disciplina e all'approfondimento delle problematiche.

La presenza nel panorama editoriale italiano di questa collana, sulla quale pubblicano abitualmente la Sidt (Società italiana docenti dei trasporti) e il Progetto finalizzato trasporti del Cnr, ha certamente consentito ai diversi autori di trovare un punto di riferimento ed un momento di incontro, pur se va ovviamente attribuito ai singoli il merito per la qualità, l'intelligenza e la validità degli argomenti.

Per il futuro ci auguriamo che questa iniziativa possa essere ancora di aiuto, e forse di stimolo, a tutti quegli studiosi e operatori che vorranno contribuire ad una migliore conoscenza dei trasporti ed alla soluzione dei tanto numerosi problemi del settore.

*I direttori*

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: [www.francoangeli.it](http://www.francoangeli.it) e iscriversi nella home page al servizio “Informatemi” per ricevere via e.mail le segnalazioni delle novità.

**Alessandra Libardo**

**MORE TRAIN LESS PAIN**

**Un sistema integrato  
di modelli per  
l'ottimizzazione  
degli impianti  
ferroviari**

**Collana Trasporti**

**FrancoAngeli**

La pubblicazione è stata realizzata con il contributo del Dipartimento per la Ricerca dell'Università IUAV di Venezia.

Copyright © 2012 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

*L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore. L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate sul sito [www.francoangeli.it](http://www.francoangeli.it).*

*Al mio Pp8 e ad Atomino*



# Indice

<b>Premessa</b> , di <i>Eugenio Borgia</i>	pag.	11
<b>Introduzione</b>	»	15
<b>Ringraziamenti</b>	»	19
<b>Organizzazione ed elementi del sistema ferroviario</b>	»	21
1.1 Il processo di liberalizzazione del settore ferroviario	»	22
1.1.1 Gli attori della liberalizzazione	»	22
1.1.2 Effetti della liberalizzazione	»	23
1.2 La pianificazione e la produzione dell'esercizio ferroviario	»	24
1.2.1 Pianificazione strategica, sviluppo della rete ed impianti di stazione	»	26
1.2.2 Pianificazione operativa, la gestione della circolazione: orario di servizio e M53	»	28
1.3 Elementi del sistema ferroviario	»	32
1.3.1 Linee	»	32
1.3.2 Nodi	»	37
<b>Capacità ferroviaria</b>	»	45
2.1 Definizioni	»	45
2.2 Metodi di stima della capacità	»	49



2.2.1 Metodi sintetici combinatori e probabilistici	pag.	50
2.2.2 Metodi analitici descrittivi	»	50
2.2.3 Metodi di saturazione (compattazione tracce)	»	54
2.2.4 Metodi di simulazione (asincroni e sincroni)	»	55
2.2.5 Routing problem	»	56
<b>Analisi statica d'impianto</b>	»	59
3.1. Metodologie per il calcolo del numero medio di circolazioni	»	61
3.2 Modello "Solution n-tuples Junction SNJ"	»	65
3.2.1 Linguaggio e struttura del programma	»	66
3.2.2 Input ed Output	»	68
3.2.3 Elaborazioni: nodo di Padova	»	70
3.2.4 Considerazioni sull'analisi statica	»	76
<b>Verifica degli impianti di stazione</b>	»	78
4.1 Fiche 406	»	79
4.2 Modello "Station Layout Computing SLC"	»	83
4.2.1 Definizioni e notazione	»	85
4.2.2 Le variabili di decisione	»	88
4.2.3 Prima ottimizzazione	»	90
4.2.4 Seconda ottimizzazione	»	92
4.2.5 Indicatori	»	93
<b>Casi studio</b>	»	97
5.1 Camposampiero	»	98
5.1.1 Descrizione dell'impianto	»	98
5.1.2 Analisi statica e input per l'ottimizzazione dell'impianto	»	100
5.1.3 I risultati dell'analisi	»	101
5.1.4 Camposampiero, quale layout?	»	109
5.2 Portogruaro	»	112
5.2.1 Descrizione dell'impianto	»	112
5.2.2 Analisi statica e input per l'ottimizzazione dell'impianto	»	114

5.2.3 I risultati dell'analisi	pag. 117
5.2.4 Gli effetti delle variazioni del programma di esercizio	» 120
<b>Conclusioni</b>	» 127
<b>Bibliografia</b>	» 135



## *Premessa*

di Eugenio Borgia

“Non tutto è perduto!”. C’è ancora speranza se, nonostante l’attuale riconosciuta crisi dell’università in generale e, in particolare, in un settore nevralgico nelle attività di una comunità come è quello dei trasporti (basta ricordare che si è persa memoria del tempo trascorso dagli ultimi concorsi), vi sono ancora dei giovani studiosi che si dedicano con ammirabile impegno, e direi con abnegazione, allo studio ed alla ricerca.

È il caso dell’Autrice di questo libro: laurea in Ingegneria dei Trasporti (Metodi di valutazione e sistemi di supporto alle decisioni per la fattibilità di grandi progetti di trasporto) dopo aver conseguito la Laurea in Architettura (“Un segno in laguna” riguardante la progettazione di un sistema di trasporto, a levitazione magnetica, di collegamento tra l’aeroporto di Tessera e l’Arsenale di Venezia), sempre con il massimo dei voti; dottorato di ricerca in “Infrastrutture e trasporti” presso l’Università degli Studi di Roma “La Sapienza”; attività di collaborazione alla didattica, tutorato, correlatrice di tesi di laurea presso l’Università IUAV di Venezia; numerose pubblicazioni; attiva partecipazione a Congressi e Convegni. Sono state occasione queste ultime per me di apprezzare la sua preparazione confermata dalla diretta collaborazione nello svolgimento nel 2006 di una analisi dei “Trasporti e logistica nel Mediterraneo” su incarico di Sviluppo Italia S.p.A.

Questi brevissimi riferimenti al curriculum dell’Ing. Arch. Libardo in quanto ritengo che, prima di affrontare la lettura di un testo, sia utile una valutazione del profilo culturale dell’autore ed, ancora, poiché il tema, i contenuti e il livello della trattazione lasciano prevedere

che l'interesse per l'opera avrà lunga vita e si spera che la situazione contingente migliori, sia opportuno lasciare una memoria storica delle condizioni ambientali, in questo caso non propense certo a generare entusiasmi, in cui l'attività è stata svolta.

La previsione che l'opera avrà lunga vita è fondata anche sulla scelta del tema: l'individuazione della capacità fornita dall'infrastruttura ferroviaria nel suo complesso come elemento fondamentale per ottimizzare nella pianificazione e nei processi di gestione, in particolare anche in tempo reale, l'impegno delle risorse fisiche disponibili e come punti critici del sistema "i nodi", stazioni, scali merci, posti di movimento, posti di comunicazione, posti di blocco intermedi ...., e, tra questi, le prime per la loro maggiore complessità.

Propedeutico alla esposizione di una metodologia per valutare capacità e dimensionamento di un impianto, che costituisce il contributo originale del lavoro ed è fondata sulla costruzione di due modelli comprensivi di algoritmi e relative procedure informatiche, viene svolto un approfondito ed esauriente esame dello stato dell'arte, come documentato dalla esauriente bibliografia, con riferimento sia agli elementi del sistema ferroviario sia alla pianificazione ed alla produzione dell'esercizio ferroviario. Con una lucida e schematica esposizione l'Autrice consegue perfettamente lo scopo principale che ad esso deve competere a fronte della complessità dell'argomento oggetto di studio: mettere ordine nelle idee degli altri. L'esposizione è tale da consentire, anche a chi si interessa di problemi di trasporto ma non abbia mai studiato il tema specifico dei nodi ferroviari, di comprenderlo nel dettaglio guidandolo così ad intendere poi agevolmente il successivo lavoro e l'importanza dei risultati ottenuti. L'opera assume diciamo così una propria autonomia.

Segue la costruzione dei due modelli, che come già detto costituiscono il contributo originale del lavoro. Il primo modello, che ha per oggetto l'analisi statica di un impianto, prevede la schematizzazione delle caratteristiche fisiche dell'impianto, l'elaborazione della procedura informatica per la costruzione della matrice degli itinerari per le verifiche di compatibilità e costituisce uno strumento utilizzabile per le analisi a livello di pianificazione strategica (5-15 anni). Il secondo modello, grazie agli input forniti dal primo modello, consente le elaborazioni richieste per la stima in tempo reale della potenzialità del nodo con riferimento ad un dato programma di esercizio.

Il lavoro si conclude con la esposizione dettagliata di due casi di studio scelti in accordo con il Gestore dell'Infrastruttura (RFI) che, interessato allo strumento messo a punto, ha fornito tutti i dati di input relativi sia al piano del ferro sia all'esercizio ferroviario. Tra i risultati ottenuti dalla applicazione dei due modelli da segnalare a titolo di esempio: la possibilità con alcune variazioni del piano del ferro di eliminare la ridondanza di alcuni collegamenti (nessun vantaggio e creazione di ritardi), di ottenere un minor consumo di capacità, di introdurre alcune semplificazioni, senza penalizzare le possibilità di circolazione e la potenzialità del nodo o l'individuazione di itinerari aggiuntivi che porterebbero l'impianto alla saturazione, nonché dei suggerimenti in merito alla riduzione od all'incremento del traffico su certe direzioni con relative verifiche.

L'applicazione a due casi concreti e l'esposizione dei risultati liberano il campo da eventuali dubbi che, per la complessità algoritmica dei modelli, potrebbero nascere sulla pratica utilizzazione della metodologia proposta e confermano la possibilità di applicarla, nota la domanda di trasporto, valutando il consumo di capacità e la capacità residua di un impianto e definendone la configurazione ottimale.

Ho accettata e gradita la richiesta di redigere questa breve presentazione, ed ho ritenuto opportuno tracciare una sintesi dei contenuti, oltre che per la stima che nutro per l'Ing. Arch. Libardo e per l'apprezzamento del lavoro, perché spero di contribuire almeno un po' a stimolare quell'interesse degli esperti, dei cultori della materia e degli operatori nel campo ferroviario che l'opera merita ed a che .. ...  
“non tutto sia perduto!”



## *Introduzione*

La liberalizzazione del settore ferroviario avviatasi negli anni '90 e lo scenario di recessione, iniziato nella seconda metà di questo decennio e tutt'ora in atto, hanno accentuato l'importanza di una corretta pianificazione (di breve, medio e lungo periodo) e degli strumenti di supporto alla gestione operativa dell'esercizio, elementi che devono far fronte alle esigenze di volumi di traffico sempre in aumento garantendo elevati standard di qualità del servizio (sicurezza, puntualità, pulizia, ecc.) pur in presenza di un ridimensionamento del supporto finanziario stanziato dallo Stato. La *pianificazione* e i *processi di gestione* del traffico si presentano pertanto come ambiti di studio ove il concetto di ottimizzazione è basilare e ampiamente indagato da numerose ricerche scientifiche a livello nazionale ed internazionale. L'ottimizzazione delle risorse fisiche disponibili, infatti, consente sia la riduzione dei costi di gestione e manutenzione (individuando elementi di rete strategici da implementare ed elementi ridondanti o a bassa utilità da eliminare), sia l'individuazione della miglior "programmazione d'esercizio possibile" (nota o stimata la domanda) che consente di sfruttare al meglio la capacità fornita dall'infrastruttura nel suo complesso. La stessa definizione di capacità e conseguentemente la metodologia adottata per la sua determinazione, è largamente dibattuta in ambito scientifico e operativo. Se gli studiosi concordano nel sostenere che non esiste una capacità "pura" legata all'infrastruttura, ma è possibile definirne esclusivamente una teorica (in quanto legata ad ipotesi d'uso del sistema e quindi variabile in relazione a numerosissimi parametri), i tecnici richiedono sempre più metodi certi per la sua misura o meglio per la valutazione dei *consu-*



*mi di capacità* indotti dall'orario programmato e per la stima della *capacità residua* che consenta loro di ipotizzare un incremento dei volumi di traffico. La messa a punto dell'orario ferroviario rappresenta uno dei momenti cruciali per gestore e utenti dell'infrastruttura. Infatti, un'errata programmazione delle tracce può penalizzare al tempo stesso l'utente finale (viaggiatore), gli operatori ferroviari (imprese), ma anche lo stesso gestore della rete (che non sfrutterebbe appieno le potenzialità del sistema).

I diversi i fronti sui quali è possibile intervenire sono di seguito sintetizzati e suddivisi in tre macrocategorie.

- *Gestione delle dotazioni ferroviarie esistenti*, ovvero le scelte relative l'implementazione del sistema (costruzione di nuove linee o di nuovi impianti) e l'adeguamento dell'esistente (aggiornamento tecnologico, soppressione di alcune linee, semplificazioni di impianti); scelte assunte con l'intento di perseguire una maggior capacità del sistema. Dal punto di vista delle linee, le modifiche in corso riguardano la costruzione di una rete ad alta velocità-alta capacità le cui potenzialità possono essere stimate grazie a numerose metodologie consolidate. Per quanto riguarda gli impianti, si assiste, in particolare in Italia, ad una "specializzazione", per tipologia di traffico e/o direzioni, che porta ad una semplificazione in termini di layout con l'obiettivo di ottenere sia incrementi di potenzialità che risparmi monetari (per effetto della gestione impianti più snelli, ovvero con un numero ridotto di enti tecnologici da controllare). Tali semplificazioni, se non supportate da strumenti scientifici efficienti, rischiano di influire in maniera negativa sull'intero sistema, comportando una perdita complessiva di capacità piuttosto che un aumento.
- *Messa a punto del programma di esercizio e dei prospetti di stazione*, la successione e la tipologia di servizi influenza in maniera diretta la capacità del sistema e delle linee, ma altrettanto importante è l'effetto e la programmazione delle circolazioni negli impianti e la conseguente redazione del Prospetto di stazione. Gli impianti, di norma, sono i luoghi ove i movimenti provenienti da direzioni differenti convergono ed interferiscono; l'ottimizzazione dell'uso della dotazione infrastrutturale prevede l'assegnazione dei treni agli itinerari, ai binari e la programmazione delle contemporaneità dei movimenti, ai fini del ricevimento dei treni e del

controllo delle interferenze. Si tratta di problema decisionale concernente la pianificazione e la gestione ottima delle risorse in sistemi complessi: l'obiettivo in questo caso è la miglior assegnazione (routing problem) possibile del traffico (singoli movimenti di convogli) alla rete (itinerari di stazione), ovvero la soluzione che consente i più elevati valori di capacità all'impianto (numero di treni servibili nell'orizzonte temporale).

- *Ottimizzazione della gestione del traffico in tempo reale*, anch'essa connessa alla robustezza di orario, ovvero quanto questo sia in grado di assorbire eventi inattesi nei processi di circolazione (interruzioni di servizio, ritardi, guasti, ecc.). Tale questione ha dato luogo, in ambito scientifico, alla costruzione di strumenti di supporto alle decisioni che agevolano il dirigente movimento nella scelta dell'uso migliore delle infrastrutture a disposizione riducendo gli effetti di ritardi o disfunzioni del sistema. Tali strumenti sono di non facile messa a punto in quanto fortemente vincolati sia al fatto che la loro efficacia dipende, innanzi tutto, dal tempo di risposta che deve essere pressoché immediato rispetto al verificarsi dell'evento inatteso (presentazione di un treno in ritardo, rilevamento di un guasto, ecc.), sia ai margini (buffer) resi disponibili dall'impostazione d'orario.

Nella convinzione che gli elementi deboli (in termini di capacità) del sistema siano i *nodi* o meglio la loro gestione, la ricerca di dottorato ha affrontato e approfondito alcune delle questioni sopra esposte concentrando l'attenzione sugli impianti ferroviari. La modellizzazione degli impianti ferroviari per l'ottimizzazione e le valutazioni delle capacità ha richiesto la messa a punto di diverse fasi di lavoro ai fini: dell'aggiornamento della letteratura esistente, di apprendimento di un linguaggio di programmazione, di formalizzazione e calibrazione di due modelli, di aggiustamento e validazione degli stessi sulla base dei risultati ottenuti. L'architettura della tesi rispecchia, nella suddivisione in capitoli, il percorso di ricerca condotto ed i risultati ottenuti.

Il primo capitolo richiama, in una panoramica sintetica, le conoscenze acquisite nel tempo sul funzionamento del sistema ferroviario in termini di: gestione pianificatoria, amministrativa, normativa ed operativa dal punto di vista reale e delle principali ricerche scientifi-

che prodotte a supporto dello stesso e con il fine comune di migliorare i servizi.

Il secondo capitolo, corrispondente al primo anno di ricerca, affronta il concetto di capacità (vedi par. 2.1) e descrive le principali metodologie sviluppatesi (vedi par. 2.2), nel panorama scientifico, per la sua determinazione e per la simulazione dei nodi ferroviari.

Il terzo capitolo, descrittivo del lavoro del secondo anno di ricerca, affronta la definizione di *analisi statica* di impianto, illustrando gli strumenti esistenti a partire dai quali è stata possibile la messa a punto di un algoritmo (e della relativa procedura informatica) in grado di condurre tale analisi su impianti di qualsiasi dimensione. Il modello messo a punto, denominato *Solution Ntuples Junction-SNJ*, rappresenta la formalizzazione di procedure consolidate per il calcolo degli indicatori sintetici definiti in letteratura, ma consente anche la determinazione di risultati aggiuntivi di estremo interesse per la lettura statica e per le verifiche complessive di impianto implementate nell'ultimo anno di ricerca.

Il quarto capitolo descrive le questioni relative alle verifiche complessive di impianto e, attività dell'ultimo anno, la messa a punto del modello *Station Layout Computing-SLC*, strumento che integra il modello SNJ inserendo i parametri temporali di occupazione degli itinerari di stazione. L'introduzione di questi ha portato alla realizzazione di uno strumento completo che individua, in relazione alla domanda, l'utilizzazione ottimale della dotazione infrastrutturale a disposizione. Il modello (vedi par. 4.2) infatti, consente di definire la combinazione di itinerari che soddisfano la domanda nel minor intervallo di tempo entro il periodo di riferimento considerato. La conseguenza è la determinazione del consumo di capacità determinato dal programma di servizio adottato, l'identificazione di slot temporali che possono essere utilizzati per la programmazione di nuove circolazioni (treni straordinari piuttosto che aumento dei servizi programmati), nonché la determinazione dell'importanza strategica di alcuni binari o itinerari rispetto ad altri.

Il quinto capitolo riporta le applicazioni condotte su due casi esemplificativi: la stazione di Camposampiero e la stazione Portogruaro.

## *Ringraziamenti*

Il lavoro è stato possibile grazie alla collaborazione attiva del Prof. Giorgio Salerno, che ha dato un supporto continuo alla ricerca sia in termini di aiuto alla scrittura informatica del programma che ai contenuti stessi della ricerca (ponendo domande “scomode e fastidiose” in momenti pessimi); al contributo fondamentale di Paola Pellegrini che ha risolto in un attimo la questione, per lei banale, della compilazione in Xpress delle ottimizzazioni; al professor Stefano Ricci, che ha sopportato lunghe discussioni sul tema e pazientemente corretto le diverse uscite scientifiche occorse nei tre anni di ricerca; alla disponibilità del compartimento RFI di Venezia (Paolo Genovesi in primis) ed in particolare della sezione di Padova ove si sono trascorsi alcuni mesi, nella fase di avvio della ricerca, utili alla comprensione del funzionamento di un impianto complesso di stazione (sotto la guida di Christian Colaneri, con le esposizioni di Fabio Pittarello e con l'accompagnamento canoro di Ermogene Gatto); al professor Agostino Cappelli che ha partecipato vivacemente all'avanzamento della ricerca garantendo con molteplici incarichi scientifici paralleli, nel corso dei tre anni, che la mente non si fossilizzasse al solo tema ferroviario; agli amici che si sono prestati alla rilettura del presente scritto, in particolare Alberta Parolin.