

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Studio della capacità ferroviaria con metodi di simulazione: il nodo merci di Novara



Relatori
prof. Bruno Dalla Chiara
ing. Nicola Coviello

Candidato
Bianca Pascariu

A.A. 2018/2019

Abstract

In un'economia globalizzata, nella quale vecchi paradigmi - relativi alle logiche di produzione, scambio e distribuzione - stanno facendo spazio ad altri nuovi che offrono risposte più efficienti, efficaci e sostenibili, il trasporto occupa un ruolo fondamentale ad ogni livello della catena logistica. Perciò ci troviamo a confrontarci sempre più spesso con reti di scambio globali, come le rotte Far East, integrate da logiche "hub and spoke" per la distribuzione locale. L'attenzione dunque si focalizza sul trasporto di merci, che deve rispondere alla domanda nella maniera più efficace ed efficiente possibile. In questo contesto, la ferrovia acquisisce sempre più quote di mercato, sia per ragioni ambientali, energetiche e di sicurezza, sia economiche. Per farsi un'idea dell'importanza che riveste, si può guardare alla dimensione degli investimenti programmati o avviati a livello nazionale ed europeo in ambito ferroviario. Questo crescendo d'interesse è accompagnato però da un problema non indifferente: la congestione di alcune tratte delle reti ferroviarie, quindi la necessità di garantire un adeguato livello di servizio in termini di capacità e di qualità della circolazione.

La tesi si inserisce proprio in questo ambito di studio dei sistemi di trasporto ferroviari, ovvero delle analisi di capacità e della circolazione ferroviaria. Nello specifico, basandosi su un attuale progetto RFI (Rete Ferroviaria Italiana, gestore dell'infrastruttura ferroviaria nazionale), si propone di studiare la capacità del nodo merci di Novara, a fronte delle modifiche infrastrutturali - totali o parziali - che verranno introdotte sul fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto e sulla linea che dal fascio si connette con i valichi svizzeri, passando per Vignale, con l'obiettivo di valutare se, e in quali condizioni, l'offerta potrà soddisfare le esigenze della domanda attuale o di future previsioni.

Viene dunque svolta un'analisi preliminare del traffico del terminal, considerando anche il contesto più ampio del quale fa parte, relativamente ai Corridoi Mercati. L'elaborato intende inoltre inserirsi in un ambiente integrato di ottimizzazione dell'uso dell'infrastruttura, avvalendosi di uno strumento di simulazione del traffico ferroviario del Dipartimento DIATI - Trasporti del Politecnico di Torino, per studiare la risposta del sistema, compatibilmente con i vincoli e le diverse configurazioni di progetto che si possono presentare.

A livello teorico, l'approccio utilizzato per il calcolo e la valutazione della capacità è basato sulla simulazione e saturazione degli orari ferroviari, approccio che permette di

considerare tutti i parametri significativi che caratterizzano l'esercizio ferroviario. Gli step operativi sono: raccolta dati (infrastruttura, materiale rotabile, esercizio ferroviario), modellizzazione del problema, generazione automatica di un orario fattibile, ottimizzazione e saturazione dell'orario e, infine, valutazione della capacità in termini di numero di tracce e tasso di occupazione dell'infrastruttura. Si è così dimostrato che gli interventi programmati accrescono sensibilmente la capacità teorica globale della rete, identificando il fascio arrivi/partenze come principale collo di bottiglia.

I risultati finali si sono dimostrati molto coerenti con la realtà dell'esercizio ferroviario, convalidando di fatto il metodo utilizzato. Utilizzando infatti un metodo di simulazione, dotato per definizione di una forte base teorica, si riproducono i fenomeni legati alla circolazione ferroviaria in modo molto più affine alla realtà di quanto non lo si faccia con i metodi analitici, con il vantaggio dunque di avere sia in input che in output dati consistenti, a maggiore livelli di dettaglio e affidabili.

Ringraziamenti

La tesi nasce in collaborazione con il gruppo RFI, gestore dell'infrastruttura ferroviaria italiana, nell'ambito di un progetto di riqualificazione e potenziamento infrastrutturale del nodo di Novara. Ringrazio dunque il gruppo RFI ed in particolare l'ing. Mario Grimaldi e l'ing. Luca Bassani, principali referenti all'interno dell'Ufficio Investimenti di Torino e l'ing. Emmanuele Vaghi della Direzione Commerciale di Milano; che hanno reso possibile questa collaborazione e sono stati molto disponibili, sia nella concessione dei dati che per i molteplici riscontri sul progetto e sui risultati della tesi.

Un ringraziamento particolare al mio relatore, prof. Bruno Dalla Chiara, che mi ha guidato fin dall'inizio in questo percorso di tesi; e al mio correlatore, ing. Nicola Coviello, che con una collaborazione costante ha contribuito allo sviluppo di questo elaborato. Sono stati due punti di riferimento che mi hanno trasmesso curiosità e passioni per il mondo dei trasporti che hanno coronato questo percorso accademico.

Ringrazio i miei genitori, le cui esperienze di vita sono state il seme dei frutti che oggi raccolgo; e mio fratello, che mi ha sempre supportato e sopportato.

Infine, sono molto grata a tutti i professori e alle persone che ho incontrato durante questi anni di studio che - chi direttamente, chi indirettamente - hanno contribuito alla mia formazione e al raggiungimento di questo obiettivo.

Indice

Introduzione	1
1 Traffico merci	3
1.1 Scambio merci: panoramica sullo scenario mondiale	3
1.2 Modalità di trasporto lungo la catena logistica e per l’approvvigionamento ..	7
1.3 La rete transeuropea di trasporto TEN-T Corridoi merci europei.....	13
1.4 Intermodalità	18
1.4.1 Unità di trasporto intermodali (UTI)	19
1.4.2 Inland terminal	21
1.4.3 Terminal portuale	26
1.5 Politiche ambientali e trasporti.....	27
1.5.1 Cambiamenti climatici.....	28
1.5.2 Il ruolo dei trasporti	29
1.6 Conclusioni	32
2 Il nodo merci di Novara	33
2.1 Inquadramento territoriale.....	34
2.1.1 Novara nella logistica dei Corridoi Europei	34
2.1.2 Novara nei principali canali di traffico locali	38
2.2 Offerta attuale.....	40
2.3 Studio di domanda	42
2.3.1 Traffico merci attraverso i valichi alpini svizzeri	45
2.3.2 Capacità ferroviaria ed utilizzazione dei valichi	48
2.3.3 Modelli di esercizio futuri.....	50
2.4 Interventi RFI pianificati.....	52
2.4.1 Nodo di Novara 1a Fase.....	55
2.5 Conclusione.....	64
3 Capacità delle reti ferroviarie	66
3.1 Capacità ferroviaria: definizione e parametri incidenti	67
3.1.1 Tipi di capacità	67
3.1.2 Parametri incidenti.....	68
3.2 Metodi di analisi della capacità ferroviaria: stato dell’arte.....	76
3.2.1 Metodi sintetici e analitici.....	77

3.2.2	Metodi di ottimizzazione	79
3.2.3	Metodi di simulazione	81
3.2.4	Capacità dei nodi ferroviari.....	83
3.3	Calcolo della capacità	85
3.3.1	Calcolo dell’orario ferroviario	87
3.3.2	Ottimizzazione e saturazione dell’orario	96
3.3.3	Valutazione della capacità consumata	100
3.4	Conclusioni	102
4	Analisi di capacità del nodo di Novara	103
4.1	Obiettivi	103
4.2	Area di studio	104
4.3	Scenari di studio	105
4.3.1	Scenario 1.....	106
4.3.2	Scenario 2.....	107
4.3.3	Scenario 3.....	108
4.3.4	Scenario 4.....	109
4.4	Metodologia e impostazione delle analisi	110
4.4.1	Inserimento Dati	111
4.4.2	Generazione automatica di un orario fattibile	117
4.4.3	Ottimizzazione dell’orario: saturazione.....	119
4.4.4	Valutazione della capacità: KPIs.....	122
4.5	Risultati	125
4.5.1	Coppie di treni/giorno.....	126
4.5.2	Occupazione dell’infrastruttura.....	132
4.6	Conclusione.....	143
	Conclusione	145
	Prospettive future.....	149
	Appendice A – Capacità pratica del nodo	152
	Bibliografia	163

Introduzione

In un'economia globalizzata, nella quale vecchi paradigmi - relativi alle logiche di produzione, scambio e distribuzione - stanno facendo spazio ad altri nuovi che offrono risposte più efficienti, efficaci e sostenibili, il trasporto occupa un ruolo fondamentale ad ogni livello della catena logistica. Perciò ci troviamo a confrontarci sempre più spesso con reti di scambio globali, come le rotte Far East, integrate da logiche "hub and spoke" per la distribuzione locale. L'attenzione dunque si focalizza sul trasporto di merci, che deve rispondere alla domanda nella maniera più efficace ed efficiente possibile. In questo contesto, la ferrovia acquisisce sempre più quote di mercato, sia per ragioni ambientali, energetiche e di sicurezza, sia economiche. Questo crescendo d'interesse è accompagnato però da un problema non indifferente: la congestione di alcune tratte delle reti ferroviarie, quindi la necessità di garantire un adeguato livello di servizio in termini di capacità e di qualità della circolazione.

La tesi si inserisce proprio in questo ambito di studio dei sistemi di trasporto ferroviari, ovvero delle analisi di capacità e della circolazione ferroviaria eseguite per mezzo dei più recenti metodi di simulazione. Metodi che permettono di considerare tutti i parametri significativi dell'esercizio ferroviario e di ottimizzare l'uso dell'infrastruttura. In particolare, basandosi su un attuale progetto RFI (Rete Ferroviaria Italiana, gestore dell'infrastruttura ferroviaria nazionale), l'elaborato si propone di studiare la capacità ferroviaria del nodo merci di Novara, a fronte delle modifiche infrastrutturali - totali o parziali - che verranno introdotte sul fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto e sulla linea che dal fascio si connette con i valichi svizzeri, passando per Vignale. L'obiettivo è di valutare se, e in quali condizioni, l'offerta potrà soddisfare le esigenze della domanda attuale o di future previsioni; quindi di valutare l'efficacia degli interventi di progetto. L'approccio utilizzato per il calcolo e la valutazione della capacità è basato sulla simulazione e saturazione degli orari ferroviari; impiegando un ambiente integrato di calcolo, analisi e simulazione del traffico ferroviario del Dipartimento DIATI - Trasporti del Politecnico di Torino.

Il Capitolo 1 offre un inquadramento generale dei contenuti. Introduce il settore degli scambi merci con una panoramica sullo scenario mondiale, delineando la dimensione e la geografia delle principali catene di approvvigionamento. Illustra quindi le principali logiche e modalità di trasporto impiegate a tutti i livelli della catena logistica,

soffermandosi in ultima analisi sulla regione europea. Qui la Commissione Europea istituisce la Rete Transeuropea di Trasporto TEN-T e conseguentemente i Corridoi Mercati, all'interno dei quali viene incentivata l'intermodalità dei sistemi di trasporto in relazione a quello ferroviario. Viene dunque introdotto il tema dell'intermodalità con riferimento al trasporto merci, per giungere al tema finale del capitolo: le politiche ambientali.

Con il Capitolo 2 ci si inoltra allo studio del nodo merci di Novara, entrando nel vivo della tesi. Si fornisce dapprima un inquadramento territoriale del nodo con riferimento alla logistica internazionale-europea e locale. Proseguendo, si esegue uno studio dell'offerta e della domanda del nodo in relazione alle linee afferenti al terminal merci di Novara Boschetto, fulcro di tutta l'area logistica. Si identificano così i principali canali di scambio lungo i quali i gestori dell'infrastruttura ferroviaria si propongono di allineare le potenzialità di traffico prospettate; laddove necessario con opportuni provvedimenti ed interventi infrastrutturali. Nei piani di azione, spicca allora il progetto del "Nodo di Novara 1a Fase" che oltre a prevedere un adeguamento agli standard, comporta importanti interventi infrastrutturali che interessano il terminal merci di Novara Boschetto e l'impianto di Vignale. Il progetto, del quale si parlerà approfonditamente nell'ultima parte del capitolo, rappresenta il caso di studio della tesi al Capitolo 4.

Con il Capitolo 3 si inquadra sul piano teorico - prima di affrontarlo su quello pratico nell'ultimo capitolo - il problema dell'analisi e della valutazione della capacità in ambito ferroviario con i più moderni metodi di simulazione e ottimizzazione dell'orario ferroviario. Metodi oggetto di frequenti studi accademici, con l'obiettivo di raggiungere risultati quanto più affini alla realtà dell'esercizio ferroviario. Nel capitolo, dopo aver introdotto il concetto di *capacità ferroviaria* ed i molteplici parametri incidenti, si accenna ai diversi metodi esistenti - analitici, di ottimizzazione e di simulazione - per approdare ai metodi integrati, descrivendo più in dettaglio i principi generali su cui si basano.

I concetti teorici presentati nei capitoli precedenti vengono applicati nel Capitolo 4 al caso studio del nodo merci di Novara. Questo capitolo si propone, dunque, di analizzare la risposta del sistema alle diverse configurazioni del progetto "Nodo di Novara 1a Fase", in termini di capacità (coppie di treni/giorno) e utilizzazione dell'infrastruttura. Sono trattati nel capitolo: definizione degli obiettivi del progetto RFI e conseguentemente del lavoro di analisi della tesi; descrizione dell'area e degli scenari di studio; metodologia impiegata nello svolgimento delle analisi, quindi i risultati per ogni scenario e la loro discussione in relazione agli obiettivi preposti.

1 Traffico merci

La tesi ha come principale obiettivo lo studio della capacità ferroviaria del nodo merci di Novara in relazione agli interventi infrastrutturali previsti dal progetto RFI. Il nodo, dotato di un importante scalo merci, compete non come luogo individuale di gestione dei treni e delle merci, ma come importante cerniera di collegamento all'interno di reti di approvvigionamento su scala europea inserite a loro volta in una dimensione internazionale, delle rotte intercontinentali. Pertanto, per contestualizzare e comprendere l'entità dei temi trattati - perché è importante studiare il traffico merci e la capacità dedita all'interno della rete ferroviaria - si affronterà dapprima un inquadramento generale dei contenuti.

Si introduce quindi il settore degli scambi merci con una panoramica sullo scenario mondiale, delineando la dimensione e la geografia delle principali catene di approvvigionamento. Catene lungo le quali si hanno flussi significativi di merci, il cui vettore è intrinsecamente il sistema di trasporto. Si illustrano quindi le principali logiche e modalità di trasporto impiegate a tutti i livelli della catena logistica, soffermandoci in ultima analisi sulla regione europea. Qui il sistema di trasporto intracontinentale rappresenta il pilastro del mercato interno. Presupposto che motiva la Commissione Europea a istituire la Rete Transeuropea di Trasporto TEN-T e conseguentemente i Corridoi Merci, all'interno dei quali il trasporto è caratterizzato dall'intermodalità dei sistemi. Viene dunque introdotto il tema dell'intermodalità con riferimento al trasporto merci, per giungere al tema finale del capitolo: le politiche ambientali. Politiche che si ripropongono di collimare il rispetto del nostro pianeta con le esigenze economiche.

1.1 Scambio merci: panoramica sullo scenario mondiale

In un mondo in cui la globalizzazione ha portato alla progressiva liberalizzazione degli scambi permettendo nuove strategie d'impresa (delocalizzazione, outsourcing, near-sourcing, nuovi modelli logistici) ed economie di scala, i trasporti hanno acquisito un ruolo sempre più importante se non fondamentale nell'economia mondiale. Basti osservare in Figura 1.1 l'evoluzione degli scambi commerciali¹ registrati dal 1960 al 2017 in relazione al PIL mondiale (World Development Indicators, 2018). L'incidenza degli scambi risulta

¹ Calcolati come media fra gli import e gli export (World Development Indicators, 2018).

notevole, contribuendo oggi giorno per un quarto dell'economia mondiale. Osservando invece l'andamento nel corso degli anni, si può distinguere un'incessante crescita fino al primo decennio dei duemila, anni in cui gli scambi² superano di almeno dieci volte i valori iniziali: da circa 0,13 trilioni³ di dollari statunitensi nel 1960 si arriva a circa 15 trilioni nel 2010 (World Trade Organisation, 2018). Questa importante crescita coincide di fatto con la globalizzazione dei mercati, che vede in questo periodo il suo massimo sviluppo. La globalizzazione, in senso più strettamente economico, è la tendenza dell'economia ad assumere una dimensione sovranazionale, mediante una crescente integrazione dell'economia delle diverse aree del mondo, che porta alla creazione di mercati mondiali o “globali” (Shangquan, 2000).

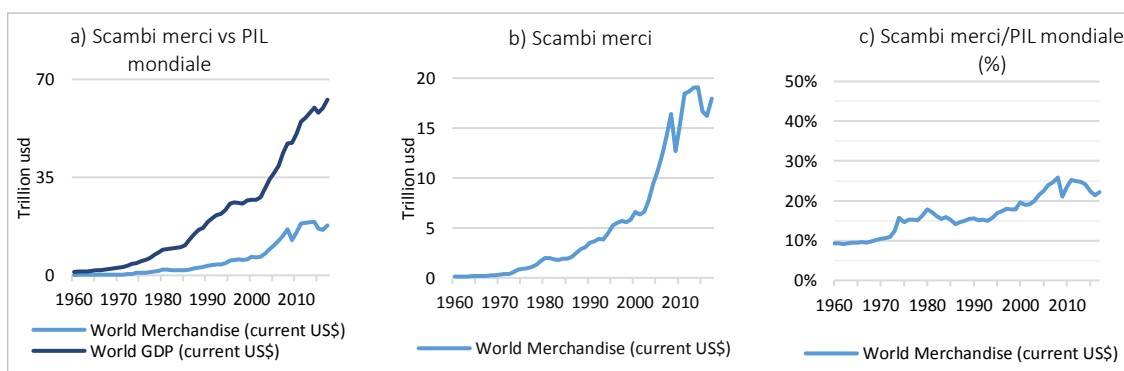


Figura 1.1 Scambi merci vs. PIL mondiale (World Development Indicators, 2018)

Un'evoluzione mutua, quella del processo di globalizzazione e del settore degli scambi merci, basata su innovazioni tecnologiche in ambito trasportistico ed informatico. Sebbene alcuni eventi alla base di quella che poi sarebbe stata una vera e propria rivoluzione del commercio internazionale si possono collocare ben prima degli anni Sessanta del '900 - come l'apertura del canale di Suez che consentì nuove e più veloci rotte marittime o il servizio telegrafico transatlantico che rivoluzionò i tempi di comunicazione internazionali e aprì la strada alle tecnologie nel campo delle telecomunicazioni - la seconda metà del XX secolo segna la svolta nel mondo del trasporto merci con l'introduzione nel 1956 del *container*. Fino agli anni '50 le merci di tipo *general cargo* o *break bulk*, cioè tutte le merci sciolte diverse dal petrolio, carbone o sementi, erano contenute in sacchi o in casse e venivano trasportate manualmente dagli operatori portuali tra la banchina e i rispettivi

² Il valore delle merci scambiate è direttamente proporzionale ai volumi (World Trade Organisation, 2018).

³ Un trilione è pari a mille miliardi, ovvero 10^{12} .

mezzi di trasporto. I container, semplici casse di metallo realizzati con dimensioni standard⁴ (trattati più in dettaglio alla sezione 1.4.2), possono invece essere caricati e scaricati, impilati, trasportati in modo efficiente su lunghe distanze, e trasferiti da un mezzo di trasporto a un altro - navi portacontainer, ferrovie e camion, ad esempio - senza essere aperti ed in modo intrinsecamente automatizzabile. Si ha pertanto un cambiamento epocale nel trasporto merci e in particolare nello shipping, il trasporto delle merci via mare, con profonde modifiche delle navi, dei porti, dei mezzi di carico e scarico, del trasporto terrestre correlato e dell'intera catena logistica.

Il container diventa quindi l'unità base delle movimentazioni delle merci, portando con sé una significativa riduzione dei costi di trasporto: iniziarono ad essere accessibili materie prime e mercati di consumo che prima erano separati da costi del trasporto proibitivi e dalla vera e propria mancanza di collegamenti, ampliando le dimensioni del mercato globale (Cascetta, 2011).



Figura 1.2 Parte del porto di Singapore (Keppel Harbour & Tg. Pagar), nel 1960 a sinistra e nel 2017 a destra (Today, 2017).

Così, Paesi che recepirono la potenzialità del nuovo sistema di trasporto merci ed ebbero le risorse per dotarsi di un'adeguata infrastruttura, sono oggi leader mondiali negli scambi commerciali, principali nodi sulle rotte intercontinentali. Uno degli esempi più eclatanti è quello del Sud-Est asiatico, il cui commercio internazionale ha raggiunto quote al di fuori della norma in tempi relativamente brevi. Negli anni Sessanta questa regione costituiva solo l'8,6% del commercio mondiale, mentre nel 2017 questo valore è salito a ben

⁴ Anche se presenti in diverse dimensioni, la standardizzazione internazionale ha portato alla diffusione dei container da 20' (venti piedi o TEU, *twenty-foot equivalent unit*) e 40' (quaranta piedi o FEU, *forty-foot equivalent unit*), le cui dimensioni esterne ISO sono:

- 20ft (6,06m) lunghezza x 8ft (2,44m) larghezza x 8ft 6in (2,6m) altezza;
- 40ft (12,2m) lunghezza x 8ft (2,44m) larghezza x 8ft 6in (2,6m) altezza.

32,75% (World Trade Organisation, 2018). Una crescita commisurata all'evoluzione dell'infrastruttura portuale che, come nell'esempio di Singapore in Figura 1.2, subisce profondi cambiamenti.

La situazione a livello globale è di forte squilibrio, come si può osservare in Figura 1.3, in cui prevalgono a livello regionale: Asia, Europa e Nord America, insieme rappresentano l'85,6% del commercio mondiale, che nel 2017 ammonta ad un totale di 17,43 trilioni di dollari statunitensi⁵ (World Trade Organisation, 2018). Se passiamo dal livello regionale a quello nazionale si ha una sproporzione ancora più grande, con Cina, Stati Uniti e Germania che effettuano più del 30% degli scambi mondiali (Figura 1.4).

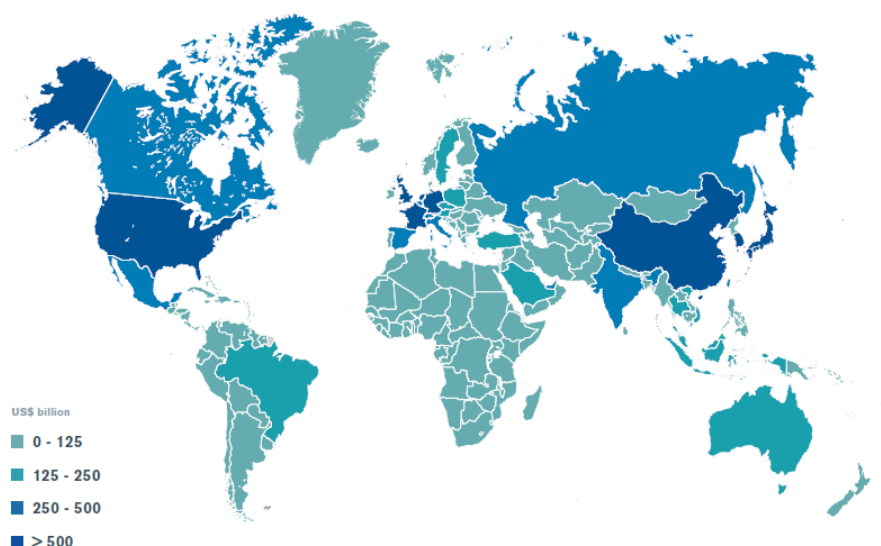


Figura 1.3 Scambi commerciali mondiali, come media degli import ed export, in miliardi di dollari statunitensi (World Trade Organisation, 2018).

In questo scenario l'Europa occupa una posizione non indifferente, collocandosi su scala mondiale al primo posto come regione, con il 37,5% del valore totale degli scambi mondiali contro i 32,7% dell'Asia ed il 16,3% del Nord America (World Trade Organisation, 2018), mentre nella classifica dei Paesi leader, due su cinque sono europei: la Germania al terzo posto e l'Olanda al quinto. Degna di nota è anche la posizione dell'Italia, situata al decimo posto.

⁵ Calcolati come media di import - export; include significanti re-export o import per re-export.

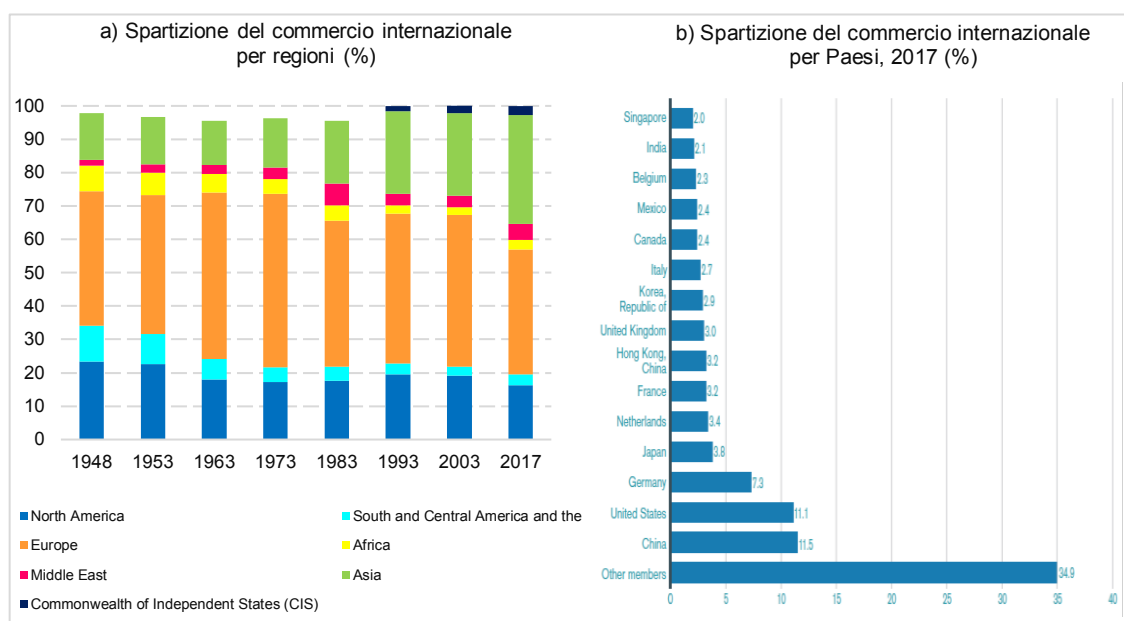


Figura 1.4 Ripartizione del commercio internazionale fra regioni mondiali e Paesi (World Trade Organisation, 2018).

1.2 Modalità di trasporto lungo la catena logistica e per l'approvvigionamento

Come comprovato dai numeri, il settore degli scambi merci possiede una dimensione rilevante, dall'alto valore monetario e dai grandi volumi scambiati². Il vettore di questi flussi è per definizione il sistema di trasporto; vediamo dunque, quali sono le principali logiche e modalità di trasporto impiegate, considerata la rete globale.

Nel commercio internazionale, assunto pressoché costante l'ordine di grandezza delle distanze percorse⁶, la scelta modale è condizionata principalmente da due fattori (Schramm & Zhang, 2018), (Hillman, 2018):

- il *costo del trasporto*, in relazione alle quantità e al valore delle merci trasportate;
- il *tempo di consegna*, in relazione alle esigenze della domanda.

La modalità di trasporto scelta nella grande maggioranza dei casi risulta quella marittima con navi portacontainer (Figura 1.5): soluzione ottimale per il trasporto sia di grandi che

⁶ Grandi distanze dell'ordine delle migliaia di chilometri.

di modeste quantità, se si prediligono i costi di trasporto ai tempi di consegna (Figura 1.6). Solo in secondo luogo si fa ricorso al trasporto aereo e in minor misura a quello stradale e ferroviario, per ridotte quantità di merci, generalmente di maggior valore, e che richiedono tempi di consegna più rapidi.

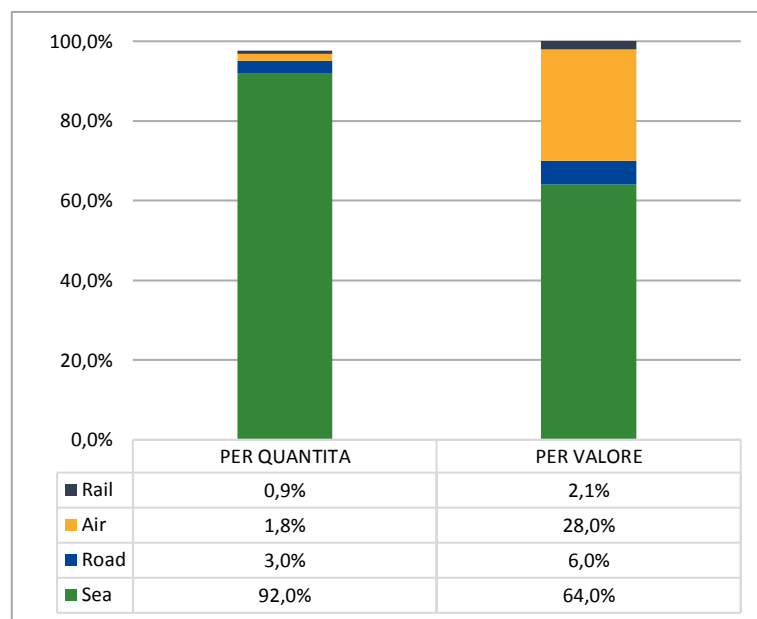


Figura 1.5 Ripartizione modale in base alle quantità e al valore delle merci trasportate tra Asia ed Europa. Dati estratti da (Hillman, 2018) basati su “Eurostat, CEI, Commissione Europea”.

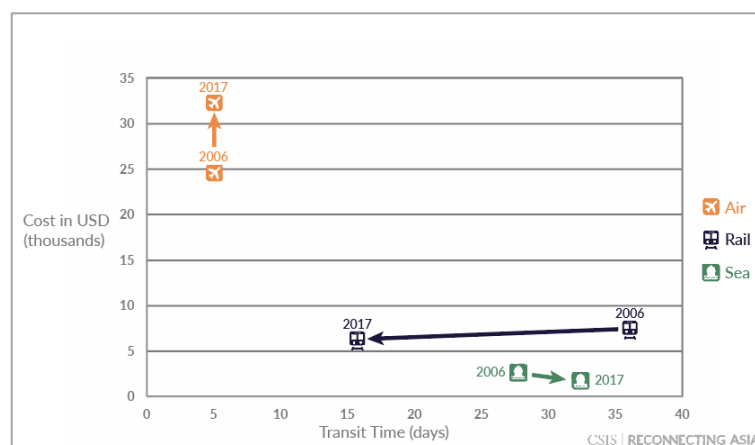


Figura 1.6 Costi di trasporto e tempi di transito per diverse modalità di trasporto nel 2006 e 2017, tra Shanghai ed Amburgo. Estratto da (Hillman, 2018) basato su (Schramm & Zhang, 2018).

Il trasporto ferroviario occupa un posto marginale nel commercio internazionale, ma date le attuali tendenze del mercato verso logiche *pull*⁷ - che per definizione sono attuabili laddove non si hanno delle economie di scala e nel caso di tempi di consegna rapidi: la ferrovia sembra rappresentare il giusto compromesso fra costi e tempi (Figura 1.6), adatta a rispondere in modo dinamico alla domanda. Si prospetta quindi una sua importante crescita a servizio del commercio internazionale nel medio e lungo periodo. È questo il caso dei collegamenti ferroviari euroasiatici adibiti al trasporto merci tra Far East ed Europa che secondo (UIC, Roland Berger, 2017) sembra destinato a crescere del 14,7% ogni anno per il prossimo decennio (Figura 1.7).

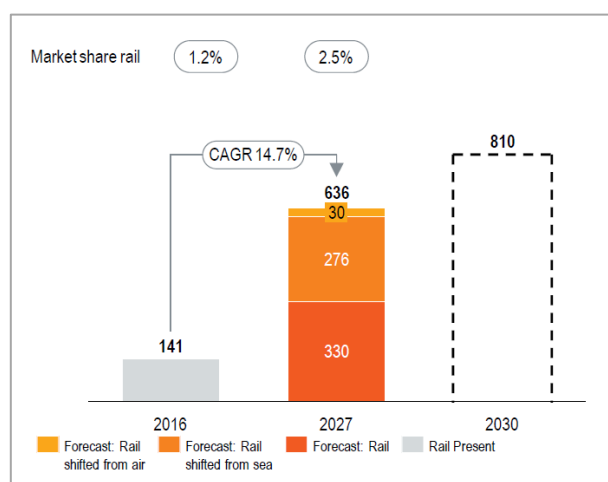


Figura 1.7 Previsioni del potenziale della ferrovia Euroasiatica (in 1000 TEU) (UIC, Roland Berger, 2017).

A livello regionale e locale la scelta modale diventa invece un problema più complesso, influenzato dai *modelli logistici di distribuzione* e dalle *dinamiche porto - hinterland*⁸. Dinamiche che come proposto da (Rodrigue & Notteboom, 2017), possono essere caratterizzate da quattro fattori interconnessi fra loro (Figura 1.8), che vanno da una prospettiva funzionale ad una spaziale:

⁷ Logica *pull*: è una logica di produzione in cui si cerca di produrre esattamente quanto richiede il mercato, sia sotto il profilo quantitativo sia che qualitativo. Tale logica richiede una soluzione soddisfacente alla rapidità di consegna, occorre organizzare tutta una catena di fornitura logistica di tipo just in time nella quale i tempi di risposta della produzione sono rapidi nel seguire una domanda che varia in continuazione.

⁸ *Hinterland* (in italiano “retroterra”): la regione, nazionale o internazionale, che è origine della mercanzia imbarcata in un porto e destinazione della mercanzia sbarcata nello stesso. Area di influenza di un porto nel suo intorno. Con la stessa connotazione di “area di influenza” può essere impiegato anche nel caso di centri industriali di grande portata, chiamati nodi.

- la *posizione geografica* dei nodi della rete, da cui ne deriva le distanze che intercorrono fra di essi e l'accessibilità. Solitamente i nodi sono collocati vicino alle principali rotte marittime e/o vicino a centri di produzione e consumo cercando di raggiungere un'elevata accessibilità del mercato. A tale scopo devono essere serviti da infrastrutture e sistemi di trasporto efficienti;
- l'*infrastruttura*, ovvero la fornitura dell'infrastruttura di base - sia per gli archi che per i nodi - nel sistema di trasporto. In un mercato orientato alla domanda il livello infrastrutturale serve i livelli di *trasporto* e *logistica* (Figura 1.8);
- il *trasporto*, comporta l'esercizio di servizi di trasporto sugli archi tra i nodi, all'interno del sistema di trasporto. Nel caso di sistemi multimodali devono essere gestite anche le operazioni di trasbordo nei nodi del sistema;
- la *logistica*, riguarda l'organizzazione delle reti di trasporto e la loro integrazione in catene logistiche più ampie. A questo livello gli operatori, i fornitori di servizi logistici e le altre parti del mercato progettano le soluzioni di instradamento⁹ che meglio si adattano alle *supply chain*¹⁰ in cui sono inseriti. Questo vuol dire progettare la rete di distribuzione, scegliere i servizi e i nodi corrispondenti e la combinazione delle modalità di trasporto.

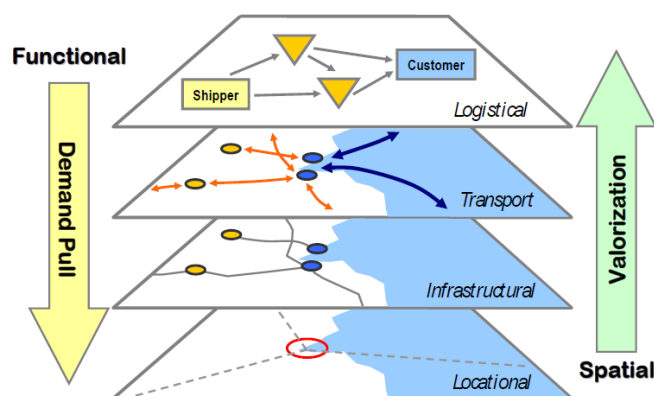


Figura 1.8 Fattori incidenti sulle dinamiche porto - hinterland (Rodrigue & Notteboom, 2017).

A livello regionale dell'Unione Europea, i trasporti relativi al 90% del commercio estero sono effettuati via mare (Unione Europea, 2014) mentre per il commercio interno il trasporto stradale domina ancora sulle brevi e medie distanze. Dalla Figura 1.9 (Eurostat,

⁹ *Routing*, in inglese.

¹⁰ Catene logistiche/di approvvigionamento, in italiano.

2018), che raffigura la spartizione modale nel commercio interno europeo nel 2016, si può osservare per l'appunto che il trasporto stradale si colloca al primo posto con il 50,9% delle tonnellate-chilometro¹¹ totali, seguito dal trasporto marittimo, dalla ferrovia e dal trasporto per vie navigabili interne. All'ultimo posto, con meno dell'1 %, si colloca il traffico cargo aereo, il cui rapporto costi-valore, come visto in Figura 1.5, è spesso abbondantemente superiore alle altre modalità di trasporto.

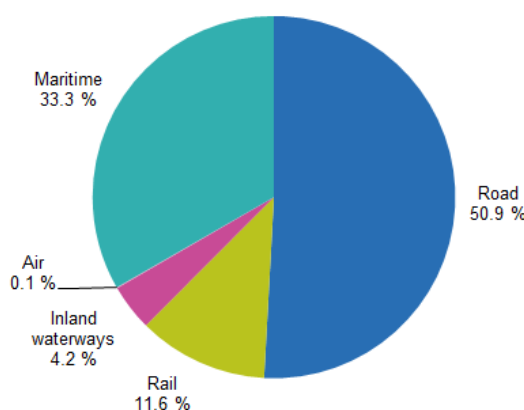


Figura 1.9 Ripartizione modale all'interno dell'EU28 (% di t-km) nel 2016 (Eurostat, 2018).

Riassumendo schematicamente il percorso delle merci lungo tutta la catena di approvvigionamento, con particolare riferimento all'Europa¹², questo si articola come segue. Le merci viaggiano in primis su immense navi portacontainer¹³ lungo le principali rotte intercontinentali: Far Est - Europa, Transatlantico e Transpacifico (Figura 1.10) (ITMMA, 2009). Le navi più grandi che operano su queste rotte, fanno scalo solitamente in un numero limitato di porti, *hub* specifici. Questa razionalizzazione delle fermate è dettata dalla *corsa al gigantismo navale*¹⁴ avvenuta nell'ultimo ventennio che ha portato ad un incremento sproporzionato delle dimensioni delle navi - pescaggio, lunghezza e larghezza - richiedendo nuove e più esigenti caratteristiche infrastrutturali come la profondità del fondale e la lunghezza delle banchine, escludendo a priori i porti non dotati. L'aumento di scala delle navi ha inoltre determinato un aumento dei costi operativi, spingendo le

¹¹ Prodotto delle tonnellate utili trasportate per i km percorsi (t-km).

¹² Si segue una direzione del flusso in cui l'Europa è la destinazione del traffico internazionale, nella direzione opposta il percorso sarà uguale, ma opposto.

¹³ Inserisci numero di container trasportabili per nave.

¹⁴ Dal 2006 in poi sono state costruite navi di dimensioni 6-7 volte superiori, in termini di capacità di carico di container, rispetto a vent'anni prima, con portate da 11.000 e 14.000 TEU circa, di lunghezza fino a 360 m circa. Dal 2012 circa sono state progettate navi con capacità anche da 18.000 TEU, fino ad arrivare nel 2017 a toccare il record di capacità di 20.000 TEU (Dalla Chiara, 2015).

compagnie marittime a ridurre il tempo totale di viaggio (ITMMA, 2009). Tutto ciò si traduce nell'attuazione di un modello di rete “hub and spoke”, caratterizzato da un numero limitato di nodi principali per rotta, *hub strategici*, con ciascun hub che presenta un'elevata connettività - in termini di frequenza e range di porti serviti - a porti secondari nella rete o a terminal nei principali mercati interni. Seguendo la logica *hub and spoke* l'ultima parte del flusso può essere realizzata via mare, con navi di minori capacità o *feeder* (UN/ECE, 2001), oppure usando una combinazione delle modalità di trasporto per la parte terrestre. In Figura 1.11 sono rappresentati gli hinterland dei principali porti europei. Per completare il mercato interno, è essenziale che i trasporti dispongano di connessioni intermodali veloci, efficienti e affidabili, di un'appropriata infrastruttura e reti di trasporto efficienti. A tale scopo l'Unione Europea ha deciso di istituire fin dai suoi albori la rete transeuropea di trasporto TEN-T, un ambizioso progetto a lungo termine per modernizzare e collegare fra loro le reti nazionali e creare una rete interconnessa che colleghi tutte le regioni europee e utilizzi al meglio i diversi modi di trasporto.

L'ultimo tratto della catena logistica è costituito dal cosiddetto “ultimo miglio”. Questo implica la consegna della merce al consumatore finale, una porzione della catena che a seconda dei casi può essere inclusa nei tratti già citati o può essere affrontata separatamente.



Figura 1.10 Esempi di servizi di linea sulle rotte commerciali in relazione all'Europa. Fonte: (ITMMA, 2009) basato sui siti web degli operatori di linea.

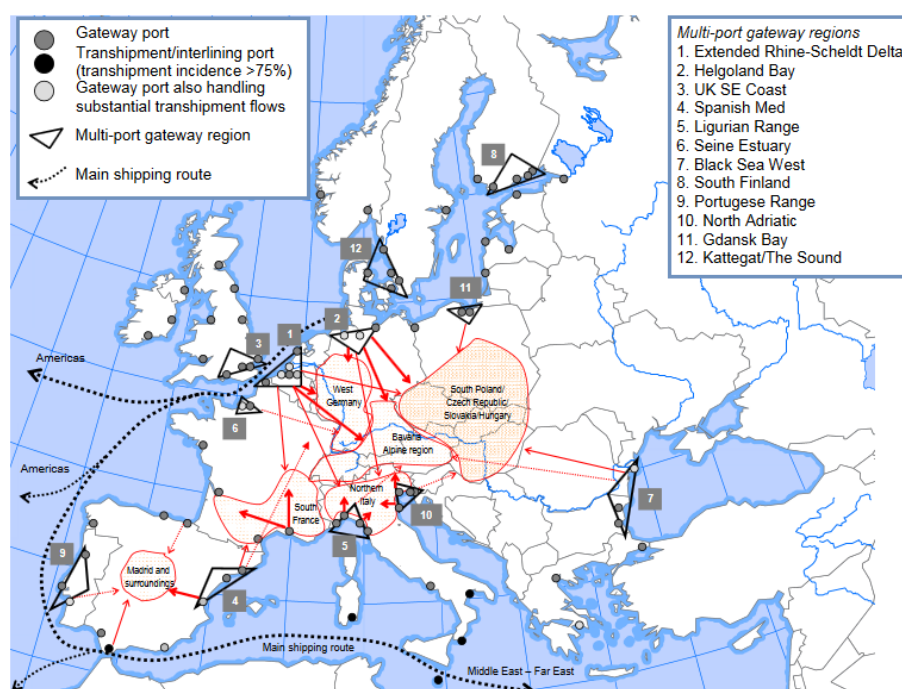


Figura 1.11 Principali hinterland dell'Europa continentale (ITMMA, 2009)

1.3 La rete transeuropea di trasporto TEN-T

Corridoi merci europei

Come descritto nella sezione precedente, per completare il trasporto delle merci lungo la catena di approvvigionamento fino agli hinterland, e dunque al mercato interno di una regione, bisogna disporre di un'adeguata infrastruttura e di reti di trasporto efficaci ed efficienti, in accordo con i quattro fattori caratteristici delle dinamiche porto - hinterland proposti da (Rodrigue & Notteboom, 2017). Il trasporto rappresenta pertanto il pilastro del mercato interno di una regione, nel nostro caso dell'Unione Europea. Su questi presupposti la Commissione Europea ha deciso di istituire la rete transeuropea di trasporto (TEN-T) con l'obiettivo di rafforzare in modo mirato l'interconnessione delle reti infrastrutturali nazionali e la loro interoperabilità. La rete, che nasce come un insieme discontinuo di progetti, in seguito ad opportune analisi di mercato - come quella in Figura 1.11 realizzato da (ITMMA, 2009) per il traffico merci - arriva ad essere definita da corridoi ben definiti.

La TEN-T nasce ufficialmente nel 1993 sulla base del *Titolo XVI - articoli 170, 172 - del Trattato sul Funzionamento dell'Unione Europea*, nell'ambito di un più ampio

sistema di reti transeuropee che comprende una rete di telecomunicazione (eTEN) e una rete energetica (TEN-E). In prima fase, il programma TEN-T comprende centinaia di progetti (Figura 1.12) definiti come studi o lavori, il cui scopo ultimo, come già accennato, è garantire la coesione, l'interconnessione e l'interoperabilità della rete transeuropea di trasporto, nonché l'accesso ad essa. I progetti TEN-T, che si trovano in tutti gli Stati membri dell'UE, comprendono tutti i modi di trasporto - strada, rotaia, marittimo, vie navigabili interne ed aereo - unitamente alla loro logistica, co-modalità e innovazione. Fra tutti, erano stati definiti 30 progetti prioritari per lo sviluppo europeo e l'integrazione orizzontale della rete. Più nello specifico, i progetti TEN-T mirano a (European Commission, 2013):

- stabilire e sviluppare i collegamenti chiave e le interconnessioni necessarie ad eliminare i colli di bottiglia esistenti;
- realizzare i collegamenti mancanti e completare i percorsi principali, in particolare nelle sezioni transfrontaliere;
- attraversare le barriere naturali;
- migliorare l'interoperabilità sulle rotte principali.

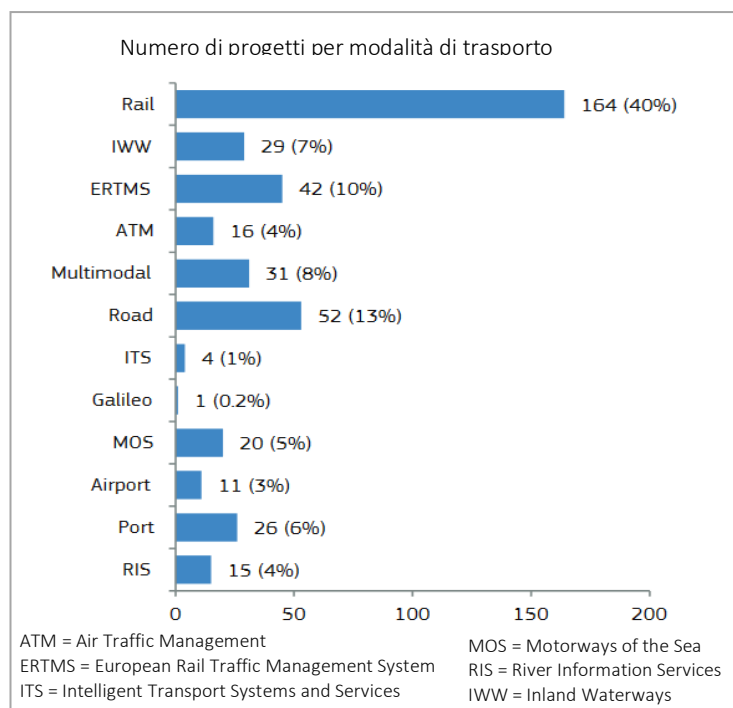


Figura 1.12 Programma TEN-T 2007 - 2013: numero di progetti per modalità di trasporto (European Commission, 2013).

In Figura 1.12 sono illustrati il numero di progetti del programma TEN-T fra il 2007 ed il 2013, classificati per modalità di trasporto. Nonostante siano compresi tutti i modi di trasporto, vige la supremazia della ferrovia con circa il 50% del totale. Come si vedrà più avanti, questa modalità di trasporto è prediletta alle altre sulle medie - lunghe distanze sia per ragioni ambientali, energetiche e di sicurezza, sia per ragioni economiche.

Nel 2009 viene avviata una revisione sostanziale - in chiave energetica ed ambientale - della politica europea dei trasporti che conduce ad un nuovo quadro legislativo¹⁵, entrato in vigore dal 1° gennaio 2014 che definisce lo sviluppo della politica dei trasporti fino al 2030/2050. In questa occasione vengono riviste anche le linee guida della TEN-T, che ispirandosi al Libro Bianco dei Trasporti del 2011, propone fundamentalmente i seguenti obiettivi (Commissione Europea, 2011): ridurre del 60% le emissioni di gas serra entro il 2050 rispetto ai livelli del 1990¹⁶; ottimizzare le prestazioni delle catene logistiche multimodali; aumentare l'efficienza dei trasporti e delle infrastrutture facendo ricorso a sistemi informatici ICT¹⁷. Inoltre, la vecchia strategia TEN-T - progetti prioritari - rifletteva i principali flussi di traffico fra un punto iniziale ed un punto finale, senza tenere conto della loro continuità e quindi senza cogliere i "benefici supplementari derivanti dalla rete" (Commissione Europea, 2009). I nuovi orientamenti dell'Unione per lo sviluppo della rete transeuropea dei trasporti prospettano allora alla creazione di una rete TEN-T articolata in due livelli:

- una rete globale (da realizzarsi entro il 2050) che mira a garantire la piena copertura del territorio dell'UE e l'accessibilità a tutte le regioni;
- una rete centrale a livello UE (da realizzarsi entro il 2030) basata su un approccio "per corridoi", concetto di *Core Network Corridors* (CNC). I corridoi della rete centrale dovranno includere almeno tre modalità differenti di trasporto; attraversare almeno tre Stati membri e prevedere l'accesso ai porti marittimi.

La rete centrale è articolata in nove corridoi principali (Figura 1.13): due corridoi nord-sud, tre corridoi est-ovest e quattro corridoi diagonali. Sono corridoi multimodali, la cui

¹⁵ Il nuovo quadro legislativo è costituito dagli orientamenti dell'Unione per lo sviluppo della rete transeuropea dei trasporti (regolamento (UE) n. 1315/2013) ed il Connecting Europe Facility (CEF) (regolamento (UE) n. 1316/2013).

¹⁶ Corrispondente a una riduzione delle emissioni di circa il 70% rispetto ai livelli del 2008. Per il 2030 l'obiettivo del settore dei trasporti è una riduzione delle emissioni di gas serra del 20% rispetto ai livelli del 2008.

¹⁷ Information and Communication Technologies.

struttura portante però è costituita da corridoi per il trasporto ferroviario definiti da specifici regolamenti europei, separatamente dalla TEN-T.

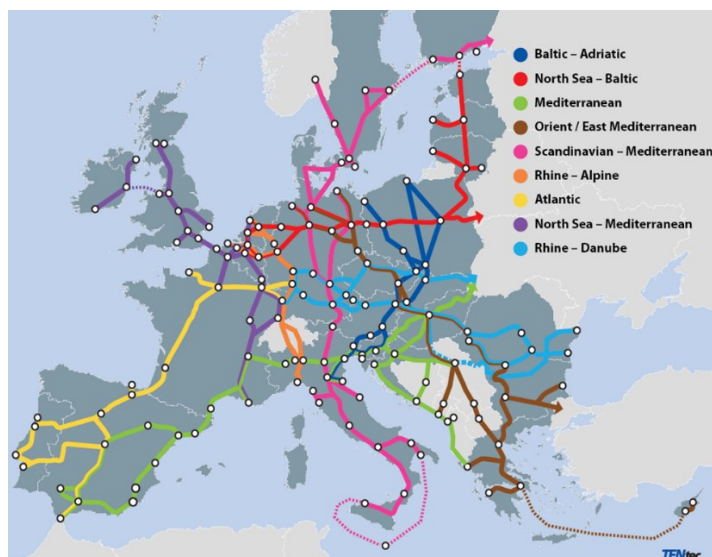


Figura 1.13 TEN-T Core Network Corridors (Commissione Europea, 2019).

Distinguendo fra traffico passeggeri e merci, nel 2010 è stato adottato dal Parlamento Europeo il Regolamento UE 913/2010 concernente “una rete ferroviaria europea per un trasporto merci competitivo”. Il Regolamento è stato elaborato con l'obiettivo generale di aumentare l'attrattiva e l'efficienza del trasporto merci su rotaia, in modo che la ferrovia possa aumentare la sua competitività e la sua quota di mercato sul mercato europeo dei trasporti. Per conseguire tale obiettivo il Regolamento propone di rafforzare la cooperazione a tutti i livelli, in particolare tra gestori dell'infrastruttura, lungo specifici corridoi ferroviari per il trasporto merci¹⁸. Detti corridoi si prefigurano al duplice scopo di (Rail Net Europe, 2018):

- sviluppare i corridoi ferroviari per il trasporto merci in termini di capacità e prestazioni al fine di soddisfare la domanda del mercato sia quantitativamente che qualitativamente;
- porre le basi per la fornitura di servizi di trasporto merci di buona qualità che soddisfino le aspettative dei clienti.

Si definiscono così nove corridoi ferroviari - *Rail Freight Corridors* (RFC), Figura 1.14 - adibiti al trasporto merci e allineati alla rete Core TEN-T, dotati di una propria

¹⁸ Rail Freight Corridors (RFC)

personalità giuridica e di un proprio organismo di governance. I primi sei corridoi¹⁹, sono entrati in funzione nel 2013, mentre i restanti tre nel 2015²⁰.

Nel Libro bianco dei Trasporti del 2011, oltre gli obiettivi sopra menzionati, la Commissione europea stabilisce che "il 30% del trasporto stradale oltre i 300 km dovrebbe trasferirsi ad altre modalità come il trasporto ferroviario o vie navigabili entro il 2030 e oltre il 50% entro il 2050, agevolato da corridoi merci efficienti e verdi" (Commissione Europea, 2011). Affinché questo sia realizzabile dev'essere garantita in primis un'infrastruttura adeguata. Per la ferrovia questo si traduce nel garantire: elettrificazione delle linee, equipaggiamento ERTMS²¹, carico per asse da 22,5 t, velocità di 100 km/h, sagoma adeguata agli standard europei e possibilità di operare treni da 740 m. Essenziale per i gestori dell'infrastruttura è anche **ottimizzare** l'utilizzo della rete ferroviaria esistente in modo tale da poter accogliere e gestire uno sviluppo del mercato restando competitivi. In questo contesto i corridoi ferroviari RFC trovano la loro principale ragione d'essere, per organizzare le linee e gli impianti esistenti in un concetto di rete integrata per riuscire a sostenere il maggior volume di traffico.

L'Italia occupa una posizione di spicco nella rete RFC, essendo interessata da quattro dei nove corridoi merci:

- il Corridoio Reno-Alpi RFC1, che passa per i valichi di Domodossola e Chiasso e giunge al porto di Genova;
- il Corridoio Scandinavo-Mediterraneo RFC3, che dal valico del Brennero collega Trento, Verona, Bologna, Firenze, Livorno e Roma con i principali centri urbani del sud come Napoli, Bari, Catanzaro, Messina e Palermo;
- il Corridoio Baltico - Adriatico RFC5, che collega l'Austria e la Slovenia ai porti del Nord Adriatico di Trieste, Venezia e Ravenna, passando per Udine, Padova e Bologna;
- il Corridoio Mediterraneo RFC6, che attraversa il Nord Italia da Ovest ad Est, congiungendo Torino, Milano, Verona, Venezia, Trieste, Bologna e Ravenna.

¹⁹ In ordine dal primo al nono: RFC1 Reno-Alpi; RFC2 Mare del Nord-Mediterraneo; RFC3 Scandinavo-Mediterraneo; RFC4 Atlantico; RFC5 Baltico-Adriatico; RFC6 Mediterraneo; RFC7 Oriente/Mediterraneo Orientale; RFC8 Mare del Nord-Baltico; RFC9 Reno-Danubio.

²⁰ Sebbene tutti e nove i corridoi ferroviari per il trasporto merci siano stati istituiti e siano operativi, continueranno a evolversi.

²¹ ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System/European Train Control System) è un sistema di gestione, controllo e protezione del traffico ferroviario e relativo segnalamento a bordo, progettato allo scopo di sostituire i molteplici, e tra loro incompatibili, sistemi di circolazione e sicurezza delle varie Ferrovie Europee allo scopo di garantire l'interoperabilità dei treni.

Questi corridoi costituiscono la cornice in cui inserisce il nodo merci di Novara, trattato specificatamente al capitolo successivo (Capitolo 2).

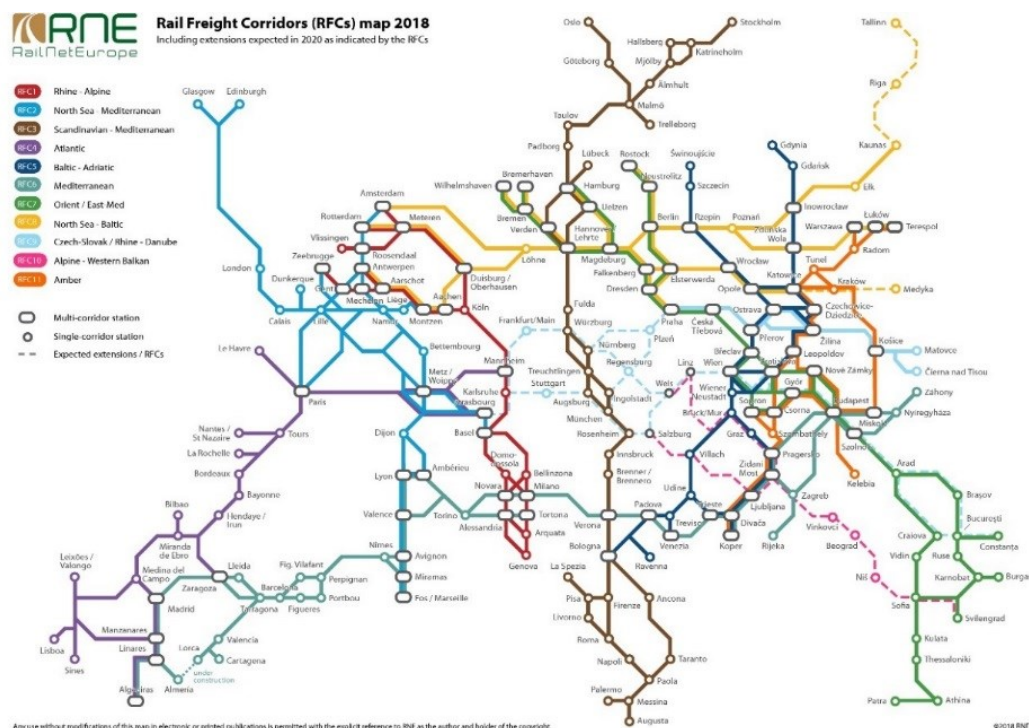


Figura 1.14 Corridoi merci ferroviari RFC (Rail Net Europe, 2018).

1.4 Intermodalità

Di norma il traffico merci non inizia e termina esclusivamente in un corridoio ferroviario RFC, perciò il regolamento (UE) n. 913/2010 impone agli Stati membri di promuovere l'intermodalità tra ferrovia e altre modalità di trasporto integrando i terminali nel processo di gestione del corridoio.

Per *intermodalità* - relativamente al trasporto merci - si intende il trasporto di merce mediante una medesima unità di carico o veicolo che utilizza in successione due o più modi di trasporto (stradale, ferroviario, fluviale, marittimo) senza alcuna manipolazione della merce stessa durante i trasferimenti tra le modalità (UN/ECE, 2001). Il terminal intermodale è dunque l'infrastruttura dove si effettua il trasferimento modale di unità di trasporto intermodali (UTI). In base alla tecnica di trasbordo utilizzata i terminal vengono dotati dei necessari impianti. Nel linguaggio internazionale, i terminal per il trasporto combinato strada-rotaia vengono spesso definiti *inland*, in contrapposizione ai *terminal*

per container situati presso i porti (Dalla Chiara, 2015), chiamati anche terminal portuali (De Oña Lopez, 2017). La Figura 1.15 fornisce una rappresentazione semplice del trasporto merci intermodale su strada.

A seguire si faranno degli accenni alle unità di trasporto intermodali e al funzionamento dei terminal - inland e portuali - rimanendo in un'ottica "ferroviaria" in linea con l'ambito di applicazione della tesi. Pertanto, si escluderanno dalla trattazione le combinazioni di trasporto che non implicano almeno per un tratto del loro percorso la ferrovia. Per una trattazione completa dei temi si rimanda a (Dalla Chiara, 2015).

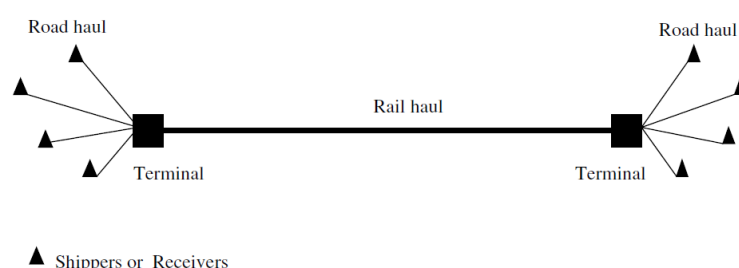


Figura 1.15 Trasporto intermodale strada-rotaia (Macharis & Bontekoning, 2004)

1.4.1 Unità di trasporto intermodali (UTI)

L'unità di trasporto intermodale costituisce l'elemento basilare per il trasporto intermodale. In senso lato con essa si intende una struttura rigida ed indeformabile generalmente unificata nelle dimensioni ed in alcune sue componenti, in particolar modo quelle coinvolte nelle operazioni di movimentazione, adatta al contenimento e protezione della merce ed al trasferimento meccanico tra differenti modi di trasporto. Le principali tipologie di unità di trasporto intermodale sono (Dalla Chiara, 2015):

- container marittimo (a norme ISO²²) nel trasporto marittimo;
- container terrestre, semirimorchio, cassa mobile (a norme UIC²³ e CEN²⁴) nel trasporto stradale.

²² "International organization for standardization" è la più importante organizzazione a livello mondiale per la definizione di norme tecniche.

²³ La "Union internationale des chemins de fer" è istituzione di normazione internazionale specializzata nel mondo dell'industria del trasporto ferroviario.

²⁴ Il "Comitato europeo di normazione" è un ente normativo che ha lo scopo di armonizzare e produrre norme tecniche in Europa in collaborazione con enti normativi nazionali e sovranazionali quali per esempio l'ISO.

L'unità di trasporto intermodale utilizzata nel trasporto marittimo è il *container*, concepito per il trasporto su navi portacontainer, con estensioni intermodali terrestri, ferroviarie e stradali, adatto alla movimentazione verticale, non prevedendo parti rotabili per un trasporto diretto orizzontale. Il container è concepito per essere facilmente movimentabile, soprattutto nelle fasi di trasferimento tra modi di trasporto differenti; è adatto per lo stivaggio e trasbordo rapido.

Il container è stato unificato dall'ISO, che ne ha fissato dimensioni e masse, norme costruttive e di collaudo, sovrapponibilità. La standardizzazione internazionale ha portato alla diffusione dei container da 20' (venti piedi o TEU, twenty-foot equivalent unit) e 40' (quaranta piedi o FEU, forty-foot equivalent unit), le cui dimensioni esterne ISO sono:

- 20ft (6,06m) lunghezza x 8ft (2,44m) larghezza x 8ft 6in (2,6m) altezza;
- 40ft (12,2m) lunghezza x 8ft (2,44m) larghezza x 8ft 6in (2,6m) altezza.

L'unità di trasporto intermodale utilizzata tipicamente nel trasporto combinato strada-rotaia è invece la *cassa mobile* (Dalla Chiara, 2015). Essa è adatta alla movimentazione verticale ed è sovrapponibile solo in alcune versioni e purché sia scarica. Una cassa mobile strada-rotaia è definita come una carrozzeria intercambiabile di un veicolo stradale, movimentabile dal basso con l'ausilio di pinze. Una cassa mobile può presentare differenti configurazioni (telonate, box, cisterna, ecc.) aventi lunghezze che nel tempo sono state adattate in modo da renderle compatibili con quelle di autocarri, rimorchi e semirimorchi (seguendo le modifiche del Codice della strada) e larghezze stradali di 2500 mm (vecchia misura), 2550 mm (nuova misura) e 2600 mm (isotermici). L'altezza, oltre a rispettare quella massima ammessa su strada deve adattarsi al *gabarit*²⁵ delle linee ferroviarie sulle quali la cassa mobile deve transitare, stanti le altezze tipiche dei piani di carico dei carri ferroviari. Rispetto al semirimorchio, che incorpora il rodiggio²⁶, i vantaggi delle casse mobili sono (Dalla Chiara, 2015):

- si riduce la tara caricata sul treno in quanto manca il rodiggio e parte della massa del telaio del veicolo (l'altra parte essendo inclusa nella struttura della cassa mobile);

²⁵ Il *gabarit* prescrive il limite d'ingombro da rispettare per inserire un rotabile nel profilo dell'infrastruttura ferroviaria.

²⁶ Rodiggio: insieme di assali e sospensioni del veicolo.

- si può disporre di unità di diverse lunghezze meglio adattabili alle diverse tipologie di trasporto e tali da essere trasportabili nella tratta stradale iniziale e finale sia da autoarticolati che da autotreni;
- si possono costruire casse mobili con carrozzerie ed attrezzature diversissime ed adatte ai prodotti da trasportare, mentre i veicoli stradali e ferroviari utilizzati per il loro trasporto rimangono standard.

Sempre rispetto al semirimorchio, gli svantaggi delle casse mobili sono (Dalla Chiara, 2015):

- nella fase di trasporto stradale la tara della cassa mobile riduce il carico utile trasportabile (da 2 a 4 t per la versione telonata o box rispettivamente lunghe 7,15 o 13,60 m);
- il semirimorchio rinforzato per la presa con le “pinze” (penalizzato di una maggior tara di circa 0,5 t rispetto alla versione puramente stradale) è più reversibile alla strada, nel senso che può essere indifferentemente utilizzato nelle due modalità, mentre la cassa mobile per essere trasportata su strada richiede un veicolo di supporto.

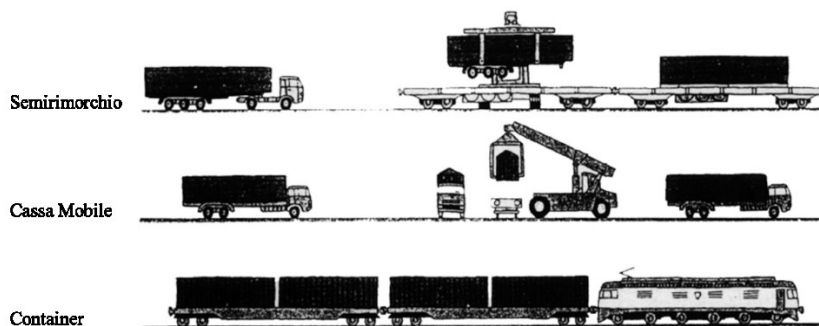


Figura 1.16 Principali unità di movimentazione nel trasporto intermodale (De Oña Lopez, 2017).

1.4.2 Inland terminal

Gli *inland terminal* vengono utilizzati per il trasferimento delle unità di trasporto intermodale (casse mobili, semirimorchi, container) fra i veicoli stradali e quelli ferroviari; sono dotati di aree adeguatamente dimensionate, strutturate per la sosta e per la movimentazione sia dei veicoli completi (autocarri, autoarticolati ed autotreni) che delle UTI

stesse. Il trasporto combinato strada-rotaia tra *inland terminal* può essere realizzato secondo due modalità principali:

- trasporto ferroviario “non accompagnato” delle unità di trasporto intermodale, chiamato anche *ferroustage* (Dalla Chiara, 2015);
- trasporto ferroviario “accompagnato”, modalità nella quale è possibile caricare sul treno anche il veicolo motore e l'autista.

I terminal intermodali sono destinati ad offrire il trasferimento modale ad ampi bacini di traffico merci, il che implica una congruente domanda di trasporto. Normalmente tali bacini corrispondono ad aree in cui sono presenti insediamenti per attività logistica o di produzione di rilievo.

1.4.2.1 Trasporto combinato non accompagnato

Il trasporto combinato non accompagnato rappresenta la maggior parte del trasporto merci combinato strada-ferrovia, perciò spesso con la denominazione “combinato” si fa riferimento solo a questa tipologia.

I servizi offerti da un terminal, nel rispondere alle esigenze della domanda, definiscono l'operatività ed il layout del terminal stesso (Dalla Chiara, 2015). I layout dei terminal per il trasporto combinato devono essere impostati con una flessibilità operativa basata sulla separazione delle funzioni - la movimentazione ed il deposito delle unità di trasporto intermodale - e sulla frequenza delle movimentazioni. Il trasporto combinato strada-ferrovia ha una ciclicità tipicamente giornaliera e non prevede, salvo situazioni particolari, il deposito delle UTI presso i terminal. Ne consegue che questi terminal operano su aree di ridotta estensione fondiaria.

Qualora il terminal sia adibito anche al trasferimento di container marittimi si tende ad ottimizzare l'uso degli impianti, con massimo sfruttamento delle altezze, fino all'impiego consentito dalle attrezzature di movimentazione e dalla portanza del terreno. In questo contesto, il trasbordo delle unità di carico intermodali ed in particolare dei container, è possibile oltre che da strada a ferrovia (e viceversa) anche fra due stessi treni, con movimentazioni principalmente verticali, senza ricorrere alle selle di lancio²⁷. I terminal

²⁷ Nelle selle di lancio viene effettuato lo smistamento dei singoli carri ferroviari dopo aver scomposto il convoglio in “tagli” (Dalla Chiara, 2015) costituiti da uno, due o tre carri ciascuno. Dopo aver sfrenato tutti i carri, i singoli tagli vengono lanciati o lasciati avanzare per gravità dalla sommità della sella, avente

che prevedono questa funzione sono chiamati *gateway*, e nell'ambito dei corridoi merci ferroviari assumono particolare importanza perché le merci qui scambiate possono non essere destinate ad una distribuzione nel bacino di traffico del terminal, ma tutte o parte delle UTI in arrivo su treni proseguono con altri treni defluenti dal terminal. Questi terminal rappresentano l'evoluzione delle selle di lancio da un punto di vista degli impianti e delle tecnologie utilizzate, mantenendone la funzione di smistamento.

In generale, la scelta delle modalità e delle attrezzature impiegate nella movimentazione delle UTI è influenzata da diversi fattori, fra cui:

- entità del traffico: capacità e distribuzione (arrivi e partenze);
- costi dei diversi sistemi, attrezzi e/o impianti;
- disponibilità o meno di un adeguato numero di binari (operativi e di sosta).

Inoltre, il terminal è anche influenzato, sia per il suo layout che per la sua operatività, dalle dotazioni ferroviarie esterne e dal sistema di immissione dei treni in linea. Nel loro complesso gli elementi essenziali di un terminal inland possono essere raggruppati come segue (Figura 1.17) (Dalla Chiara, 2015).

1. Binari:
 - a. binari operativi;
 - b. binari di sosta e manovra (equivalenti, a meno di uno o due binari da/per l'officina, a quelli di appoggio, esterni al terminal vero e proprio);
 - c. binari di presa e consegna (esterni al terminal vero e proprio).
2. Aree destinate al movimento dei veicoli stradali e delle apparecchiature di sollevamento:
 - a. corsia di carico/scarico;
 - b. corsia di scorrimento;
 - c. piazzale di manovra dei veicoli stradali.
3. Area di deposito e stoccaggio.
4. Magazzini tecnici per le funzioni dei terminal (mezzi per gli interventi, depositi ricambi, ecc.), officine, aree di lavaggio e depositi per riparazione ad uso esclusivo dei mezzi operativi del terminal e non per le UTI.
5. Area per *gate* e relative operazioni, uffici, servizi igienici.

una sopraelevazione tipica di pochi metri di altezza rispetto al resto dello scalo, verso i binari, al fine di comporre nuovi treni in base alla destinazione degli stessi.

Le principali funzioni che si svolgono nell'area di lavoro delle attrezzature, la più complessa del terminal sono (Dalla Chiara, 2015):

- treno in arrivo:
 - scarico da treno a terra o a veicolo;
 - trasferimento da terra a veicolo.
- treno in partenza:
 - trasferimento da veicolo a terra;
 - carico su treno da terra o da veicolo.

Per l'ottimizzazione dello svolgimento delle operazioni è necessario uno studio accurato della disposizione delle strutture costituenti il terminal. La disposizione dei binari deve tener conto delle altre infrastrutture presenti e dei mezzi di movimentazione richiesti per integrare tutti gli elementi del terminal e mantenere la massima efficienza funzionale.

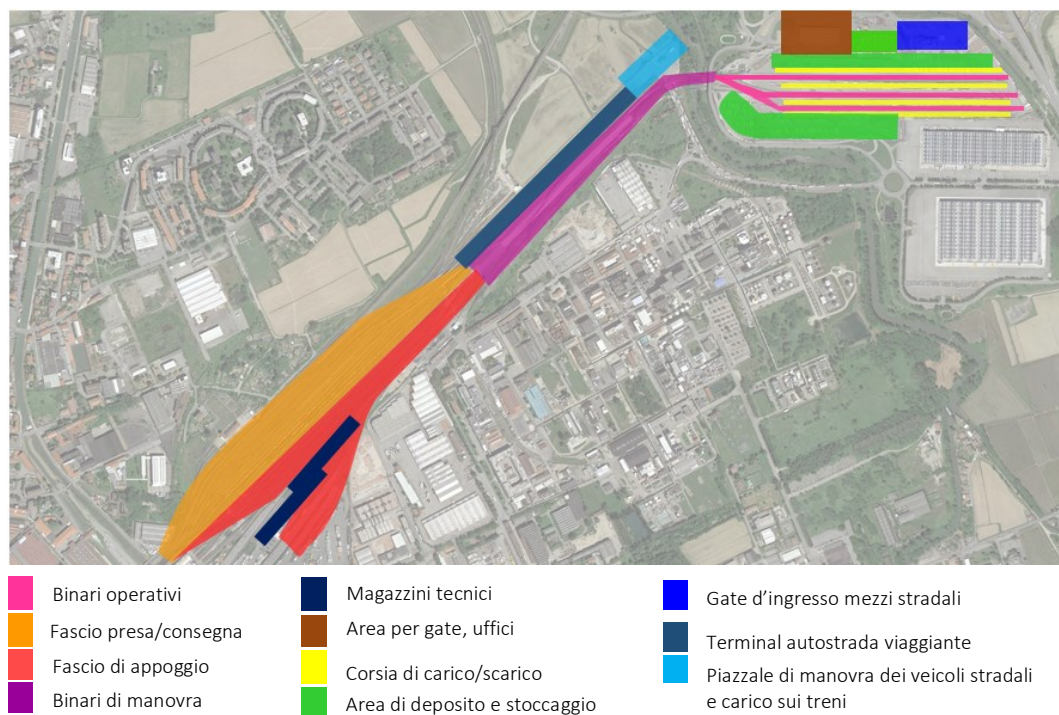


Figura 1.17 Elementi di un terminal intermodale, il caso dello scalo di Novara Boschetto.

1.4.2.2 Trasporto combinato accompagnato

Il trasporto combinato strada-rotaia accompagnato è una tipologia di trasporto che prevede il caricamento di veicoli stradali completi, con o senza conducente a bordo, su

vagoni ferroviari; questi sono talvolta a pianale ultrabasso o ultra-ribassato per rendere la sagoma del carro completo compatibile con quella ammessa dal gabarit ferroviario (sagoma limite relativa all'infrastruttura). Questa modalità di trasporto è una forma generalmente antieconomica ma utilizzata dal trasporto stradale nelle tratte ove sussistono limitazioni o proibizioni di traffico stradale pesante (transiti di valichi o nazioni con traffico contingentato), potendo beneficiare della trazione ferroviaria durante il riposo del conducente, obbligatorio secondo quanto previsto nel trasporto stradale in Europa.

I veicoli stradali vengono fatti salire sul treno e l'accoppiamento veicolo-carro ferroviario viene definito “autostrada viaggiante”, che costituisce una delle prime forme di trasporto combinato introdotte in Europa (Dalla Chiara, 2015). A destinazione i veicoli scendono autonomamente dal carro ferroviario e proseguono il loro tragitto. La salita del veicolo completo sul carro ferroviario può avvenire dalla coda del convoglio ferroviario (Figura 1.18 a) o mediante accesso laterale allo stesso (Figura 1.18 b). Entrambe le soluzioni possono essere attuate per mezzo di una rampa: nel caso di accesso alla coda del convoglio può semplicemente trattarsi di una rampa fissa, avente un tratto orizzontale adiacente e complanare al piano di carico dell'ultimo carro; nel caso di accesso laterale, si utilizzano rampe mobili. Normalmente gli autisti viaggiano in carrozze passeggeri o in carrozze cuccette in composizione allo stesso convoglio. In merito alla sagoma complessiva, occorre verificare la compatibilità della stessa con quella più vincolante ammessa sulla linea ferroviaria da utilizzare. I veicoli solitamente presentano un'altezza fino a 4 m e larghezza di 2.5 m, con carico lordo fino a 44 t.



Figura 1.18 Modalità di caricamento del veicolo nel trasporto combinato accompagnato. Fonti: (De Oña Lopez, 2017) e (Dalla Chiara, 2015).

1.4.3 Terminal portuale

Il terminal portuale è l'infrastruttura dove vengono svolte tutte le operazioni intermodali connesse al traffico svolto tra navi portacontainer ed il vettore terrestre e viceversa. Un terminal per container è generalmente suddiviso in subsistemi (Figura 1.19), ognuno dei quali svolge specifiche funzioni (Dalla Chiara, 2015) (De Oña Lopez, 2017):

- subsistema di carico/scarico (1) in Figura 1.19: mediante la banchina, costituisce l'interfaccia marittima del terminal; qui vengono svolte le operazioni di scarico/carico dei contenitori dalla/alla nave con impiego delle gru. Generalmente è richiesto di ridurre al minimo il tempo di permanenza di una nave in porto, dunque la massima efficienza nelle operazioni di questo subsistema;
- subsistema di interconnessione interna (2) e (4) in Figura 1.19: garantisce il trasporto orizzontale tra le banchine e l'area di stoccaggio e tra il sottosistema di inoltro/ricezione. Comprende soluzioni tecnologiche per i movimenti fisici e informativi richiesti;
- subsistema di deposito (3) in Figura 1.19: subsistema infrastrutturale dove viene svolto il deposito dei contenitori. Occupa la maggior parte dello spazio del terminal; la disposizione e l'estensione sono collegati al resto dei sottosistemi e alla scelta dei mezzi di manipolazione della merce;
- subsistema di inoltro/ricezione (5) in Figura 1.19: integrano i sistemi di accesso su strada e/o ferrovia e le centrali operative atte al trattamento delle informazioni e alla gestione del terminal; di fatto questo subsistema costituisce l'interfaccia con il sistema di trasporto terrestre. All'interno di questo sottosistema possiamo dunque distinguere:
 - subterminal ferroviario: subsistema infrastrutturale per l'inoltro/ricezione di UTI dall'hinterland su rotaia. È costituito da una zona di deposito attivo per la movimentazione verticale dei contenitori che devono essere caricati/scaricati su/da carro ferroviario ed aree adiacenti di deposito, normalmente parallele al fascio dei binari ("operativi" e di "manovra"). Il terminal può talora essere esterno al terminal e non rientrare nei servizi o nelle *facility* offerte dalle società portuali;
 - ingresso (*gate*): subsistema per la connessione della rete stradale al terminal; è costituito da un varco controllato, con relativo fabbricato, per l'accettazione dei veicoli provenienti dall'entroterra o ad esso diretti. In esso

vengono svolte operazioni di dogana, ispezioni, consegna, attesa, scambio di documenti, servizi per il passaggio tra traffico terrestre e traffico marittimo;

- collegamenti viari e ferroviari: è il subsistema che deve integrare efficientemente quelli precedenti, garantendo movimentazioni veloci e sicure.

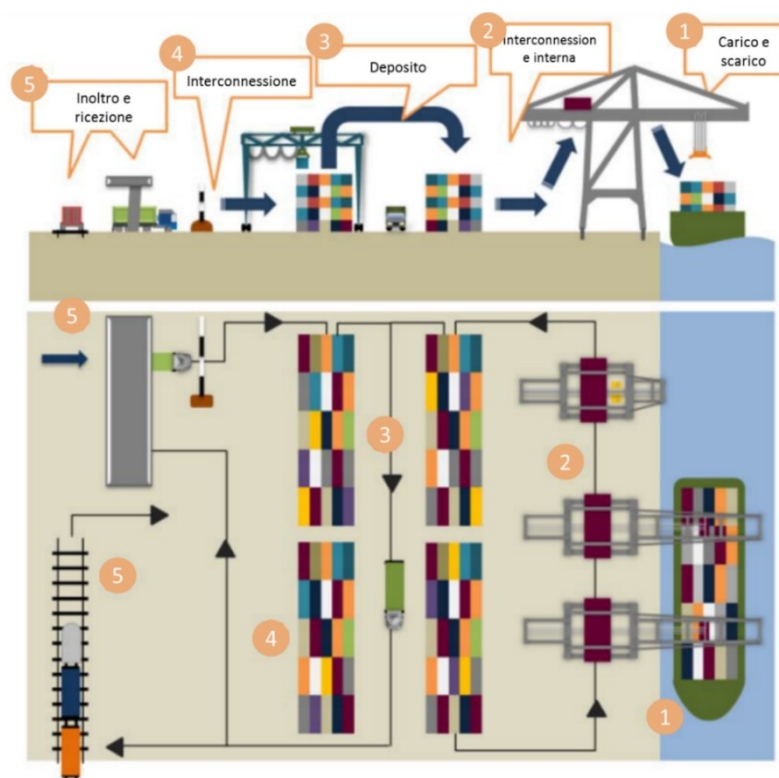


Figura 1.19 Subsistemi di un terminal portuale (De Oña Lopez, 2017).

1.5 Politiche ambientali e trasporti

Nel corso dell'ultimo secolo l'incessante evoluzione del settore dei trasporti ha determinato una riduzione delle distanze a livello mondiale - in termini di accessibilità e tempi di percorrenza - inducendo di conseguenza un maggior numero di spostamenti, sia per la mobilità civile che per il settore merci. Siamo di fronte ad un fenomeno che si autoalimenta lungi dall'estinguersi nel breve periodo, vista la stretta relazione fra economia e trasporti sommariamente descritta alla sezione 1.1. La dipendenza dai trasporti sembra però causare danni a lungo termine al clima e all'ambiente, ed il consumo crescente di combustili fossili comporta il rapido avvicinamento all'esaurimento delle risorse mondiali (Chapman, 2007). In questo senso le politiche europee e mondiali dell'ultimo

decennio hanno fatto maggiore leva su tematiche sostenibili, ambientali ed energetiche; fissando alla base delle loro strategie obiettivi a difesa dei cambiamenti climatici.

Si vedranno dapprima alcuni concetti basici relativi al “riscaldamento globale” dopodiché si riporterà l’incidenza dei trasporti, con particolare riguardo al settore merci e le principali politiche ambientali adottate.

1.5.1 Cambiamenti climatici

È comunemente noto, confermato dalla paleoclimatologia²⁸, che l’andamento storico del clima terrestre è caratterizzato da cicli con cadenza più o meno regolare. Tuttavia, durante l'ultimo secolo, l'attività dell'uomo ha causato cambiamenti climatici significativi in un periodo di tempo relativamente breve. Il termine "riscaldamento globale" si riferisce all'aumento della temperatura media della Terra. Ciò è causato dall'accumulo di gas serra nell'atmosfera accumulati dalla continua combustione di carburanti fossili e dai cambiamenti di uso del suolo nel corso del ventesimo secolo (Chapman, 2007). L’impatto antropogenico²⁹ sui cambiamenti climatici è aumentato con il tempo, data la velocità e l'entità del riscaldamento dovuto ai gas serra, direttamente paragonabile agli aumenti della temperatura osservati. Qualsiasi cambiamento nella composizione chimica dell'atmosfera richiede infatti un nuovo equilibrio da mantenere; un equilibrio raggiunto con il cambiamento climatico globale. Questo cambiamento consiste in un divario tra la radiazione solare in entrata e quella infrarossa in uscita, la cui entità dipende dall’interazione dell'atmosfera con le masse terrestri, gli oceani ed i ghiacciai. Le proiezioni future che normalmente si fanno, sono quindi date dalla previsione della risposta dell’atmosfera e quindi del clima alle diverse perturbazioni. Secondo l’IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) nel prossimo secolo è previsto un aumento dei livelli di CO₂ da 369 parti per milione, a 540 e 970 parti per milione (Chapman, 2007). Questo si traduce in un aumento delle temperature medie globali comprese tra 1,4 e 5,8°C, che a loro volta portano ad un aumento degli eventi meteorologici estremi e ad un innalzamento del livello del mare. Queste previsioni sono cautelative, considerato che i sistemi in gioco sono molto complicati e dinamici e non è chiaro fino a che punto i cambiamenti tecnologici e comportamentali aiutino la situazione (Chapman, 2007). Tuttavia, la crescita delle

²⁸ Paleoclimatologia: scienza che studia la storia del clima.

²⁹ Per antropogenico si definisce ogni effetto, processo, oggetto o materiale derivato dalle attività umane in opposizione a quelli che accadono in ambiente naturale senza influenza umana (Wikipedia).

emissioni di CO₂ continua ed è insostenibile. Inoltre, il cambiamento climatico oggi in atto è il risultato di emissioni degli ultimi 100 anni (Penner, Lister, Griggs, Dokken, & McFarland, 1999), questa inerzia significa che alcuni degli impatti dell'uomo sui cambiamenti climatici potrebbero non essere ancora individuati e che il riscaldamento globale continuerà anche in vista di una ipotetica stabilizzazione.

1.5.2 Il ruolo dei trasporti

Il petrolio è la principale fonte di carburante per i trasporti (Figura 1.20 a), con il trasporto su strada che rappresenta circa l'81% del consumo totale di energia da parte del settore dei trasporti nei paesi dell'OCSE³⁰ (Figura 1.20 a).

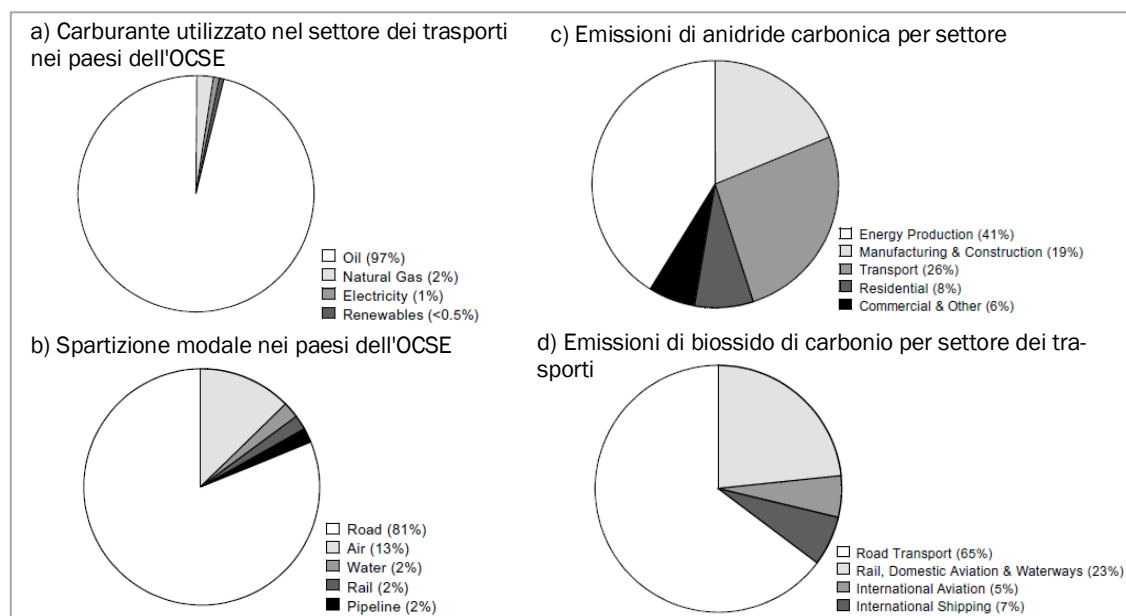


Figura 1.20 (a) Carburante utilizzato nel settore dei trasporti nei paesi dell'OCSE; (b) Spartizione modale energetica nei paesi dell'OCSE; (c) Emissioni di anidride carbonica per settore; (d) Emissioni di biossido di carbonio per settore dei trasporti. (Chapman, 2007) basato su dati IEA³¹ del 2000 e 2002.

Questa dipendenza dai combustibili fossili rende il settore dei trasporti una delle principali cause dei gas serra presenti nell'atmosfera. L'impatto dei trasporti sul clima globale

³⁰ Organisation for Economic Cooperation and Development

³¹ International Energy Agency

non si limita alle emissioni dei veicoli, ma secondo un approccio *wells to wheels*³² la produzione e la distribuzione del carburante da petrolio comporta ulteriore produzione di gas serra. Ad esempio, l'esame delle emissioni totali di CO₂ di un'automobile media (Chapman, 2007) ha mostrato che il 76% derivava dall'uso di carburante, mentre il 9% proveniva dalla produzione del veicolo e un ulteriore 15% da emissioni e perdite nel sistema di alimentazione del combustibile. La Figura 1.20 (c) mostra che il settore dei trasporti rappresenta circa il 26% delle emissioni globali di CO₂. Sebbene il trasporto stradale sia il principale produttore di gas serra nel settore dei trasporti (Figura 1.20), l'automobile non è la sola responsabile di tutte queste emissioni: i veicoli pesanti ed in primis quelli adibiti al trasporto merci, svolgono un ruolo significativo. Lontano dal trasporto su strada, un'ulteriore modalità di trasporto che contribuisce al cambiamento climatico in maniera rilevante è il trasporto aereo. L'aviazione è dannosa per l'ambiente al di là delle emissioni di CO₂ anche perché i gas serra vengono rilasciati direttamente nell'*atmosfera superiore*.

Focalizzandoci sul trasporto merci, il consumo globale di energia di questo settore rappresenta circa il 40% del consumo totale nel settore dei trasporti e una quota analoga delle emissioni di gas serra, (Muratori, Smith, Kyle, Link, & Mignone, 2017) basato su dati IEA del 2009. La Tabella 1.1 mostra indicativamente che anche in questo caso prevale il consumo di energia del trasporto su strada rispetto alle altre modalità.

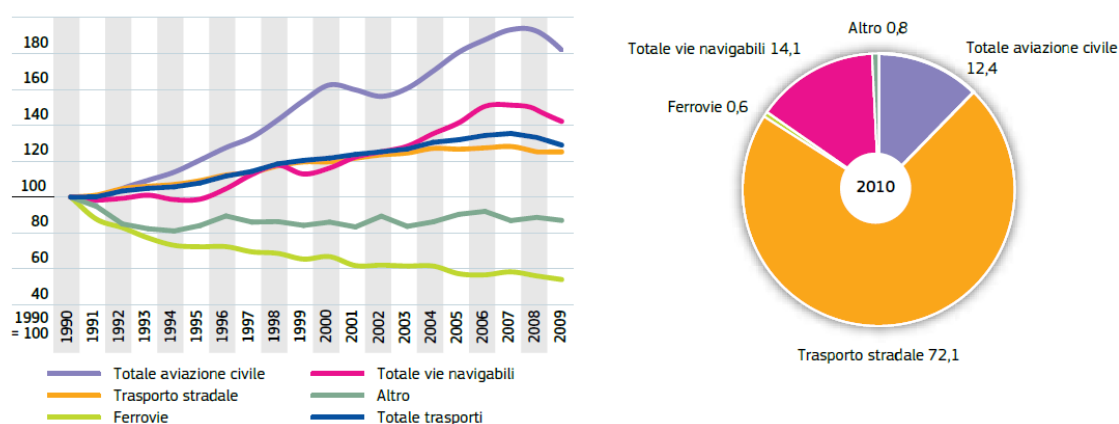
Tabella 1.1 Ripartizione modale del consumo di energia per il trasporto merci nei paesi OCSE con i tassi di crescita annuali previsti tra parentesi, (Chapman, 2007) basato su dati IEA del 2002.

	Nord America	Europa OECD	Pacifico OECD
Strada	24 (+2.0)	30 (+2.2)	25 (+1.9)
Ferrovia	7 (+1.6)	3 (+0.1)	3 (+1.8)
Shipping	2 (0.7)	1 (+0.1)	5 (+0.2)

Le tendenze all'interno dell'Unione Europea sono equiparabili agli andamenti globali, anche qui i trasporti dipendono principalmente dai combustibili fossili e le emissioni di gas serra di tutto il settore sono pari a circa il 20% delle emissioni totali dell'UE

³² *Wells to wheels*: analisi che confronta la storia intera del vettore energetico, dalla materia prima alla ruota ("dal pozzo alla ruota"). Il ciclo WTW si compone delle seguenti fasi: (1) produzione del materiale di base; (2) trasporto del materiale di base; (3) processamento del vettore energetico; (4) distribuzione del vettore; (5) uso del veicolo.

(Commissione Europea, 2014). I carburanti derivati dal petrolio rappresentano infatti il 96% circa delle forniture totali di energia del settore, con il trasporto su gomma al primo posto della classifica (Commissione Europea, 2014). Il traffico stradale, in quanto principale forma di trasporto, è la principale fonte di inquinamento: produce circa il 72 % delle emissioni complessive di CO₂ (Figura 1.21). Altri modi di trasporto inquinano invece molto meno. Quello marittimo e aereo rappresentano rispettivamente il 14% ed il 13%, mentre la navigazione interna si attesta sul 2 %. Con meno dell'1%, le ferrovie sono quelle che inquinano di meno in assoluto.



Fonte: Commissione europea

Figura 1.21 Emissioni di gas serra nell'UE prodotte dai trasporti (Commissione Europea, 2014)

Un sistema di trasporto di questo genere, privo di alcuna regolazione di natura energetica ed ambientale, non è sostenibile. Questo è quanto emerge dal Libro bianco dei Trasporti del 2011 (Commissione Europea, 2011) che recita ancora:

“Se ci proiettiamo in avanti di 40 anni è chiaro che il settore dei trasporti non può continuare a svilupparsi nel solco attuale. A scenario immutato la dipendenza dei trasporti dal petrolio risulterebbe ancora di poco inferiore al 90% mentre l'energia ricavata da fonti rinnovabili si attesterebbe di poco al di sopra dell'obiettivo del 10% fissato per il 2020. Nel 2050 le emissioni di CO₂ provocate dal settore dei trasporti rimarrebbero di un terzo superiori ai livelli del 1990...”

Quindi per ridurre le emissioni globali di gas serra e contenere così i cambiamenti climatici entro limiti di sicurezza - aumento della temperatura non superiore a 2 °C - la Commissione Europea stabilisce nel 2014 l'obiettivo 40/27/27 per il quale i leader dell'UE hanno concordato il perseguimento di una riduzione dei gas serra di almeno il 40% entro il 2030 rispetto al 1990 e di almeno il 27% per le energie rinnovabili e per il risparmio

energetico entro il 2030, da perseguire a livello di singole nazioni (Commissione Europea, 2014). Ridurre le emissioni prodotte dai trasporti è un elemento chiave della politica dell'UE, obiettivo, questo, da conseguire usando *meglio* modi alternativi di trasporto più puliti — e spesso meno costosi — quali le ferrovie e le vie navigabili. Anche la ricerca, lo sviluppo e la diffusione di **strategie intelligenti per usare meglio l'infrastruttura esistente** aiuteranno a rendere i trasporti più puliti, sicuri ed efficienti.

1.6 Conclusioni

Con questo capitolo si è introdotto il tema dei trasporti merci da una prospettiva olistica, senza focalizzarsi esclusivamente sugli aspetti della Tecnica dei Trasporti. Si ha infatti una relazione mutua fra trasporto merci, economia ed ambiente, dalla quale è difficile prescindere. Il trasporto ha per definizione un grande impatto sull'economia, essendo alla base delle attuali strategie di produzione e distribuzione di beni, un impatto che è andato crescendo con la globalizzazione dei mercati. Al giorno d'oggi il trasporto merci incide per circa un quarto dell'economia globale. L'economia determina quindi *modulo, direzione e verso* dei flussi commerciali. Dalle statistiche sui consumi energetici e sulle emissioni di gas serra emerge che i trasporti non sono in generale sostenibili da un punto di vista ambientale ed energetico. In particolare, a livello regionale il trasporto merci - commercio interno - fa ancora largo uso del trasporto stradale, il peggiore dal punto di vista dei consumi e degli impatti ambientali. Allora, la politica, oltre ad incentivare la crescita economica si fa paladina dei problemi climatici-ambientali imponendo dei vincoli sulle emissioni di gas serra e proponendo allo stesso tempo delle soluzioni. Una fra queste è il trasferimento modale da strada a ferrovia; un trasferimento che può avvenire parzialmente con l'*intermodalità* del trasporto ai diversi livelli della supply chain. Ulteriori soluzioni sono da ricercarsi nello sviluppo tecnologico e nella ottimizzazione dell'uso dell'infrastruttura esistente.

Le soluzioni citate - trasporto ferroviario, intermodalità, ottimizzazione e ricerca - sono elementi intrinseci della tesi: il nodo merci di Novara è infatti un nodo intermodale ferrovia-strada e l'analisi di capacità effettuata sulla parte ferroviaria del nodo, con metodi e strumenti innovativi - tuttora oggetto di ricerca - si propone di offrire una soluzione ottimizzata dell'uso di capacità dell'infrastruttura.

2 Il nodo merci di Novara

Con questo capitolo ci si inoltra allo studio del nodo merci di Novara, entrando nel vivo della tesi. Ai fini di una trattazione efficace ed esaustiva dell'argomento si fornisce dapprima un inquadramento territoriale del nodo con riferimento alla logistica internazionale-europea e locale. Da qui emerge la caratteristica che contraddistingue Novara come nodo merci di alto livello: la *posizione* privilegiata rispetto alle principali catene di approvvigionamento. Proseguendo nel capitolo, viene valutata l'offerta e la capacità attuale del nodo - in termini di treni merci/giorno - in relazione alle linee afferenti al terminal merci di Novara Boschetto, fulcro di tutta l'area logistica.

Dallo studio O/D del traffico merci ferroviario del nodo risulta che il principale canale di scambio è quello delle linee di valico italo-svizzere - via Borgomanero, Arona o Luino - fonte di fiorenti relazioni commerciali con il centro/nord Europa. La tendenza crescente del traffico merci su rotaia lungo questi assi - riscontrabile dallo studio di domanda - impone ai gestori dell'infrastruttura ferroviaria di ripensare il ruolo delle linee di adduzione per allinearle alle potenzialità di traffico prospettate. Nascono così i modelli di esercizio futuri che definiscono gli obiettivi di capacità - volumi, regolarità ed efficienza - da perseguire con opportuni provvedimenti ed interventi infrastrutturali. Nel piano di azione concordato dai tavoli internazionali, spiccano in questo senso diversi interventi infrastrutturali volti a migliorare ed uniformare l'utilizzo dell'infrastruttura ferroviaria, quindi a garantire le capacità necessarie per ottimizzare il traffico merci. Fra questi spicca il progetto del "Nodo di Novara 1a Fase" che oltre a prevedere un adeguamento agli standard europei per il modulo delle linee a 750 m, delle sagome P/C 80 - sagoma di spazio libero di quattro metri³³ - e del carico da 22,5 t per asse; comporta importanti interventi infrastrutturali che interessano il terminal merci di Novara Boschetto e l'impianto di Vignale. Il progetto, del quale si parlerà approfonditamente nell'ultima parte del capitolo, rappresenta il caso di studio della tesi e dunque delle analisi al Capitolo 4 circa la risposta del

³³ Per sagoma di spazio libero di 4 m si intende la sagoma "di ostacolo" UIC GC (*infrastructure clearance gauge*, in inglese) che garantisce la circolazione del materiale rotabile - senza l'incontro di installazioni fisse - con sagoma limite P400 o P/C80. Tale sagoma permettere il trasporto di semirimorchi standard da 4 metri sulla rete ferroviaria. Tradizionalmente, le imprese di autotrasporto che volevano utilizzare i servizi intermodali ferroviari hanno dovuto adattarsi alle sagome della ferrovia; questo ha significato l'utilizzo di semirimorchi che misurano meno di 4 metri. Da recenti studi di mercato della Commissione Europea (European Commission, 2016) risulta che tutto questo ha reso i servizi intermodali ferroviari meno attraenti per le imprese di autotrasporto, dunque per incoraggiare il trasporto combinato ed in particolare l'utilizzo della ferrovia l'UE sostiene l'upgrade della sagoma.

sistema alle diverse configurazioni di progetto, in termini di capacità e utilizzazione dell'infrastruttura. Analisi svolte seguendo un metodo di simulazione-saturazione dell'orario ferroviario introdotto al Capitolo 3.

2.1 Inquadramento territoriale

Novara ed il suo interporto si collocano al centro del quadrante nord-ovest della pianura padana, all'intersezione degli assi prioritari ferroviari TEN-T Lisbona-Kiev e Genova-Rotterdam (Figura 2.1 a). Come visto al capitolo precedente, il Regolamento UE 913/2010 relativo alla “Rete ferroviaria europea per un trasporto merci competitivo” individua, dal punto di vista gestionale e operativo, la rete principale dei corridoi internazionali a vocazione merci. All'interno di questa rete, Novara si configura quale nodo trasportistico di primo livello, terminal *Core* per il trasporto combinato strada-rotaia, grazie anche alla presenza del CIM - Centro Interportuale Merci - principale radice di tutto il terminal. Per l'Italia, il nodo di Novara rappresenta l'unico punto di intersezione tra i *Rail Freight Corridors* - in italiano *corridoi merci ferroviari* - n.1 Reno-Alpi e n.6 Mediterraneo (Figura 2.1 b). Inoltre, il sistema territoriale dell'area novarese si configura quale distretto logistico e di primo trattamento delle merci a servizio di un ambito geografico che comprende il retroporto di Genova nell'alessandrino sino alla regione milanese (Fiera di Rho/Pero e Malpensa).

2.1.1 Novara nella logistica dei Corridoi Europei

Come già menzionato al Capitolo 1, l'Italia è interessata da quattro dei nove corridoi merci europei: il Corridoio Reno-Alpi, il Corridoio Mediterraneo, il Corridoio Baltico-Adriatico, il Corridoio Scandinavo-Mediterraneo. In questo contesto il nodo merci di Novara risulta ubicato in una posizione strategica al crocevia fra il corridoio Reno-Alpi e quello Mediterraneo. Tale connotazione fa di Novara la cerniera dei flussi che interessano i due corridoi, caratterizzandosi come un vero e proprio *nodo*.

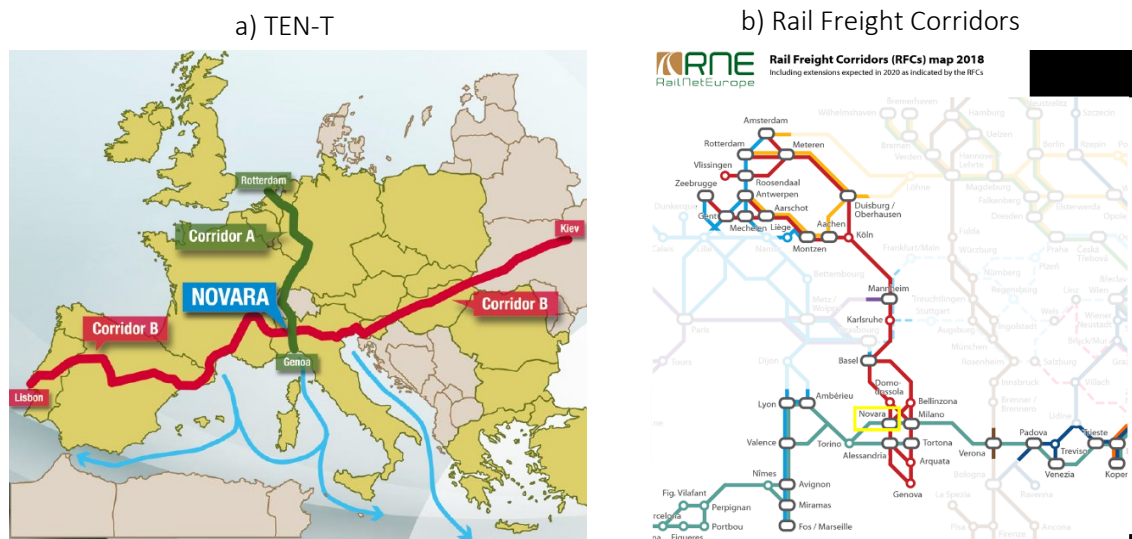


Figura 2.1 Novara nella logistica dei Corridoi Europei: a) TEN-T, b) Rail Freight Corridors - corridoi merci ferroviari (Rail Net Europe, 2018).

Da una prima analisi del traffico ferroviario merci che attraversa il nodo (Tabella 2.1) si evince però che gli scambi lungo il corridoio Reno-Alpi, in particolare con la linea del Sempione via Domodossola, prevalgono nettamente su quelli con la Francia via Modane e con il nord-est italiano (Veneto, Emilia-Romagna, ecc.), appartenenti al corridoio Mediterraneo.

Tabella 2.1 Treni merci da/per Novara Boschetto (RFI, 2018).

Verso Novara	N° treni settimana	Da Novara	N° treni settimana
Domodossola	146	Domodossola	136
Modane	17	Modane	18
Genova	6	Trieste	8
Cuneo	6	Trecate	6
Candiolo (To)	4	Cuneo	5
Pescara	4	Pescara	5
Trecate	4	Candiolo (To)	3
Romagnano Sesia	3	Romagnano Sesia	3
Torino Orbassano	3	Genova	3
Trieste	3	Torino Orbassano	3
Brennero	1	Luino	2
Ferrara	1	Brennero	1
Luino	1	Bologna	1

Mantova	1	Udine	1
Monfalcone	1	Gallarate	1
Villadossola	1	Ferrara	1
Vittuone Arluno	1	Mantova	1
Terni	1	Terni	1

Il corridoio ferroviario Reno-Alpi adibito al trasporto merci rappresenta uno dei progetti di più ampia valenza nel contesto delle iniziative dell'Unione Europea. Il Corridoio si estende dai porti marittimi di Rotterdam, Zeebrugge, Anversa, Amsterdam e Vlissingen al porto di Genova, nel cuore dell'Unione Europea. Questa è la rotta nord-sud più industrializzata dell'Europa centrale e collega le principali regioni economiche europee come Rotterdam, Amsterdam, Anversa, Gand, Liegi, Duisburg, Colonia, Francoforte, Mannheim, Basilea, Zurigo, Milano e Genova. Tutti questi centri sono serviti e collegati dal corridoio. I paesi direttamente coinvolti sono dunque Olanda, Belgio, Germania, Svizzera e Italia. Questa posizione strategica unitamente ai grandi volumi trasportati rende il corridoio il pioniere del trasporto internazionale di merci su rotaia in Europa. Dal punto di vista infrastrutturale sul versante ferroviario è caratterizzato da grandi lavori per superare la barriera delle Alpi e per omogeneizzare la rete ferroviaria a parametri standard, come raccomandato dall'Unione europea. Lato sud il corridoio arriva fino a Genova, attualmente anello debole della catena, come si può dedurre dalla bassa quota di traffico in Tabella 2.1, passante per Novara da/per Genova.

Il motivo di questa propensione dei traffici verso il nord Europa è da ricercarsi negli argomenti trattati al Capitolo 1 relativi al commercio internazionale, al fenomeno della globalizzazione dei mercati e del gigantismo navale. Con la globalizzazione e le nuove strategie di mercato - di produzione e distribuzione dei beni - il commercio internazionale si dimostra fondamentale per l'economia; impiegando come principale mezzo di trasporto le navi portacontainer, il più conveniente dal punto di vista costi-quantità. Fra le rotte marittime intercontinentali che interessano l'Europa (Figura 1.10) quelle con il Far East - sud est asiatico - sono decisamente le più importanti. In questo contesto, Novara risulta *hinterland* sia dei porti del centro nord Europa sia di quelli italiani liguri (Figura 1.11). La corsa al gigantismo navale porta però ad una razionalizzazione delle fermate delle nuove (gigantesche) navi nei soli porti di maggiori dimensioni e dotati di una logistica

efficiente³⁴. Porti come quelli del nord Europa - Rotterdam, Amburgo, Anversa, Brugge, ecc. - diventano *hub* principali, a scapito dei porti di minori dimensioni come quelli italiani. Pertanto, al momento viene meno la funzione di Novara come *hinterland* dei porti liguri, non essendo dotati di un'infrastruttura adeguata ad accogliere navi di grandi dimensioni - profondità del fondale e lunghezza delle banchine - ed essendo caratterizzati da una logistica di terminal piuttosto obsoleta non sempre adatta al traffico containerizzato. Per tale ragione prevalgono i rapporti con il centro-nord Europa ed in particolare con i porti di Rotterdam, Brugge ed ecc. - diventano *hub* principali, a scapito dei porti di minori dimensioni come quelli italiani. Pertanto, al momento viene meno la funzione di Novara come *hinterland* dei porti liguri, non essendo dotati di un'infrastruttura adeguata ad accogliere navi di grandi dimensioni - profondità del fondale e lunghezza delle banchine - ed essendo caratterizzati da una logistica di terminal piuttosto obsoleta non sempre adatta al traffico containerizzato. Per tale ragione prevalgono i rapporti con il centro-nord Europa ed in particolare con i porti di Rotterdam, Brugge ed Anversa (Tabella 2.3) attuando un modello di rete *hub and spoke* in cui tali porti, che rappresentano i *hub*, sono connessi all'*hinterland* di Novara con efficaci collegamenti ferroviari (corridoi merci ferroviari RFC).

Questa direzionalità dei traffici potrebbe rappresentare una condizione transitoria poiché con il Terzo Vallico³⁵ e gli interventi ai porti liguri si prospettano nuovi scenari per il Mediterraneo che potrebbero far voltare lo sguardo a sud del corridoio Reno-Alpi. In particolare, la realizzazione del nuovo terminal container semiautomatizzato di Vado Ligure (il primo in Italia), su modello di quelli di Rotterdam e Brugge³⁶, garantirebbe i requisiti infrastrutturali e di efficienza logistica necessari ad accogliere le più recenti navi portacontainer. Allora il cambiamento si fa concreto, e parte dei traffici che ad oggi

³⁴ Capitolo 1. L'incremento sproporzionato delle dimensioni delle navi - pescaggio, lunghezza e larghezza - richiede nuove e più esigenti caratteristiche infrastrutturali come la profondità del fondale e la lunghezza delle banchine. Questo aumento delle dimensioni determina inoltre un aumento dei costi operativi delle navi, spingendo le compagnie marittime a ridurre il tempo totale di viaggio (ITMMA, 2009).

³⁵ Il Terzo Valico è una linea ferroviaria in costruzione, finalizzata a creare un collegamento veloce fra Genova e Novi Ligure. Il tracciato si svilupperà per 53 km, 37 dei quali in galleria. La tratta sarà integrata con la linea già esistente, assicurando a sud il collegamento diretto con i bacini portuali e con la linea Savona-Ventimiglia; a nord sarà collegata con la direttrice per Torino in prossimità di Novi Ligure e, in direzione di Milano, alla linea Alessandria-Piacenza, in prossimità di Tortona. Grazie all'eliminazione della "rampa" appenninica per raggiungere la pianura padana, è auspicabile che consenta la realizzazione di treni "pesanti" anche oltre le 2000 tonnellate.

³⁶ Terminal portuali realizzati e gestiti dalla stessa società olandese APM Terminals.

arrivano dai porti del nord Europa in un futuro prossimo potranno sbarcare nel porto di Vado Ligure. In questo scenario, i centri interportuali di Novara e Torino - essendo i principali dell'*hinterland* del porto ligure - acquisiranno notevole importanza per lo smistamento e la distribuzione delle merci sia sul mercato locale che quello europeo. Non è realistico pensare che la grande capacità delle navi accolte dal terminal - al completamento dell'infrastruttura, previsto nel 2020, l'accosto sarà di 700 metri con pescaggi da oltre 17 metri per una capacità complessiva annua di 860mila TEU (Sito Web TrasportoEuropa, 2018) - sarà assorbita, in termini di consumi, dalla sola pianura padana. Dunque, è logico prevedere che una quota parte sarà destinata ai mercati interni europei in particolare a quelli connessi ai corridoi merci ferroviari del Mediterraneo e Reno-Alpi. In questo contesto trova la sua "ragion d'essere" l'incentivo di potenziamenti delle prestazioni infrastrutturali e degli impianti della parte italiana di questi corridoi ferroviari. Proiettato al caso di Novara questo si traduce in un potenziamento della funzione di gateway dello scalo merci di Novara Boschetto - attualmente lo scalo dispone di impianti poco attrezzati per svolgere questo tipo di attività - e dei suoi collegamenti verso sud e con il corridoio del Mediterraneo, non solo con gli assi a nord verso i valichi svizzeri.

2.1.2 Novara nei principali canali di traffico locali

Sul piano locale, Novara rappresenta uno *snodo nevralgico* del nord-ovest italiano, situata all'estremo est della Regione Piemonte, vicino al confine con la Lombardia. È in questo nodo che confluiscono, da ogni direzione, importanti canali di traffico attraverso linee fondamentali e secondarie della rete ferroviaria italiana:

- la linea Torino-Milano per i collegamenti est/ovest;
- la linea Vignale-Novara per i traffici da Varallo, Domodossola, Arona;
- la linea Novara-Mortara per quelli verso Genova e Bologna;
- la linea di Biella a carattere regionale;
- la linea indipendente FNM (Ferrovie Nord Milano) per i traffici da Saronno e dal bacino nord della Lombardia.

La posizione strategica e le funzioni di canalizzatore che assolve per gli importanti traffici nazionali e internazionali, fanno di Novara un punto centrale del sistema ferroviario del nord-ovest italiano, rappresentando l'intersezione tra l'asse ferroviario trasversale Torino-Milano e quello verticale che collega la Svizzera al Mediterraneo (Figura 2.2).

Così composto, lo scalo merci di Novara costituisce di fatto un nodo complesso ed integrato sia per quanto concerne le tipologie del traffico, trasporto combinato strada-ferrovia accompagnato (TCA) e non accompagnato (TCnA); sia per le tipologie infrastrutturali che si interfacciano con il traffico merci: binari di raccordo, terminal intermodali, fasci di presa/consegna, ecc.

Le linee merci del Corridoio Reno-Alpino in Italia

The map shows the Reno-Alpino corridor in Italy, highlighting the railway line from GOTTARDO to GENOVA, passing through NOVARA and MILANO. The corridor area is highlighted in yellow. Major cities and roads are labeled, including GOTTARDO, LBT, LOETSCHERS, SEPPIONE, DOMODOSSOLA, CBT, ORASSO, VALIGNE, NOVARA, MILANO, PESA, VIGEVANO, BIELLA, BIELLA-VERCELLI, TURCHINO, GENOVA, and LA SPEZIA. The map also shows the coastline and the Ligurian Sea.

39



Figura 2.4 Inquadramento territoriale di Novara in direzione nord delle principali direttrici di traffico merci che passando da Vignale vanno verso i valichi svizzeri.

2.2 Offerta attuale

Come già accennato, lo scalo di Novara Boschetto è caratterizzato prevalentemente da un traffico combinato strada-ferrovia, accompagnato e non. L'autostrada viaggiante gestita nel terminal appositamente dedicato attualmente comprende treni della società RAlpin SA³⁷ che circolano soltanto tra Friburgo in Brisgovia e Novara via Borgomanero. L'attivazione nel 2001 del servizio ha comportato l'elettrificazione e l'adeguamento complessivo della linea a semplice binario Domodossola-Borgomanero-Vignale. Il traffico combinato non accompagnato è invece molto vario dal punto di vista delle origini/destinazioni, mantenendo però il passaggio via Domodossola come canale di afferenza preferenziale, Tabella 2.1.

Procedendo ad uno studio quantitativo del traffico merci del nodo, è stata eseguita un'indagine dell'offerta attuale di Novara Boschetto basandosi sull'M53³⁸ del mese di Ottobre

³⁷ Società per azioni; azionisti della RAlpin sono BLS AG, Hupac SA, SBB Cargo AG e Trenitalia SpA.

³⁸ M53: documento ufficiale di RFI, rilasciato per ciascuna località della rete (sia essa una stazione o una semplice località di servizio) comprendente un prospetto dei binari di arrivo e di partenza dei treni, la

2018 (RFI, 2018). Poiché il traffico ferroviario risulta piuttosto variabile nell'arco della settimana, si è identificato il giorno di picco - con il maggior numero di tracce programmate/giorno. Il grafico in Figura 2.5 (a) riporta le tracce/giorno in arrivo/partenza a/d da Novara Boschetto per ogni giorno della settimana, restituendo un'indicazione anche della tipologia di trasporto: TCA o TCnA. Emerge che il giorno di picco è il **venerdì** con 82 tracce/giorno. Sulla base di questo, lo studio dell'offerta è stato esteso alle linee che da Novara, passando per Vignale, si dirigono verso Domodossola e quindi verso i valichi svizzeri (Figura 2.4): Vignale-Caltignaga lato Borgomanero; Vignale-PM Cameri lato Arona. Questa volta si riportano i risultati in termini di coppie di treni/giorno, in Figura 2.5 (b), per avere un'unità di misura confrontabile con le analisi di capacità al Capitolo 4. Si osservano in questo caso i treni regionali sulle linee lato Borgomanero (9 coppie/giorno) e lato Oleggio (7 coppie/giorno), e si riscontra quanto detto all'inizio: i treni dell'autostrada viaggiante oggi circolano soltanto lato Borgomanero. Complessivamente il traffico attuale risulta distribuito fra le linee e gli impianti del nodo come da Tabella 2.2.

Tabella 2.2 Traffico attuale nel giorno di picco.

Coppie di treni/giorno	
Novara Boschetto	41
Vignale	47
Vignale - Borgomanero	29
Vignale - Oleggio	18

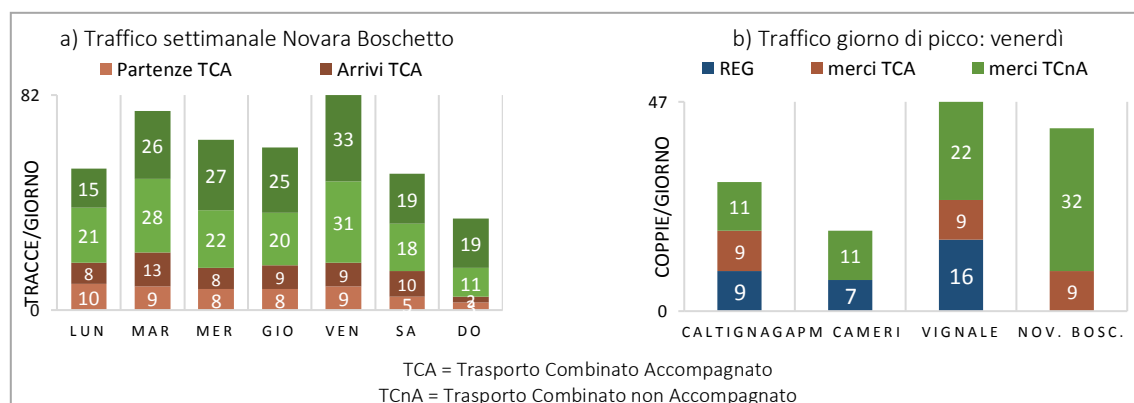


Figura 2.5 Offerta attuale Novara Boschetto (a) e linee afferenti da Vignale (b).

loro origine e destinazione nonché gli orari di arrivo e partenza programmati; elenca tutti i treni ordinari che dovranno circolare nell'ambito della validità dell'orario, indicandone la periodicità. Equivalente tabellare dell'orario grafico.

Da uno studio approssimato anche dell'offerta del terminal CIM, basato sul prospetto di occupazione dei binari del terminal (CIM, 2018), risultano le origini/destinazioni dei treni qui lavorati (caricati e scaricati).

Tabella 2.3 Treni merci da/per CIM (CIM, 2018).

CIM (treni/settimana)		
	Arrivi	Partenze
HUPAC Rotterdam	17	17
HUPAC Zeebrugge Port	12	12
HUPAC Koln	12	10
LWK Lubeck/Worms	10	8
HUPAC Zeebrugge	6	6
ALPE ADRIA Trieste	6	6
HUPAC X Hannover	4	4
HUPAC Ludwigshafen	4	4
HUPAC Travemunde Lubeck	3	2
Altro (Pescara, Modane, ecc.)	7	5
TOTALE	81	74

2.3 Studio di domanda

Da quanto visto finora si evince che lo scalo merci di Novara Boschetto è legato da forti relazioni commerciali con il centro-nord Europa. Dalla Tabella 2.1 si osserva che si hanno in totale circa 282 treni merci/settimana via Domodossola (arrivi + partenze). Se a questi si sottraggono i treni dell'autostrada viaggiante, circa 9 coppie/giorno, rimangono i treni in Da uno studio approssimato anche dell'offerta del terminal CIM, basato sul prospetto di occupazione dei binari del terminal , risultano le origini/destinazioni dei treni qui lavorati (caricati e scaricati).

Tabella 2.3 - adibiti al trasporto combinato non accompagnato - per un totale di circa 155 treni/settimana. Da quest'ultima tabella si confermano, inequivocabili, i rapporti commerciali prima citati e gli assi ferroviari lungo i quali viaggia, ad oggi, la stragrande maggioranza delle merci interessanti il nodo: spiccano Rotterdam, Zeebrugge, Colonia, Worms e Ludwigshafen, località situate sul corridoio RFC Reno-Alpi; Lubecca e

Hannover, situate sul corridoio Scandinavo-Mediterraneo³⁹. Decisamente di minore entità sono i traffici interni al territorio italiano e lungo il corridoio del Mediterraneo: si distingue Trieste - snodo del nord-est italiano tra il corridoio Mediterraneo e quello Adriatico-Baltico - ed infine Modane e Pescara; le mete dei restanti treni, occasionali o solo di passaggio, sono riportate in Tabella 2.1.

La rete a nord di Novara, in direzione di Domodossola e del confine con la Svizzera, rappresenta dunque il canale principale del traffico merci ferroviario del nodo. Su questo versante le Alpi costituiscono un ostacolo particolarmente impegnativo da superare, ragione per cui i valichi alpini che ne permettono l'attraversamento assumono un ruolo di fondamentale importanza. I valichi sono importanti non solo per l'accessibilità sul piano locale, ma contribuiscono al funzionamento efficace ed efficiente dell'intera catena logistica. Tra gli obiettivi prioritari del Corridoio Reno-Alpi si possono infatti contare la realizzazione dei tunnel di base per l'attraversamento dei valichi alpini a bassa quota (Corridor Rhine Alpine, 2018): il Lötschberg attivo dal 2007, il Gottardo attivo da dicembre 2016 ed il Ceneri previsto per il 2020, tutti in territorio svizzero. A questi si aggiunge il traforo storico del Sempione, che seppure sia stato costruito agli inizi del '900 ha la medesima funzionalità degli attuali tunnel di base, attraversando le Alpi ad un'altitudine di circa 700 m s.l.m. con livellette massime di +0,2% e -0,7%.



Figura 2.6 Corridoio Reno-Alpi in Italia. GBT: Tunnel di Base del Gottardo; CBT: Tunnel di Base del Ceneri; LBT: Tunnel di Base del Lötschberg; 3V: Tunnel del Terzo Valico. Stazioni di confine: Chiasso, Luino, Domodossola. Fonte (Sito Web intermodale24-rail, 2018)

³⁹ Il corridoio Scandinavo-Mediterraneo non interessa direttamente Novara, ma secondo le estensioni previste da RFC al 2020 sarà collegato al corridoio Reno-Alpi in prossimità di Francoforte e Stoccarda, a conferma dell'utilità di maggiori collegamenti della rete.

Come si può osservare dalla Figura 2.6 il Lötschberg ed il Sempione si collocano in sequenza fra loro, così come il Gottardo ed il Ceneri. I primi due costituiscono un asse di accesso diretto a Novara con la possibilità di instradare i treni via Domodossola o via Arona, mentre i secondi formano un'asse diretto più propriamente a Milano. Fra i due assi è comunque presente un collegamento che da Luino passa per Oleggio e permette di arrivare a Novara anche dall'asse del Gottardo.

Dunque, considerando che:

- a) il 70% del traffico merci ferroviario di Novara passa per i valichi del Gottardo e del Sempione, via Domodossola (Tabella 2.1);
- b) il nodo di Milano è piuttosto congestionato, dovendo gestire la coesistenza del traffico merci con un denso traffico passeggeri sia di tipo metropolitano che regionale e a lunga percorrenza - quindi non è in grado di assorbire da solo il traffico proveniente dai valichi;
- c) il terminal di Novara non è gateway, quindi allo stato attuale è minimale lo smistamento dei treni e delle merci da un corridoio all'altro;

si assume che i traffici ferroviari sugli assi del Sempione e del Gottardo rappresentino, ad oggi, la principale domanda del nodo di Novara. Ipotesi pienamente condivisa da RFI, in virtù delle sistematiche analisi di domanda realizzate dal gruppo (RFI, 2018), nonché delle previsioni nel medio e lungo periodo basate sulle relazioni commerciali e sugli accordi internazionali con gli altri Stati. Fra questi spiccano gli accordi con la Svizzera (Consiglio federale svizzero; Governo della Repubblica Italiana, 2014) che: (1) confermano la posizione di Novara come principale nodo di affluenza dei traffici provenienti dal Sempione e parte di quelli del Gottardo; (2) stabiliscono concretamente gli interventi da realizzare per potenziare la capacità del nodo ferroviario di Novara in funzione della domanda di traffico merci su rotaia sugli assi del Sempione e del Gottardo (Confederazione svizzera, 2017). Poiché per il momento, questi interventi sono gli unici previsti concretamente, si conferma ulteriormente l'assunzione fatta e cioè che il traffico proveniente dai valichi alpini svizzeri rappresenta nel breve/medio periodo la principale domanda del nodo di Novara.

A seguire ci si concentrerà dunque su questi assi - del Sempione e del Gottardo - trascurando eventuali altre direttrici, come il corridoio Mediterraneo o la parte sud del corridoio Reno-Alpi.

2.3.1 Traffico merci attraverso i valichi alpini svizzeri

La spartizione modale del traffico merci sugli assi del Sempione e del Gottardo è nettamente a favore della ferrovia con il 71% contro il 29% della strada (Commissione europea, Confederazione svizzera, 2018). Il ridotto numero dei veicoli merci pesanti sui valichi alpini al confine con la Svizzera e l'alta quota di mercato della ferrovia è il risultato di politiche svizzere atte a regolare le modalità di trasporto impiegate per il traffico pesante⁴⁰. L'obiettivo principale di queste politiche è attuare un trasferimento modale, da strada a ferrovia, in linea con obiettivi ambientali e climatici. A tale scopo, gli strumenti impiegati - la *Nuova ferrovia transalpina*⁴¹ (Alptransit), la tassa sul traffico pesante commisurata alle prestazioni (TTPCP) e la riforma delle ferrovie⁴² - risultano alquanto efficaci, considerato che l'entrata in servizio della galleria di base del San Gottardo (parte del progetto Alptransit) non svolge ancora un ruolo rilevante, data la brevità del tempo intercorso dall'apertura e le modifiche ancora in opera sulle linee di adduzione a valle.

In Figura 2.7 si riporta l'andamento dei traffici merci - totali e per modalità di trasporto - sul passo del Gottardo e del Sempione dal 2000, anno di riferimento delle politiche svizzere sul trasferimento modale, al 2016 (i dati includono la nuova galleria di base del Gottardo). Stando all'assunzione fatta in precedenza sulla domanda del nodo di Novara, un incremento del traffico in corrispondenza di questi due passi rappresenta un potenziale incremento della domanda su Novara, scalata chiaramente in rapporto alla capacità degli altri terminal della zona.

Con riferimento alla Figura 2.7 si è considerato più rappresentativo esaminare i traffici ferroviari del Gottardo e del Sempione comparati con gli attraversamenti stradali di tutti i valichi italo-svizzeri, data la maggiore estensione e flessibilità della rete viaria. Se osserviamo l'andamento del volume totale delle merci, fino al 2008 si assiste ad un loro notevole progressivo aumento, seguito dal drastico calo provocato dalla crisi economica e finanziaria manifestatasi a livello mondiale nel 2008-2009. La ripresa congiunturale

⁴⁰ Legge sul trasferimento del traffico (1999); legge del 19 dicembre 2008 sul trasferimento del traffico merci (LTrasf; RS 740.1) entrata in vigore il 2010 come parte costitutiva del progetto di legislazione sul traffico merci.

⁴¹ La Nuova ferrovia transalpina (NFTA o Alptransit), è un progetto svizzero, consiste nell'ampliamento di due assi ferroviari tra il nord e il sud del Paese. Paragonabili a tratte di pianura quanto a pendenze e raggi delle curve, questi assi consentono di abbreviare le distanze, di aumentare la velocità di marcia massima e di circolare con convogli più lunghi. Gli elementi principali di Alptransit sono costituiti da tre nuove gallerie: le gallerie di base del Lötschberg, del Gottardo e del Ceneri.

⁴² Con "riforma delle ferrovie" si fa riferimento alla liberalizzazione del mercato dei trasporti merci su rotaia.

dopo la fine della crisi finanziaria ha prodotto un nuovo e significativo incremento del traffico, dopodiché dal 2011 si è registrata una diminuzione continua e in parte sensibile dei transiti stradali, concorde con le politiche svizzere citate, mentre i transiti ferroviari hanno continuato secondo una tendenza crescente, ad eccezione della riduzione registrata nel 2012 provocata dall'incendio all'interno della galleria del Gottardo. Da allora la ferrovia ha registrato un aumento continuo superando nettamente anche il livello raggiunto prima della crisi finanziaria.

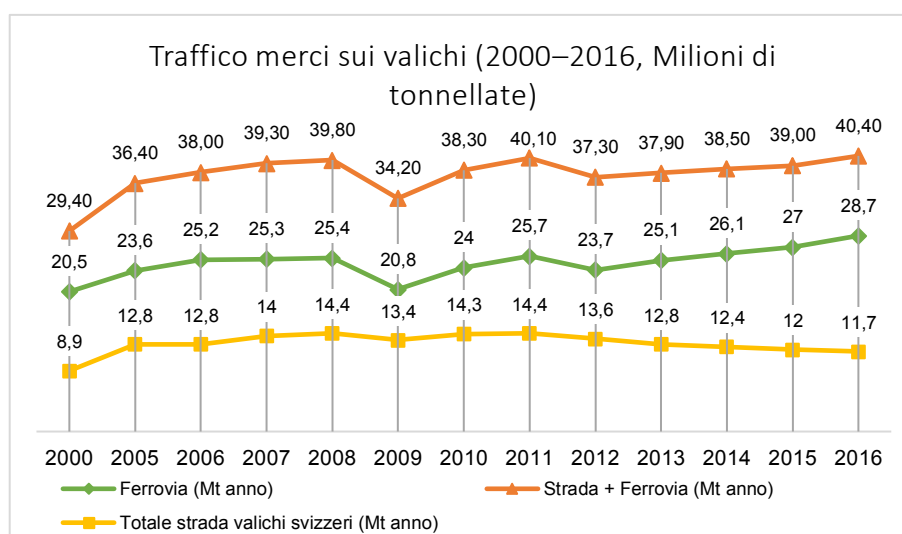


Figura 2.7 Evoluzione del traffico merci sui valichi (2000-2016) in milioni di tonnellate nette⁴³ (Confederazione svizzera, 2017).

2.3.1.1 Analisi del traffico merci per asse ferroviario

Nel periodo di riferimento 2000-2016 le quote dei due assi ferroviari nord-sud che attraversano la Svizzera si sono modificate significativamente a favore del Sempione, registrando nel 2016 un aumento del 267% del traffico ferroviario rispetto al 2000. Secondo (Confederazione svizzera, 2017) il Gottardo è rimasto il principale asse ferroviario transalpino in Svizzera con il 53% del traffico merci, ma nello stesso periodo la sua quota è diminuita in misura significativa mentre il Sempione ha guadagnato parti di mercato raggiungendo nel 2016 il 47% del traffico merci ferroviario transalpino con la Svizzera.

⁴³ Tonnellate nette-nette: peso delle merci trasportate al netto di container, casse mobili e semirimorchi nel TCNA oppure al netto di veicoli merci pesanti, rimorchi e semirimorchi per la RoLa

Tabella 2.4 Traffico merci ferroviario transalpino sugli assi del Sempione e Gottardo dal 2000 al 2006, in milioni di tonnellate anno. TCC: trasporto in carri completi, TCnA: trasporto combinato non accompagnato, TCA: trasporto combinato accompagnato/strada viaggiante.
(Confederazione svizzera, 2017)

Ferrovia Mt anno	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gottardo	16,8	15,6	16,2	15,6	15,5	11,6	14,4	14,4	13,9	15	15,6	15,3	15,3
TCC	6,9	5,4	5,2	5	5,5	3,8	4,7	5	4,3	4,6	5,5	5,6	6,3
TCnA	8,9	9,7	10,6	10,2	9,7	7,6	9,5	9,2	9,4	10,2	9,9	9,5	8,9
TCA	1	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Sempione	3,7	8	9	9,7	9,9	9,2	9,6	11,3	9,8	10,1	10,5	11,7	13,4
TCC	3,6	3	3,3	3,3	3,3	2,6	2,6	2,9	2,6	2,3	1,8	2,3	2,6
TCnA	0,1	3,6	4,2	4,9	5,1	5,1	5,4	6,8	5,8	6,1	6,9	7,7	9,2
TCA	0	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,4	1,7	1,7	1,7	1,6

Questa evoluzione è dovuta, tra l'altro, ad una limitata disponibilità dell'infrastruttura sull'asse del Gottardo causata da interventi complessivi per l'adattamento di sagoma P/C 80 - corridoio a 4 metri - sulla linea di Luino. Il forte aumento sull'asse del Sempione è stato invece reso possibile grazie all'apertura della galleria di base del Lötschberg nel 2007 e grazie ai lavori di *upgrade* tecnologico e prestazionale della galleria del Sempione e della rete ferroviaria a sud che hanno aumentato la capacità e migliorato le condizioni di esercizio su questa direttrice.

2.3.1.2 Tendenze TCC, TCNA e RoLa

Le quote delle singole tipologie di traffico restano quasi invariate nel corso degli ultimi anni. Il TCC (Trasporto in Carri Completì), sotto forma di treni completi in genere con un carico di merci di gran consumo - legna, argilla, carta, automobili, acciaio, ecc. - dal 2013 è soggetto ad un'inversione di tendenza guadagnando parti di mercato e assestandosi nel 2016 al 31% del traffico merci ferroviario totale sui due valichi del Sempione e del Gottardo (Tabella 2.5). Nel 2014 il TCC trasportava 7,3 milioni di tonnellate di merci, mentre nel 2016 tale volume aumenta a quasi 8,9 milioni di tonnellate.

Il TCnA - trasporto combinato non accompagnato - rafforza progressivamente la sua posizione di principale modalità di trasporto nel traffico merci transalpino, trasportando nel 2016 circa 18 milioni di tonnellate di merci su ferrovia, raggiungendo una quota del 63% del traffico totale.

La quota dell'autostrada viaggiante (TCA), la minore fra le tre modalità, si mantiene pressoché costante sul 7% - corrispondenti a 2 milioni di tonnellate - consolidando il proprio ruolo di offerta complementare del traffico merci ferroviario sugli assi svizzeri nord-sud.

In definitiva, i gruppi di merci più forti dal punto di vista della domanda e della crescita presentano una notevole compatibilità con il TCnA (Confederazione Svizzera, 2018), pertanto è prevista una crescita del volume dei trasporti ferroviari TCnA, e in parte TCC, nel traffico di transito. Questa crescita dei volumi trasportato TCnA è prevista anche in virtù dell'adeguamento a sagoma P/C 80 che incoraggia fortemente il trasporto combinato di semirimorchi.

Tabella 2.5 Quote di TCC, TCNA e RoLa rispetto al traffico merci ferroviario totale (in milioni di tonnellate anno) dei valichi del Gottardo e del Sempione, 2000-2016 (Confederazione svizzera, 2017)

	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
TCC	51%	36%	34%	33%	35%	31%	30%	31%	29%	27%	28%	29%	31%
TCnA	44%	56%	59%	60%	58%	61%	62%	62%	64%	65%	64%	64%	63%
TCA	5%	8%	8%	8%	7%	9%	8%	7%	7%	8%	7%	7%	6%

2.3.2 Capacità ferroviaria ed utilizzazione dei valichi

Nell'ambito delle attività dell'Osservatorio UE del traffico merci stradale e ferroviario nella regione alpina svizzera (Commissione europea, Confederazione svizzera, 2018) si effettuano sistematicamente rilevamenti dell'utilizzazione delle tracce orarie ferroviarie disponibili. Fino all'entrata in esercizio della galleria di base del Gottardo, avvenuta l'11 dicembre 2016, la capacità a disposizione del traffico merci ammontava complessivamente a 290 treni al giorno per ogni direzione (Confederazione Svizzera, 2018). A seguito dell'entrata in esercizio della galleria, la capacità è aumentata di 12 tracce al giorno. Al completamento della galleria di base del Ceneri e del corridoio di quattro metri sull'asse del Gottardo, saranno disponibili 72 nuove tracce che si aggiungeranno alle attuali 180 giornaliere in entrambe le direzioni (Tabella 2.6).

Tabella 2.6 Capacità delle tracce sugli assi nord-sud nel traffico merci transalpino.
(Confederazione Svizzera, 2018)

	Capacità del traffico fino al 10.12.2016 numero treni/giorno in en- trambe le direzioni	Capacità del traffico fino al 10.12.2016 numero treni/giorno in en- trambe le direzioni
Asse Sempione	110	110
Asse Gottardo	180	192
TOTALE	290	302 (+72 Alptransit)

I grafici in Figura 2.8 illustrano il tasso di utilizzo della capacità ferroviaria tra il primo semestre 2016 ed il secondo semestre 2017 per l'asse del Gottardo e per quello del Lötschberg-Sempione (Confederazione Svizzera, 2018) distinguendo i tipi di trasporto ferroviario: TCC, TCNA e Rola (TCA). L'utilizzo medio della capacità è calcolato su periodi di 10 settimane e per tenere conto delle variazioni settimanali della capacità utilizzata, i valori medi settimanali sono calcolati mediante fattori di ponderazione specifici per ogni giorno. Le linee rosse mostrano il valore di riferimento del 66% definito nell'accordo sui trasporti terrestri tra l'Unione europea e la Svizzera⁴⁴, mentre le linee tratteggiate indicano la capacità massima.

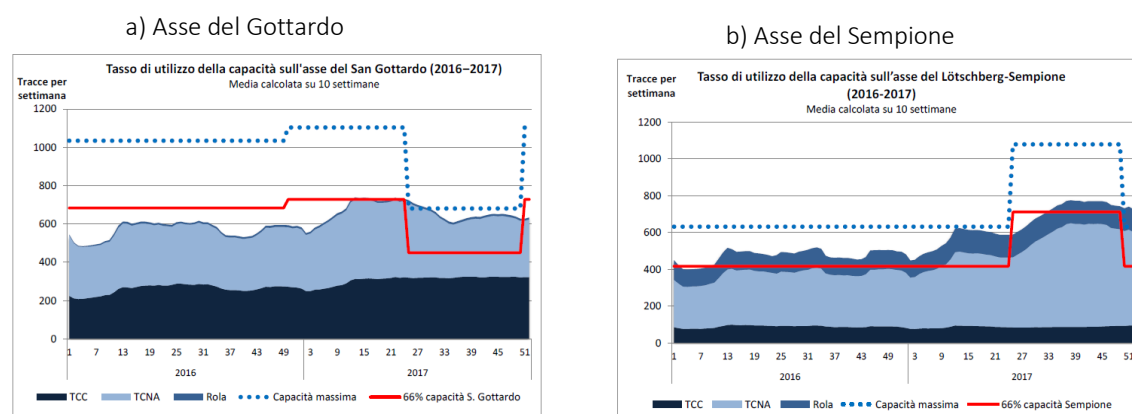


Figura 2.8 Tasso di utilizzo settimanale della capacità a) sull'asse del Gottardo, b) sull'asse del Sempione, nel 2016-2017. Tracce per il traffico merci (Confederazione Svizzera, 2018).

⁴⁴ In caso di gravi problemi nello smaltimento del traffico merci transalpino su strada associati a un insufficiente tasso di utilizzo della capacità ferroviaria disponibile nel nostro Paese (tasso di utilizzo inferiore al 66 % per un periodo di dieci settimane), l'articolo 46 dell'Accordo sui trasporti terrestri CH-UE permette alla Svizzera di adottare misure unilaterali di salvaguardia. Ai fini dell'adozione di queste misure, i problemi summenzionati devono inoltre essersi manifestati nonostante la corretta applicazione dei provvedimenti relativi ai parametri di qualità (Confederazione Svizzera, 2018).

Ogni settimana sono disponibili circa 1035 tracce - 1065 a partire dall'11.12.2016 - sull'asse del San Gottardo e 633 su quello del Lötschberg-Sempione. Alla capacità nel fine settimana è stato attribuito un peso inferiore in virtù dell'attenuazione dell'andamento settimanale. Ad esempio, per il calcolo della capacità settimanale sull'asse del Gottardo le 180 - 210 a partire dall'11.12.2016 - tracce disponibili giornalmente sono moltiplicate per il fattore 5,75 anziché 7, così da tenere in debita considerazione sia l'andamento complessivo, sia quello relativamente contenuto del fine settimana. In media, l'utilizzo della capacità nel Gottardo è del 54%, mentre sul corridoio del Sempione, la media è del 75%. Questi valori variano tra il 46,8% e il 59,5% al Gottardo e tra il 63,0% e l'82,1% del Sempione, raggiungendo di norma il tasso di utilizzo del 66% nei giorni di punta.

2.3.3 Modelli di esercizio futuri

In questo contesto, in cui le linee ferroviarie di confine tra Italia e Svizzera sono ampiamente utilizzate (Figura 2.8) e la tendenza del trasporto merci su ferrovia è in generale crescente (Figura 2.7), il nodo di Novara registra effettivamente un incremento della domanda di tracce merci, in particolare sulle direttrici che lo collegano ai valichi svizzeri - Domodossola e Luino. Questo incremento è quantificato dai *Modelli di esercizio* redatti dalla *Direzione Commerciale ed Esercizio Rete RFI* - coerentemente ai tavoli tecnici tra i gestori dell'infrastruttura svizzera ed italiana - che specificano quali e quanti treni dovranno circolare sulla rete ai vari orizzonti temporali. In generale i *Modelli di esercizio* rappresentano gli obiettivi di capacità che il gestore della rete ferroviaria si propone di garantire, intervenendo con opere di potenziamento della rete laddove necessario.

Nel caso del nodo merci di Novara si propongono due modelli di esercizio: al 2020 (RFI, 2018) e al 2025 (RFI, 2017). Per lo scenario al 2020 si è ipotizzato un traffico merci di 16 treni/giorno in aggiunta agli attuali (Tabella 2.7) provenienti dal Valico di Luino (Gottardo) e percorrenti l'itinerario via Laveno, Sesto Calende ed Oleggio. Linea che grazie all'adeguamento alla sagoma P/C 80 può accogliere il trasporto dei semirimorchi e dell'autostrada ferroviaria⁴⁵.

⁴⁵ *Esame dell'ampliamento a lungo termine dell'offerta della Rola sull'asse del San Gottardo* (Confederazione svizzera, 2017) allo scopo di sfruttare appieno, a medio e a lungo termine, i vantaggi offerti dal corridoio di quattro metri su questo asse. A seconda delle decisioni che le società implicate intraprenderanno, esiste anche l'alternativa di interrompere l'offerta della Rola alla fine del 2023.

Tabella 2.7 Modello di esercizio al 2020; tratta Oleggio - Vignale - Novara Boschetto (RFI, 2018).

Tratta Oleggio - Vignale - Novara (2020)	
	VOLUMI treni/giorno
Traffico merci GOTTARDO	16

Inoltre, gli scenari di traffico attesi sull'asse del Sempione verso Domodossola-Arona-Novara prevedono di garantire nello scenario di sviluppo al 2025 un volume di tracce merci pari a 132⁴⁶ treni/giorno ripartiti nei due principali itinerari via Borgomanero e via Arona/Oleggio, nell'ipotesi di tracce merci P/C 80 e modulo 750 m. Questo modello di esercizio è definito nell'ambito del progetto di raddoppio della linea Oleggio-Vignale. Sulla tratta oltre al Valico del Sempione, insistono in prospettiva anche traffici provenienti dal Valico del Gottardo grazie alla linea Oleggio - Sesto Calende.

Tabella 2.8 Modello di esercizio al 2025; tratta Oleggio - Vignale (RFI, 2018).

Tratta Oleggio - Vignale (2025)	
	VOLUMI treni/giorno
Treni merci SEMPIONE	66
Treni merci GOTTARDO	16 (2020)

Assumendo che il traffico proveniente dal Sempione si riparte in egual misura fra i due itinerari via Borgomanero e via Oleggio, allora sulla tratta Vignale-Novara i volumi di traffico previsti sono i seguenti.

Tabella 2.9 Modello di esercizio al 2025; tratta Vignale - Novara (RFI, 2018).

Tratta Vignale - Novara (2025)	
	VOLUMI treni/giorno
Treni merci SEMPIONE	132
Treni merci GOTTARDO	16 (2020)

⁴⁶ 3 tracce/h per direzione per 22 ore di esercizio.

2.4 Interventi RFI pianificati

Sulla base di questi dati e degli accordi tra Italia e Svizzera⁴⁷ è risultato indispensabile da parte italiana rivedere le reti di adduzione ai due valichi ferroviari del Sempione e del Gottardo, e definire al meglio le strategie e l'introduzione di nuovi interventi, puntando a un incremento delle prestazioni delle linee in termini di capacità e regolarità.

Già dai primi anni del 2000, iniziarono a svilupparsi delle ipotesi sulla definizione di un *asse ferroviario ad elevate prestazioni* per l'integrazione delle reti svizzere nel nord-ovest dell'Italia. Si formalizzò allora un primo programma di interventi che non prevedeva la realizzazione di un asse ferroviario completamente nuovo, bensì la progressiva separazione dei flussi passeggeri e merci tramite un generale riassetto e potenziamento della rete esistente. Tale programma prevedeva per il transito delle merci l'utilizzo di *itinerari gronda* che avrebbero bypassato i principali nodi metropolitani come quello di Milano (RFI, 2017). Tale sistema di gronde è stato parzialmente superato negli anni a venire, dalla necessità di contenere i costi di realizzazione, puntando su interventi prevalentemente prestazionali in termini di capacità e regolarità.

Il 17 dicembre 2012 la Svizzera e l'Italia firmano una Dichiarazione d'intenti - *Memo-randum of Understanding* - per i progetti infrastrutturali comuni fino al 2020 (Confederazione svizzera, 2017). Questa dichiarazione ministeriale contiene un elenco di provvedimenti volti a creare i presupposti infrastrutturali per un miglioramento quantitativo e qualitativo del traffico. I gruppi di lavoro monitorano l'attuazione dei progetti e presentano annualmente un rapporto al Comitato direttivo. Nella seduta del 10 maggio 2017 del Comitato, a causa di una serrata pianificazione degli intervalli, alle scadenze originariamente stabilite sono state apportate modifiche di lieve entità, che tuttavia non influiscono sulla garanzia della capacità. In Figura 2.9 sono schematizzati i principali interventi pianificati dai tavoli tecnici, con le corrispettive scadenze. Fra questi, i progetti che interessano la zona di Novara sono (RFI, 2017):

- il raddoppio della tratta, oggi a semplice binario, Vignale-Oleggio-Arona in due fasi: la prima fase Vignale-Oleggio e la seconda Oleggio-Arona;

⁴⁷ Convenzione bilaterale 1999 tra Italia e Svizzera - RS 0.742.140.345.43 - concernente la garanzia della capacità delle linee d'accesso sud ad Alptransit. La Svizzera e l'Italia coordinano i lavori transfrontalieri e le pianificazioni infrastrutturali nel trasporto ferroviario. I rappresentanti dei Ministeri e delle ferrovie di entrambi i Paesi si incontrano a intervalli regolari nel Comitato direttivo e nei cinque gruppi di lavoro subordinati.

- il “Nodo di Novara 1a Fase”, per cui si prevede la sistemazione a PRG della stazione di Novara Boschetto e la realizzazione della *bretella di Vignale* per collegare direttamente le linee provenienti dal valico del Sempione senza passare per l’impianto di Novara Centrale. Nell’ambito di questo progetto è prevista anche la revisione e realizzazione del PRG di Vignale;
- adeguamento delle linee e degli impianti della direttrice via Borgomanero⁴⁸ e via Arona⁴⁹ per gestire treni lunghi fino a 750 m;
- adeguamento a sagoma P/C 80 e al modulo 750 m del valico di Luino⁵⁰;
- completamento dell’adeguamento a sagoma dell’itinerario del Sempione, con consolidamento dell’intervento di adeguamento a sagoma tra Domodossola-Arona-Oleggio e Gallarate;
- “Piano Nazionale di Sviluppo ERTMS”, prevedendo per fasi l’installazione del sistema sulle linee afferenti al valico del Sempione consentendo entro il 2026 l’attivazione dell’ERTMS L2 sovrapposto;
- programma di internalizzazione tecnologica con l’installazione di ACC sulle linee afferenti al valico del Sempione.

Il progetto “Nodo di Novara 1a Fase”, che nella primavera/estate 2018 risultava agli ultimi step dell’iter autorizzativo del progetto definitivo, diventa nello stesso periodo oggetto della collaborazione tra la sottoscritta ed RFI costituendo il caso di studio della tesi. Nell’ambito del progetto, la tesi si propone di analizzarne l’efficacia applicando i più recenti metodi e strumenti di simulazione. Pertanto, a seguire, si forniranno maggiori dettagli in merito al progetto “Nodo di Novara 1a Fase” - situazione attuale dell’area interessata dal progetto e interventi infrastrutturali pianificati. Al Capitolo 4 invece si svilupperà il vero e proprio caso di studio di analisi della risposta del sistema agli interventi pianificati e quindi della valutazione del raggiungimento degli obiettivi progettuali. Fra i due si interpone il Capitolo 3 che costituisce la base teorica della metodologia applicata, necessaria per una piena comprensione del lavoro di analisi svolto.

⁴⁸ Negli impianti di Premosello, Caltignaga, Cressa Fontaneto e Gravellona Toce.

⁴⁹ Negli impianti di Arona, Ticino e PM Cameri.

⁵⁰ Nella tratta tra Oleggio e Sesto Calende-Laveno-Luino.

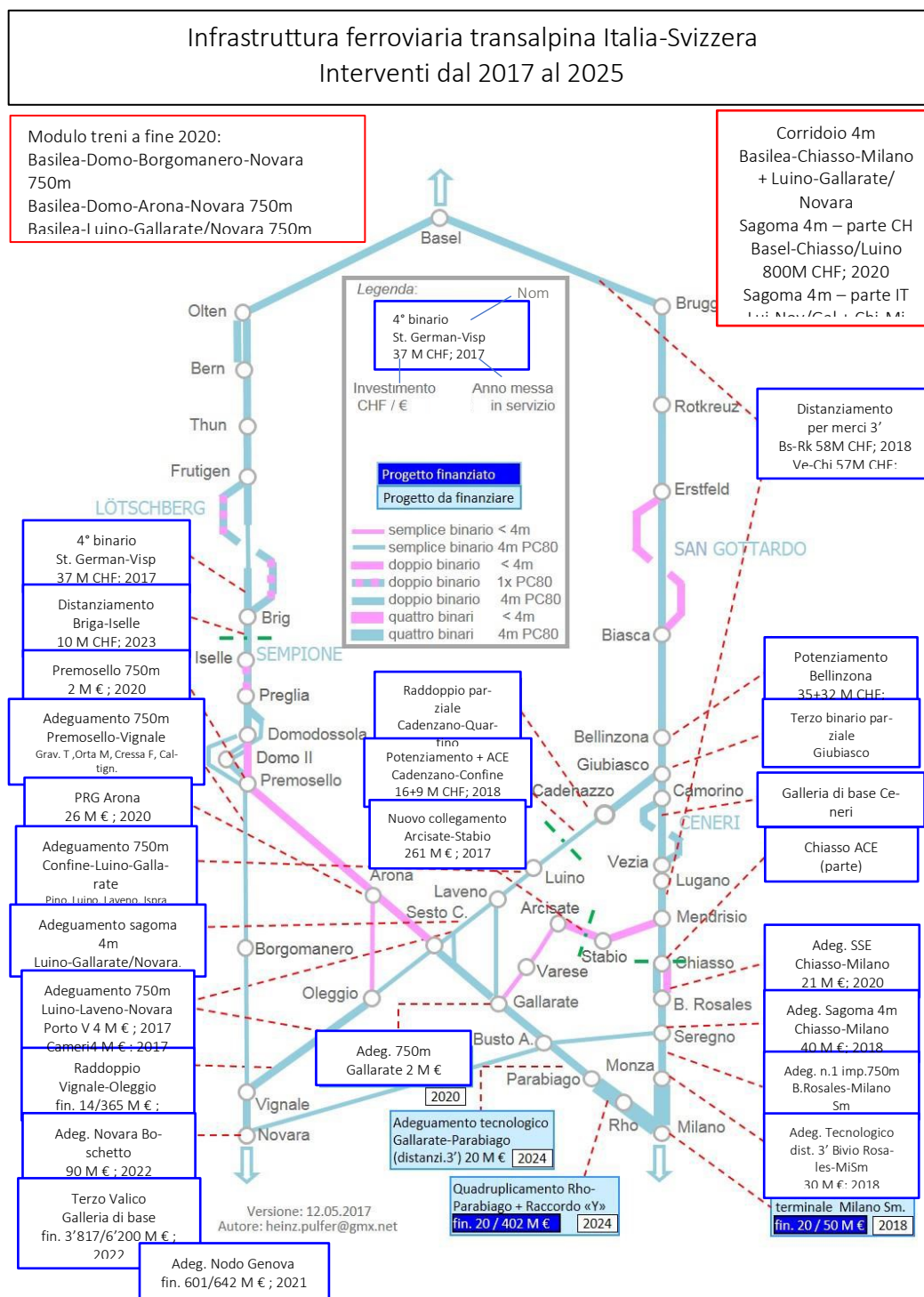


Figura 2.9 Progetti infrastrutturali fino al 2025 in Svizzera e in Italia per il trasporto transfrontaliero di persone e merci (Confederazione svizzera, 2017).

2.4.1 Nodo di Novara 1a Fase

Le seguenti informazioni derivano dal “Progetto di fattibilità tecnico economica” di Giugno 2018 (ITALFERR, 2018); su gentile concessione dell’Ufficio Investimenti RFI di Torino.

Il progetto prevede sommariamente i seguenti interventi:

- realizzazione del collegamento a singolo binario tra Vignale e Novara Boschetto con utilizzo del binario dell’interconnessione ovest pari della linea ad AV/AC Torino-Milano;
- rivisitazione funzionale dell’ingresso dei treni al fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto, nonché al terminal dell’*autostrada viaggiante*, previsto attualmente da Novara Centrale. A seguito di quest’intervento l’ingresso sarà da nord utilizzando la bretella a singolo binario descritta al punto precedente evitando così di interessare l’abitato di Novara. Questa soluzione permette di separare i flussi di traffico;
- nuovo terminal dell’autostrada viaggiante - che impiega una tecnologia Huckepack, con carri a pianale ultrabasso e caricamento orizzontale del veicolo strada dalla coda del treno- in sostituzione a quello esistente, e relativa viabilità di accesso, da realizzarsi come al punto precedente;
- completamento della tangenziale di Novara funzionale anche alla riallocazione del terminal Huckepack ed al potenziamento del centro intermodale di Novara (CIM);
- revisione del PRG di Vignale per inserire due precedenza da 750 m per i treni provenienti dalla linea per Domodossola e dalla linea per Arona con predisposizione di una configurazione provvisoria della nuova fermata di Vignale. Tale fermata prevede 3 binari di cui due - I e II - a servizio passeggeri ed il III precedenza merci;
- completamento dell’adeguamento al transito di treni lunghi 750 m sul corridoio Reno-Alpi nella tratta che passa per Vignale fino a Novara, inclusi i binari del fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto.

A seguito si riporteranno maggiori dettagli sullo stato esistente e sugli interventi di progetto.

2.4.1.1 Configurazione attuale

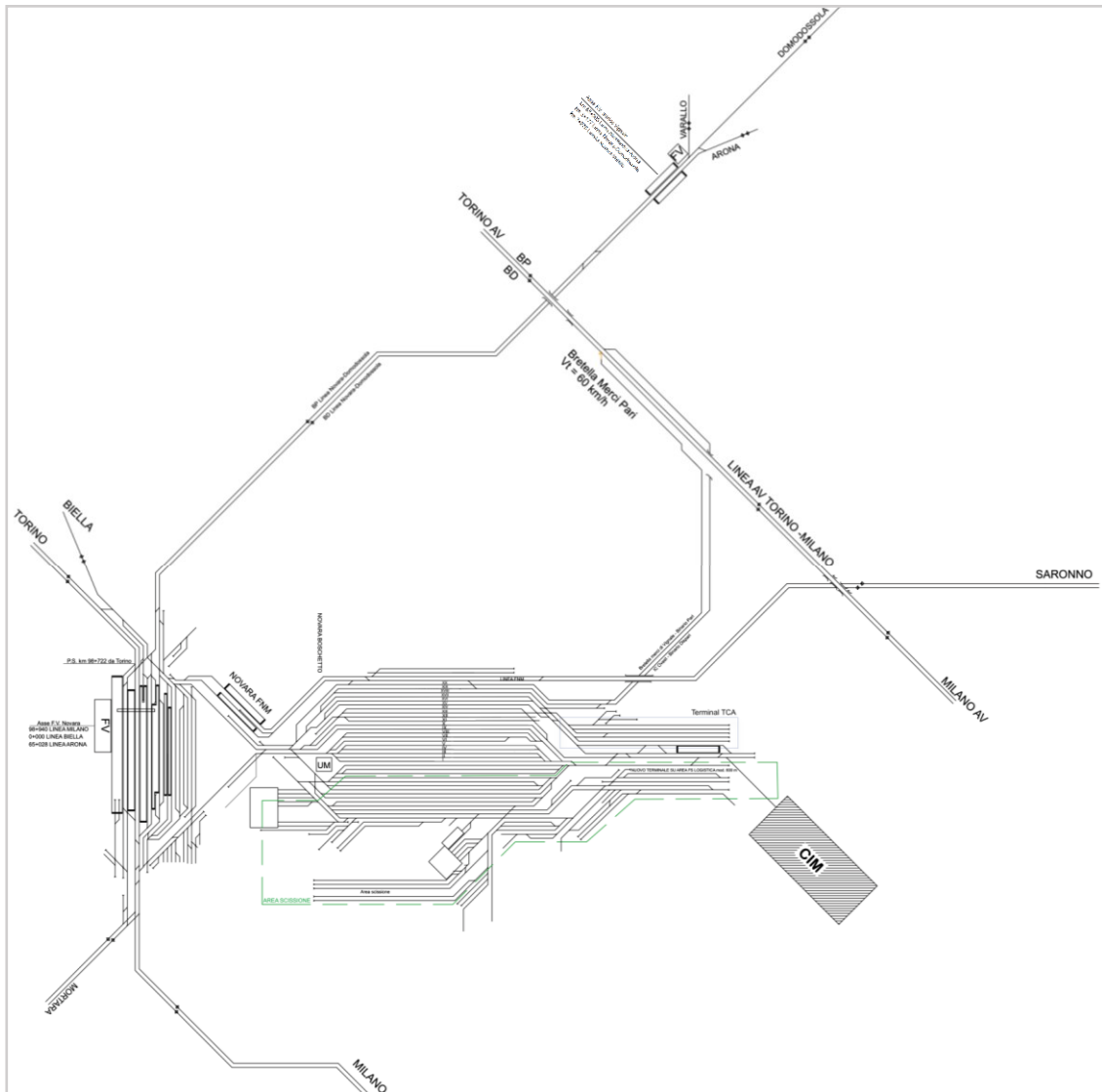


Figura 2.10 Schematico dello stato esistente del nodo di Novara, con al centro Novara Boscchetto (ITALFERR, 2018).

Vignale

Avanzando da Novara in direzione Domodossola/Arona/Varallo, oltrepassata l'autostrada Milano-Torino, le linee a semplice binario Alessandria-Arona e Novara-Domodossola, procedono parallele ad interasse inferiore a 4,00 m con l'inserimento di una doppia comunicazione fra le progressive km 67+500 circa (Alessandria-Arona) e km 67+700 circa (Alessandria-Arona); in prossimità del Canale Cavour si ha lo sfiocco della linea a semplice binario per Varallo, alla progressiva km 3+326,84 (Vignale-Varallo). Le due

linee Alessandria-Arona e Novara-Domodossola proseguono poi a semplice binario connesse mediante una doppia comunicazione posta alla progressiva km 3+300 circa (Novara-Domodossola) e km 68+515 circa (Alessandria-Arona). Attualmente la stazione di Vignale è posta alla progressiva km 3+176,95 linea Novara-Domodossola/68+303,55 linea Alessandria-Arona. Lo schematico relativo allo stato esistente è rappresentato in Figura 2.11.

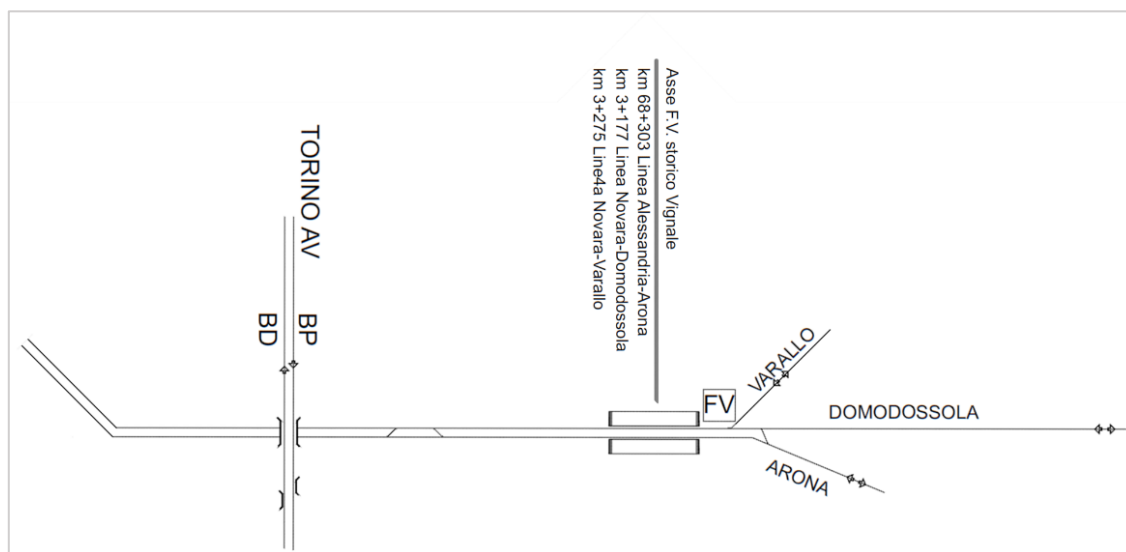


Figura 2.11 Schematico dello stato esistente della Stazione di Vignale (ITALFERR, 2018).

Novara Boschetto

Attualmente l'ingresso dei treni merci al fascio di Novara Boschetto avviene dalla radice ovest via Novara Centrale. All'interno del fascio, costituito in totale da 20 binari, è possibile identificare due fasci principali: fascio Piave (binari dal I al IX) e fascio Corsica (binari dall'XI al XX). Attualmente il fascio si presenta come in Figura 1.17; i binari del fascio sono utilizzati esclusivamente per la presa e consegna da/per il terminal dell'autostrada viaggiante (collocati come in Figura 2.16), il CIM ed in minor misura Radice Chimica e Idrosol. In generale la zona del nodo di Novara interessata dal progetto si presenta come in Figura 2.10.

2.4.1.2 Configurazione di progetto

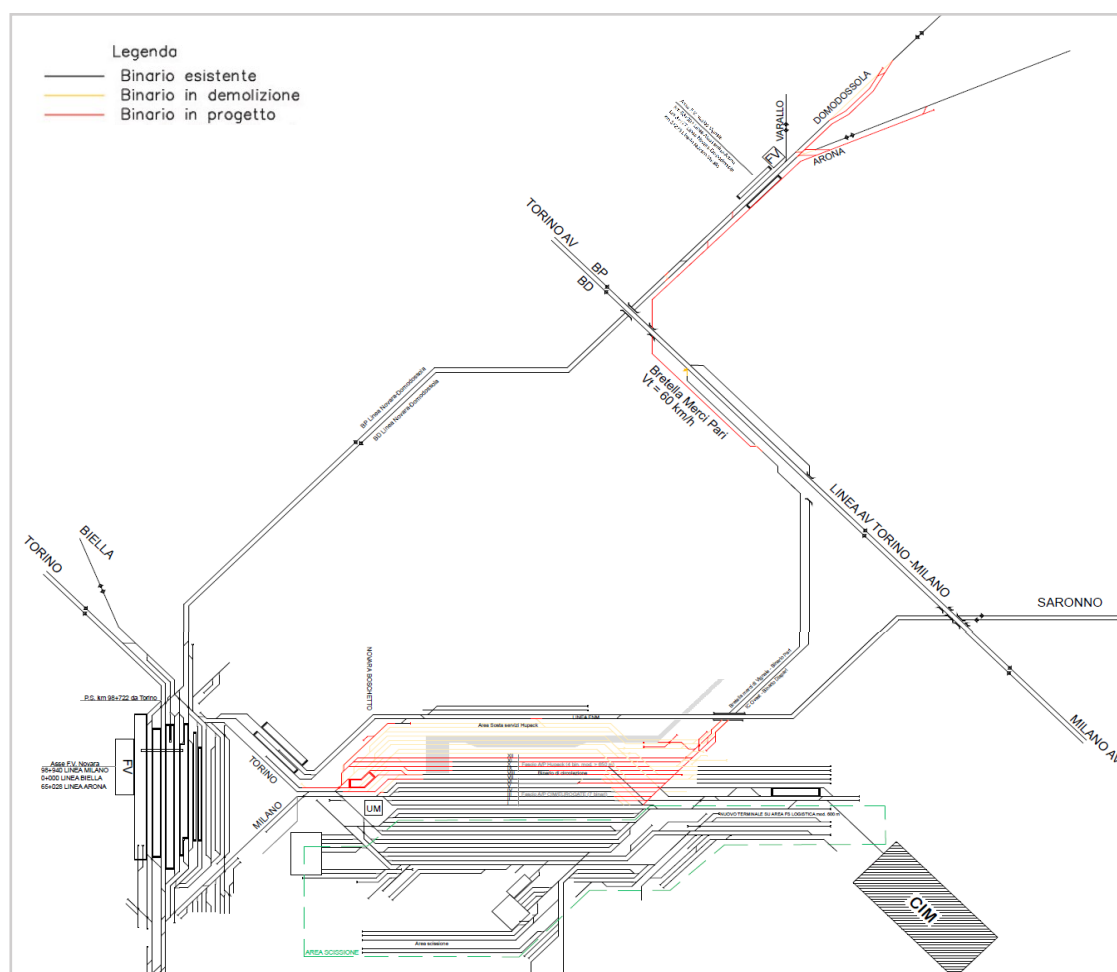


Figura 2.12 Configurazione di progetto del nodo di Novara (ITALFERR, 2018).

Vignale

L'intervento previsto per il PRG di Vignale (revisione) è finalizzato alla creazione di due precedenze di 750 m sulle linee Alessandria-Arona e Novara-Domodossola, con predisposizione della nuova fermata di Vignale. La nuova stazione di Vignale che risulta arretrata di circa 60 m lato Novara, è caratterizzata da due marciapiedi alti, uno laterale adiacente al I binario, ed uno ad isola tra il II ed il III, di modulo 220 m (asse marciapiedi km 68+125,40 linea Alessandria-Arona/km 2+998.80 linea Novara-Domodossola).

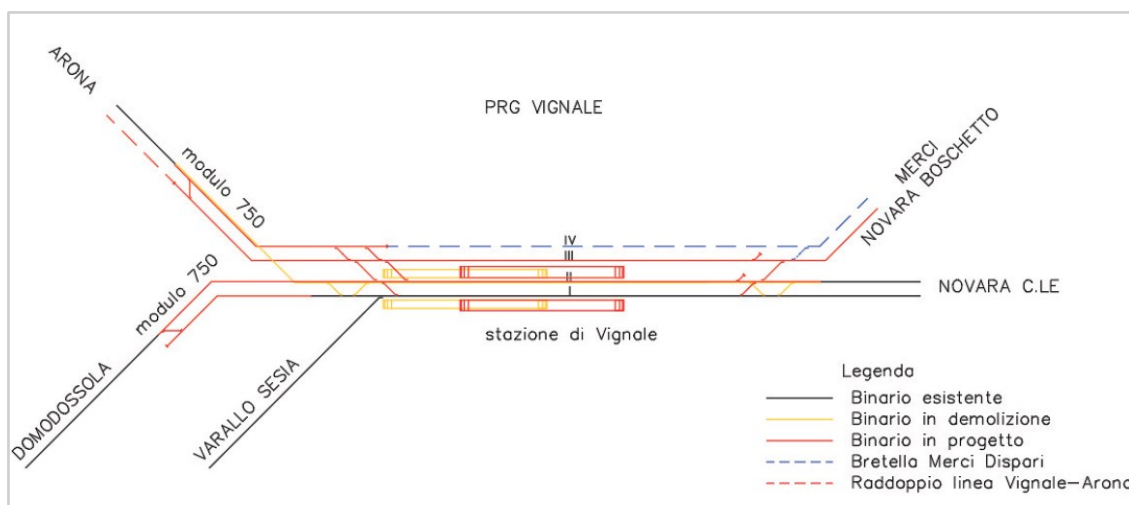


Figura 2.13 Schematico relativo all'intervento in Vignale (ITALFERR, 2018).

Procedendo da Novara in direzione Domodossola/Arona/Varallo, l'intervento di armamento, che ha origine alla progressiva km 2+363 linea Novara-Domodossola/67+490 linea Alessandria Arona, prevede la demolizione delle due comunicazioni esistenti pari/dispari, e l'allargamento dell'interasse dei binari a 4 m. Le nuove comunicazioni inserite nella radice Sud di Vignale mettono in comunicazione il III binario, dove confluisce la bretella merci proveniente da Novara Boschetto, con il II e successivamente il II con il I binario di stazione.

I due binari di corsa che provengono da Novara in direzione Domodossola/Arona/Varallo, procedono, dopo la stazione di Vignale, in corretto tracciato in direzione Domodossola, e mentre il binario pari termina in un paraurti ad assorbimento di energia, il binario dispari si allaccia al semplice binario della linea storica e si connette al precedente; in tale configurazione il binario pari potrà quindi accogliere il futuro binario di raddoppio della linea Novara-Domodossola (limite di intervento km 4+710).

Il III binario di stazione prosegue in direzione Nord affiancandosi a sinistra al binario della linea storica Alessandria-Arona, creando una precedenza di modulo pari a 750m, con comunicazioni rispettivamente alle progressive km 68+500 (fine binario pari) e progressiva 69+692 (limite intervento); in tale configurazione il binario pari potrà quindi accogliere il futuro binario di raddoppio della linea Alessandria-Arona. Il binario della linea storica Alessandria Arona, percorso in direzione Sud, dopo una variante planimetrica di circa 660 m tra le progressive 69+100 e 68+437, si chiude con un paraurti ad assorbimento di energia; in tale configurazione il binario dispari potrà quindi accogliere il futuro binario di bretella merci dispari. Procedendo da Nord a Sud, le comunicazioni

poste sulla radice Nord di Vignale, connettono i binari della linea Arona con quelli della linea Domodossola, permettendo un transito contemporaneo per Novara Centrale sul I e II binario, e per Novara Boschetto sul III.

Tabella 2.10 Caratteristiche tecniche intervento, PRG Vignale: Linea Alessandria-Arona.
(ITALFERR, 2018)

PRG VIGNALE: Linea Alessandria-Arona	
Limite progressive	Da Pk 67+490,00 a Pk 69+692,00
Tipologia di linea	A doppio binario
Velocità di tracciato	60 km/h - 125 km/h
Rango	A, B
Velocità	$V_A=125$ km/h; $V_B=135$ km/h
Interasse	4,00 m
Massima sopraelevazione in curva	50 mm
Raggio di curvatura minimo	550 m
Raggio minimo dei raccordi circolari altimetrici	3 000 m
Pendenza massima longitudinale della linea	3,87‰
Sagoma Cinematica	C
Profilo Minimo degli Ostacoli	P.M.O. 4/5
Peso per Asse	22,5 t/asse
Modulo	Binario Pari: 750 m
Sviluppo	2.202m
Marciapiedi Nuova Stazione di Vignale	Modulo 220 m, altezza 0,55 m

Tabella 2.11 Caratteristiche tecniche intervento, PRG Vignale: Linea Novara-Domodossola.
(ITALFERR, 2018)

PRG VIGNALE: Linea Novara-Domodossola	
Limite progressive	Da Pk 2+363,00 a Pk 4+710,00
Tipologia di linea	A doppio binario
Velocità di tracciato	125 km/h
Rango	A, B
Velocità	$V_A=125$ km/h; $V_B=135$ km/h
Interasse	4,00 m
Massima sopraelevazione in curva	70 mm
Raggio di curvatura minimo	1 504 m
Raggio minimo dei raccordi circolari altimetrici	5 500 m
Pendenza massima longitudinale della linea	10.77‰
Sagoma Cinematica	C

Profilo Minimo degli Ostacoli	P.M.O. 4/5
Peso per Asse	22,5 t/asse
Modulo	Binario Pari: 750 m
Sviluppo	2.347 m
Marciapiedi Nuova Stazione di Vignale	Modulo 220 m, altezza 0,55 m

Bretella Merci Pari e rivisitazione binario pari IC Ovest

Il collegamento tra Novara Boschetto e Vignale prosegue verso Nord in corretto tracciato sulla linea per Arona, perciò il progetto RFI decide di mantenere su questo binario le progressive della linea Alessandria-Arona, prendendo come riferimento la progressiva del FV⁵¹ storico di Vignale, e procedendo a ritroso verso Novara Boschetto, sino al limite intervento della radice sud (collegamento con Novara Centrale) alla progressiva km 63+576,08, dove si è indicata la progressiva della stessa linea dedotta via Novara Centrale (km 65+078,41) con un delta progressive di 1+502,33.

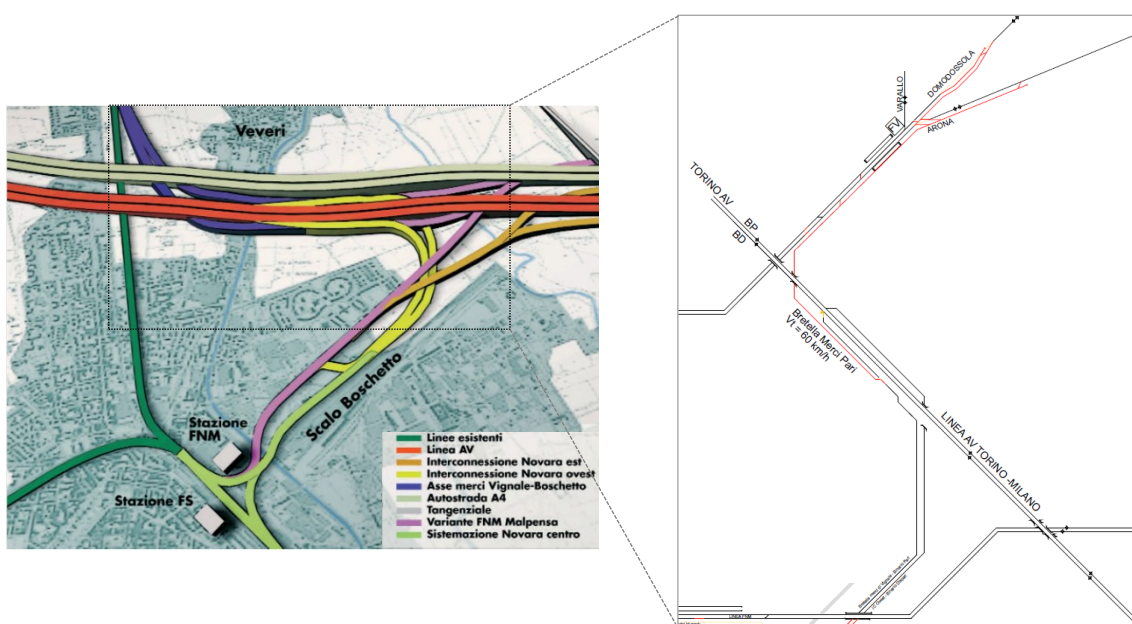


Figura 2.14 Bretella Merci Pari e rivisitazione binario pari IC Ovest (ITALFERR, 2018).

La bretella merci pari si innesta con un flesso sull'attuale tracciato del binario pari dell'Interconnessione Ovest di Novara, al km 66+421, mentre il tracciato rimarrà come l'attuale sino alla radice nord dello scalo di Novara Boschetto. Proseguendo verso nord, si immette

⁵¹ FV: fabbricato viaggiatori.

nel fornice esistente per sotto-attraversare la linea AV Torino Milano, mentre viene prevista un'opera di sotto-attraversamento dell'A4 a doppia canna compatibile quindi con un eventuale raddoppio, e si immette sul III binario di stazione di Vignale.

Tabella 2.12 Caratteristiche tecniche intervento, Bretella Merci Pari/Interconnessione Ovest.
(ITALFERR, 2018)

BRETELLA MERCI PARI/INTERCONNESSIONE OVEST	
Limite progressive	Da Pk 66+421,00 a Pk 68+125,40 (asse Stazione Vignale)
Tipologia di linea	A semplice binario
Velocità di progetto	60 km/h
Rango	A, B
Velocità di tracciato	V=60 km/h
Massima sopraelevazione in curva	120 mm
Raggio di curvatura minimo	228 m
Raggio minimo dei raccordi circolari altimetrici	3 000 m
Pendenza massima longitudinale della linea	12,742‰
Sagoma Cinematica	C
Profilo Minimo degli Ostacoli	P.M.O. 4/5
Peso per Asse	22,5 t/asse
Sviluppo	1.704,40 m

Novara Boschetto

L'intervento previsto in Novara Boschetto è volto principalmente all'implementazione di un sistema di autostrada viaggiante analogo a quanto presente oggi nell'impianto di Friburgo (Figura 2.15) e alla rimodulazione del fascio arrivi/partenze con collegamento - parziale o totale - dei binari alla bretella merci.

L'assetto del terminal dell'autostrada viaggiante, nel caso specifico, prevede:

- la realizzazione di un'area di accumulo all'interno della quale far sostare i TIR prima che vengano caricati sui carri ferroviari;
- una viabilità di approccio all'area di carico/scarico dei mezzi su gomma;
- un'area di platea in corrispondenza dei binari di carico nella quale venga effettuato il vero e proprio carico dei TIR sui carri ferroviari.

L'implementazione di questo sistema (Figura 2.16) comporta la demolizione degli attuali binari di carico del sistema autostrada viaggiante, di tutta la radice esistente lato nord

facente capo agli attuali binari dal I al XIII nonché l'eliminazione dei binari dal XIV al XX necessaria per l'inserimento della nuova viabilità. I binari destinati al nuovo terminal dell'autostrada viaggiante saranno in tutto 5: 4 binari esistenti appartenenti in parte agli attuali fascio Piave e Corsica: dal IX al XII destinati al servizio autostrada viaggiante e l'VIII binario è di circolazione interna. Funzionalmente da/per l'IC Ovest si ha la possibilità di accedere a tutti i binari dall'VIII al XIII.



Figura 2.15 Piazzale dell'autostrada viaggiante di Friburgo (Sito Web RAlpin, 2018).

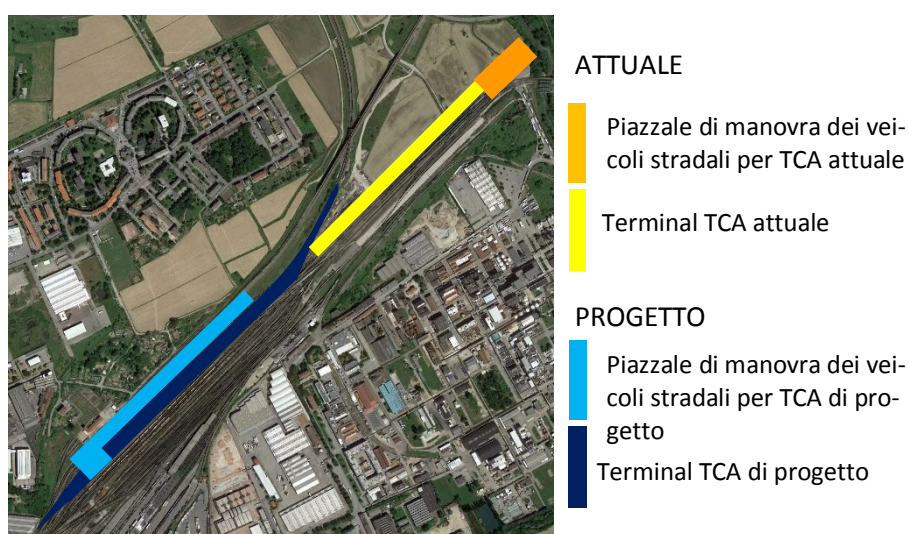


Figura 2.16 Collocazione attuale e di progetto del terminal dell'autostrada viaggiante di Novara Boschetto.

Relativamente alla parte sud di Novara Boschetto, destinata ai treni merci tradizionali o adibiti al trasporto combinato non accompagnato, l'intervento prevede una rimodulazione del fascio con allungamento dei binari fino a 750 m. La sezione in esame si collega alla bretella merci, al binario di circolazione a servizio del CIM ed a tre aste di manovra ad

Tabella 2.13 Caratteristiche tecniche intervento: Novara Boschetto (ITALFERR, 2018).

NOVARA BOSCHETTO	
Velocità di progetto	30 km/h
Interasse	Esistente, variabile da un valore minimo di 3.88 m ad un massimo di 6.58 m
Accelerazione massima non compensata	0,6 m/sec ²
Raggio di curvatura minimo	200 m
Raggio minimo dei raccordi circolari altimetrici	2000 m
Pendenza massima longitudinale della linea	6.807‰ sulle radici; 0.000‰ sugli stazionamenti
Peso per Asse	22,5 t/asse

Il nodo merci di Novara, situato in una posizione geografica cruciale rispetto ai traffici commerciali europei e nazionali, assume principalmente il ruolo di *origine/destinazione* del traffico merci ferroviario del corridoio Reno-Alpi. Consolida infatti strette relazioni commerciali con il centro/nord Europa e necessariamente con la Svizzera, i cui valichi alpini - del Sempione e del Gottardo - rappresentano i principali punti di contatto con il

mercato europeo. Lungo questi assi il trasporto merci su ferrovia presenta una tendenza crescente, determinando un incremento della domanda di tracce merci anche sulle linee e negli impianti che interessano il nodo di Novara. In conseguenza di ciò, sulla base prima della Convenzione bilaterale del 1999 e successivamente della Dichiarazione d'intenti del 2012, i gestori dell'infrastruttura ferroviaria italiana e svizzera hanno definito un programma di interventi allo scopo di garantire un maggior livello di capacità e regolarità della rete, e quindi di soddisfare le maggiori esigenze di trasporto sugli itinerari afferenti ai valichi del Sempione e del Gottardo. Gli interventi, schematizzati in Figura 2.9, prevedono in generale adeguamenti delle linee a standard europei - modulo 750 m, sagoma P/C 80 - e potenziamenti infrastrutturali di diversa natura. Gli interventi riguardano tutta la rete, dai valichi svizzeri fino a Novara e Milano, includendo anche il Terzo Valico in territorio ligure-piemontese. La tesi si concentra allora sugli interventi che interessano il nodo di Novara, nascendo come collaborazione con RFI sul progetto "Nodo di Novara 1a Fase". Il progetto che ha come principali obiettivi l'incremento della capacità delle linee, l'adeguamento ai già citati standard europei e la generazione di benefici a carattere sociale, rappresenta il punto di partenza del Capitolo 4, che si prefigura di valutarne l'efficacia, analizzando la risposta del sistema ferroviario in relazione alle diverse configurazioni di progetto. Un'analisi svolta con una metodologia di simulazione-saturazione dell'orario di esercizio, che si basa su concetti teorici presentati al prossimo Capitolo 3.

3 Capacità delle reti ferroviarie

Come emerso nel capitolo precedente, il trasporto ferroviario nel nord-ovest italiano al confine con la Svizzera è molto intenso, prossimo alla congestione. La collocazione di quest'area all'interno di uno dei più importanti Corridoi merci europei, unita alle nuove e performanti infrastrutture ferroviarie in corrispondenza dei valichi alpini ed alle politiche in materia di trasporti - quali la deregolamentazione del settore ferroviario, con la conseguente apertura del mercato, e le politiche di trasferimento delle merci su rotaia - portano alla rivalutazione della capacità della ferrovia in questa zona geografica.

In generale, la costruzione integrale di nuova infrastruttura è una via molto costosa per aumentare la capacità quindi ne va valutato il ruolo strategico, mentre una soluzione più conveniente è sovente quella di gestire la capacità esistente in modo efficace ed efficiente. Un utilizzo efficiente dell'infrastruttura è una componente essenziale di un sistema di trasporto di alta qualità ed è ormai diventato un compito centrale per i gestori dell'infrastruttura ferroviaria.

Con questo capitolo si vuole dunque inquadrare sul piano teorico - prima di affrontarlo su quello pratico nel capitolo successivo - il problema dello studio e dell'ottimizzazione della capacità in ambito ferroviario. Trattasi di un problema di una complessità piuttosto elevata che emerge soprattutto in sede di stesura o di modifica dell'orario ferroviario, quando i fattori da prendere in considerazione aumentano esponenzialmente. In ambito accademico il tema è stato oggetto frequente di studio, con l'obiettivo di raggiungere risultati quanto più affini alla realtà dell'esercizio ferroviario. Dai più comuni metodi analitici deterministici si è così passati a metodi ottimizzati di analisi simulativa, offerti dall'elaborazione numerica e dalla *Ricerca Operativa*, che meglio descrivono i fenomeni.

3.1 Capacità ferroviaria: definizione e parametri incidenti

La capacità, la cui definizione è un problema classico dei trasporti, è una questione di notevole importanza nel settore ferroviario. Sebbene sembra essere un termine auto-esplacativo nel linguaggio comune, in ambito scientifico assume un'accezione complessa che ha numerosi significati e per la quale sono state date numerose definizioni. In un contesto ferroviario, può essere descritto come segue (UIC, 2013):

“La capacità è il numero di treni che possono circolare senza conflitti su un determinato segmento dell'infrastruttura in un determinato periodo di tempo.”

3.1.1 Tipi di capacità

Nel settore ferroviario si può fare una distinzione delle tipologie di capacità come segue (Abril, et al., 2008).

Capacità teorica: è il numero di treni che possono viaggiare su un itinerario, durante un intervallo di tempo specifico, in un contesto rigorosamente perfetto, generato matematicamente, con treni che viaggiano permanentemente e idealmente al minimo intervallo di tempo l'uno dall'altro. È un limite superiore per la capacità della linea. Frequentemente, presuppone che il traffico sia omogeneo, che tutti i treni siano identici e distribuiti uniformemente, e senza interruzioni, durante il giorno. Ignora gli effetti delle variazioni nel traffico e nelle operazioni che si verificano nella realtà. La capacità teorica viene calcolata utilizzando una formula empirica. Per le linee a binario singolo dipende dalla sezione di distanziamento più sfavorevole e cioè quella per la quale, essendo più lunghe le percorrenze per prima è soggetta a saturarsi, o dal minimo distanziamento fra due passaggi per le linee a binario doppio. Trattandosi di condizioni ideali e fortemente semplificate, nella realtà non è possibile eseguire effettivamente il numero di treni che risultano da un tale calcolo matematico.

Capacità pratica: è il limite pratico del volume di traffico "rappresentativo" che può essere spostato su una linea a un livello ragionevole di affidabilità. Il traffico "rappresentativo" riflette il mix effettivo di treni, le priorità, il raggruppamento del traffico, ecc. Se la capacità teorica rappresenta il limite teorico superiore, la capacità pratica rappresenta una misura più realistica. Pertanto, la capacità pratica viene calcolata in base a presupposti

più realistici, che sono correlati al livello di qualità operativa prevista e all'affidabilità del sistema (Figura 3.1). È la capacità che può essere fornita in modo permanente in condizioni operative normali. Di solito è circa il 60-75% della capacità teorica. La *capacità pratica* è la misura più significativa della capacità di un tracciato poiché mette in relazione una specifica combinazione di infrastruttura, traffico e operazioni per massimizzare il volume rispettando allo stesso tempo un livello di servizio prefissato.

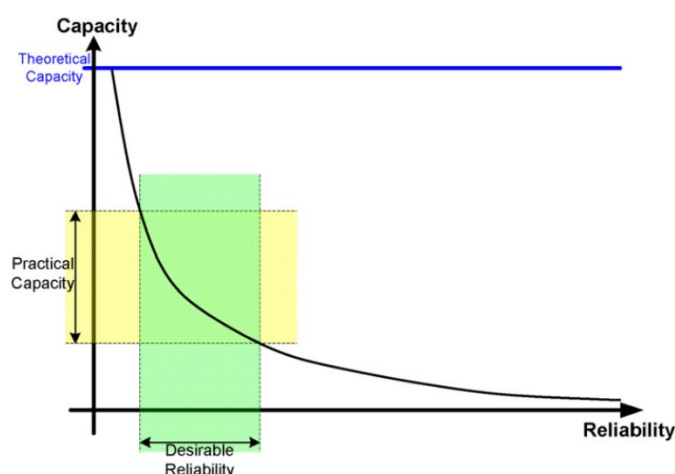


Figura 3.1 Capacità e affidabilità a confronto (Abril, et al., 2008).

Capacità utilizzata: è il volume di traffico effettivo che si configura sulla rete. Riflette il traffico esistente e le operazioni che si verificano sulla linea. Di solito è inferiore alla capacità pratica.

Capacità disponibile: è la differenza tra la capacità utilizzata e la capacità pratica. È un'indicazione del volume di traffico aggiuntivo che potrebbe essere gestito. Se consente di aggiungere nuovi treni, è una capacità utile; in caso contrario, è capacità persa.

3.1.2 Parametri incidenti

Nella tecnica del traffico ferroviario la capacità di una linea e di una stazione sono concetti importanti poiché, tra le altre cose, riassumono in valori numerici l'insieme delle caratteristiche fisiche e dinamiche delle linee e delle stazioni, considerate nel loro insieme di impianti e di mezzi di esercizio (Vicuna G. , 1993).

La capacità dell'infrastruttura ferroviaria non è statica, essa dipende dal modo in cui viene utilizzata (UIC, 2013). Le caratteristiche dei treni, fisiche e meccaniche, incidono

notevolmente sull'utilizzo di capacità, pertanto assume molta importanza il mix di treni impiegati e l'ordine in cui circolano sulla linea. Altrettanto importanti sono i cambiamenti nell'infrastruttura e nelle condizioni operative. In generale quindi, la capacità di una rete ferroviaria dipende:

- da una parte, dalla configurazione plano-altimetrica del tracciato della linea (che condiziona la velocità ammissibile), dalle caratteristiche degli impianti di sicurezza e segnalamento, dalla lunghezza delle sezioni di distanziamento e dalla capacità di ricezione delle stazioni, dal regime di circolazione adottato;
- dall'altra, dalle caratteristiche di potenza e di velocità dei mezzi di trazione oltre che, naturalmente, dal livello di regolarità di marcia dei treni che può essere mantenuto in relazione agli impianti e ai mezzi di cui la linea dispone.

Di seguito si vedranno più in dettaglio alcuni degli aspetti più influenti, mentre per una trattazione completa si rimanda alla letteratura di riferimento (Abril, et al., 2008; Landex, Kaas, & Nielsen, Methods to estimate railway capacity and passenger delays, 2008; KFH Group, 2013).

3.1.2.1 Parametri della circolazione: sistemi di blocco e di segnalamento

La tecnica della circolazione ferroviaria ha per scopo lo studio e la determinazione dei mezzi e delle norme atti a garantire che ciascun convoglio circoli regolarmente sul binario che gli è stato assegnato e non incontri un convoglio fermo o in movimento sullo stesso tratto di linea che ne impedisca la regolare circolazione. A tale scopo si disciplinano: il distanziamento dei treni, le precedenza, gli incroci ed i movimenti dei treni nelle stazioni. Fra queste operazioni, il distanziamento tra due treni è uno dei principali vincoli da rispettare. I sistemi di circolazione attualmente in uso prevedono il distanziamento a intervallo di spazio nel quale la linea ferroviaria risulta suddivisa in sezioni di circolazione, denominate *sezioni di blocco*, perché all'inizio di ciascuna di esse è prevista la possibilità di arrestare il treno. Un treno non può essere immesso in una sezione se essa non è stata liberata completamente dal treno che precede. Le sezioni di blocco, nel sistema a blocco fisso, sono delimitate da segnali di prima categoria che oltre alla funzione di sezionamento della linea, proteggono i punti singolari delle linee come i bivi e le stazioni (segnali

di protezione) e comandano la partenza dei treni dalle stazioni (segnali di partenza). Esistono principalmente due tipi di sistemi di blocco: a blocco fisso e a blocco mobile.

In un sistema a blocco fisso si è in grado di rilevare lo stato di occupazione di una sezione, ma non la posizione effettiva del treno su quella sezione facendo uso della sola tecnologia installata sulla via di corsa⁵². La posizione del treno è dunque determinata con un errore pari all'intera estensione della sezione di blocco e, di conseguenza, la distanza minima tra due treni che si susseguono dipenderà proprio dalla lunghezza delle sezioni di blocco. La circolazione sulle sezioni di blocco è regolamentata dal sistema di segnalamento che può essere più o meno complesso a seconda che le sezioni siano *isolate* o *concatenate* (Figura 3.2 e Figura 3.3).

All'inizio di ogni sezione di blocco è posizionato un segnale di prima categoria che informa riguardo lo stato di occupazione della sezione: segnale di *via impedita* (rosso) indica che la sezione è occupata, segnale di *via libera* (verde) indica che la sezione è invece libera e si può procedere nella marcia. A sua volta il segnale di prima categoria dev'essere preceduto da un segnale di avviso, che per l'appunto avvisi il macchinista che la sezione successiva è occupata e che quindi deve arrestare il treno prima di entrarvi: un segnale di avviso giallo indica che la sezione successiva è occupata (precede dunque un segnale di prima categoria rosso); un segnale di avviso non può mostrare un aspetto rosso che indicherebbe la fermata in sua corrispondenza. La distanza minima tra i segnali di avviso e quelli di prima categoria è per l'appunto la distanza di arresto, mentre lo spazio fra due segnali di prima categoria costituisce la *sezione di blocco*.

Le *lunghezze delle sezioni del blocco*, la *velocità del treno* e le *lunghezze del treno* sono quindi parametri importanti. La capacità di una linea ferroviaria aumenta al diminuire della lunghezza delle sezioni di blocco. A tale scopo si hanno le *sezioni di blocco concatenate*, di lunghezza pari alla distanza di arresto (1200 metri in genere). In questo caso la funzione di avviso può essere svolta dal segnale di prima categoria della sezione

⁵² A partire dagli anni 2000, RFI ha sviluppato il Sistema Controllo Marcia Treno (SCMT), un sistema di sicurezza della marcia dei treni di ausilio al macchinista su linee elettrificate. Esso è composto da: un Sotto Sistema di Terra (SST), con il compito di trasferire a bordo del locomotore, tramite punti informativi (tecnologia a "boe"), le informazioni sull'aspetto del segnale e sulle caratteristiche della linea; un Sotto Sistema di Bordo (SSB), composto da un computer che ha il compito di elaborare le informazioni acquisite dalle boe e dalle operazioni del personale di macchina, e che è in grado di comandare la frenatura di servizio o di urgenza nel caso in cui vengono superati i vincoli di marcia controllati dal sistema. Un componente del Sottosistema di Bordo è il Sistema Odometrico, che, sulla base di informazioni provenienti da appositi sensori, stima la velocità e lo spazio percorso dal treno tra due riferimenti certi.

precedente. Normalmente sulle linee con brevi distanze fra una stazione e l'altra le sezioni sono isolate.

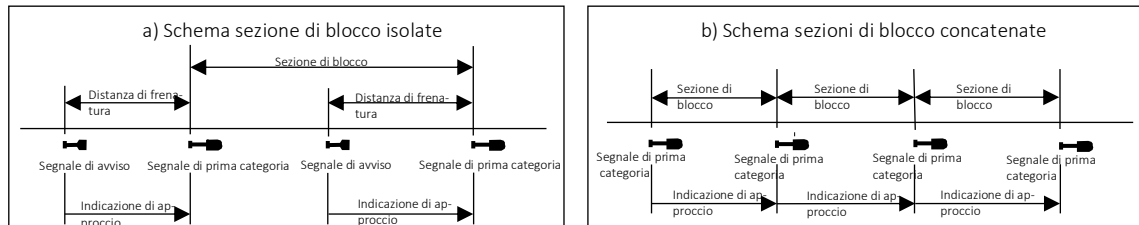


Figura 3.2 Schemi di sezioni di blocco: a) isolate; b) concatenate.

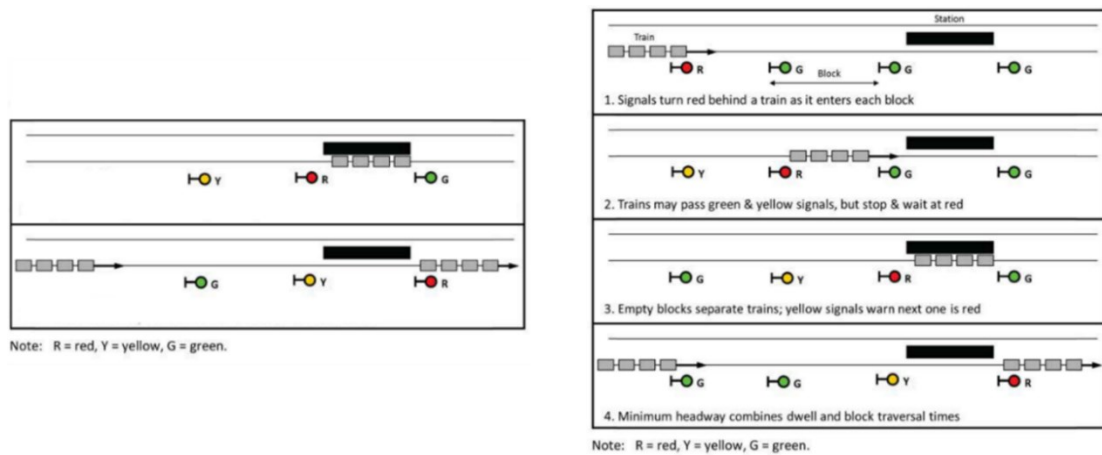


Figura 3.3 Funzionamento del segnalamento di sezioni isolate, a sinistra, e concatenate a destra.

In un sistema di segnalamento a blocco mobile, tecnologia moderna e attualmente utilizzata quasi solo in ambito metropolitano, la posizione di ciascun treno è invece continuamente nota, permettendo così una migliore regolazione delle distanze relative (Figura 3.4). Ciò richiede un efficiente sistema di comunicazione tra segnali di linea, cabine e centri di controllo.

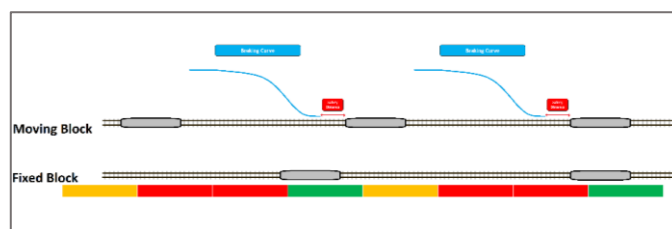


Figura 3.4 Segnalamento a blocco fisso (sotto) e blocco mobile (sopra).

In Europa è andato diffondendo ormai da diversi anni (almeno una decina), su proposta dalla Commissione Europea, lo standard ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System/European Train Control System), da considerarsi tra le più significative innovazioni introdotte nel panorama ferroviario, che consente la circolazione di treni di diversa nazionalità, sulla base di informazioni comuni trasferite grazie ad un linguaggio comune, gestite con sottosistemi interoperabili di terra e di bordo. In particolare, lo standard definisce le modalità di scambio delle informazioni di segnalamento tra gli impianti a terra e i treni, identificando le tecniche di trasmissione da utilizzare e il formato ed il contenuto dei messaggi, di fatto superando in questo modo i vincoli che derivavano dalla diversità tra i sistemi attualmente in uso nei diversi Paesi.

3.1.2.2 Parametri infrastrutturali

Tracciato a semplice/doppio binario. Il doppio binario consente ai treni di incrociarsi o superarsi senza doversi fermare, con significativi effetti sulla capacità della linea se la lunghezza della sezione interessata è di almeno 7 - 12 km (KFH Group, 2013). L'aumento di capacità prodotto non è di semplice computazione, per una linea di circa 100 km si stima che il raddoppio permetta di triplicare il numero delle tracce all'ora per direzione rispetto alla stessa direttrice con singolo binario (KFH Group, 2013). Ad ogni modo è sempre raccomandato studiare preliminarmente l'impatto di interventi di questo tipo in relazione anche ai costi, che per il raddoppio di una linea ferroviaria lunga raggiungono cifre molto elevate. Inoltre, l'aggiunta di un secondo binario potrebbe non eliminare il problema di capacità perché le stazioni ne potrebbero rappresentare il vero collo di bottiglia. I binari ausiliari - di precedenza e/o incrocio - nelle stazioni, nonché la densità di tali stazioni, aumentano la capacità di una linea a binario singolo perché consentono ai treni di effettuare sorpassi ed incroci fra di loro rispettivamente nella stessa direzione di marcia o in senso opposto.

Modulo di lunghezza dei binari. Perché la circolazione sulle linee possa svolgersi con adeguata regolarità, oltre all'esistenza di idonei impianti di segnalamento e sicurezza, si rende indispensabile che tutte le stazioni atte al ricevimento dei treni abbiano binari di lunghezza tale da poter ricevere i treni di normale composizione in circolazione sulla linea. In pratica, infatti, l'esistenza su una linea di stazioni con binari di lunghezza insufficiente impone dei vincoli che possono essere in alternativa: (1) limitazione della composizione dei treni in rapporto alla lunghezza dei binari più corti esistenti sulla linea onde

consentire la possibilità di ricevimento in tutte le stazioni; (2) oppure, in caso di composizione dei treni che ecceda la lunghezza dei binari di alcune stazioni, necessità di dovere escludere tali stazioni dalle operazioni inerenti alla circolazione dei treni più lunghi (incroci e precedenza), con conseguenze negative per l'andamento della circolazione sulla linea e diminuzione della velocità commerciale. Appena l'intensità di circolazione assume un livello apprezzabile si rende quindi necessario uniformare ad un modulo costante la lunghezza dei binari di ricevimento treni di tutte le stazioni di una linea (Vicuna G. , 1993).

Definizione del tracciato e dei percorsi. Nel valutare la capacità della linea, è necessario definire la linea ferroviaria stessa, ossia l'elenco delle stazioni e degli arresti lungo la linea e le loro caratteristiche. La capacità di linea dovrebbe trasformarsi in un problema di capacità di rete non appena saranno disponibili altri percorsi paralleli per fornire lo stesso tipo di servizi. Questo è specificamente il caso del trasporto merci su alcuni dei principali corridoi internazionali. In questo caso, la capacità totale può essere stimata sommando il contributo di linee indipendenti e individuando sezioni di percorso alternative per superare i problemi di collo di bottiglia rilevati sulla linea principale.

Network effects (effetti di rete). Una singola linea non può essere considerata come una parte completamente indipendente dell'intera rete a causa di linee di attraversamento e sovrapposizione, che possono essere veri e propri colli di bottiglia. Oltretutto, quando vengono stilati gli orari di circolazione, essi vengono creati per l'intera rete e non solo per la linea o la sezione di interesse, ciò vuol dire che l'orario dell'area di analisi, e dunque anche la capacità, dipende anche dalla rete fuori dall'area di analisi (Hansen, Landex, & Kaas, 2006).

Stato dell'arte dell'infrastruttura e limiti di velocità. Le condizioni delle rotaie, delle traversine e della massicciata determinano il carico assiale massimo e il tipo di materiale rotabile utilizzabile sulla linea, nonché le velocità consentite. Hanno un'influenza importante sulla capacità. I limiti di velocità sono regolati da profili di velocità, che tengono conto della fisica, della sicurezza, del comfort, dei tipi di treno, ecc.

3.1.2.3 Parametri del traffico ed operativi

Linee nuove o esistenti. La soluzione è generalmente diversa quando si considerano le linee nuove (vale a dire da progettare) o correnti (cioè disponibili). Nel secondo caso, che

è di gran lunga il più comune, sono già stati impostati diversi vincoli e il traffico da ospitare spesso diventa un problema di capacità disponibile, che è più limitato.

Tipologia del traffico. La capacità ferroviaria dipende molto dal mix di traffico. Il caso ideale è quando tutti i treni sono uguali o hanno la stessa velocità. All'aumentare della diversa tipologia di treni, cioè dell'eterogeneità del traffico, vengono generate più interferenze, che richiedono precedenza e incroci, riducendo dunque la capacità. Oltre alla velocità massima, sono importanti anche altre caratteristiche del materiale rotabile come l'accelerazione e la decelerazione.

Orari cadenzati. Un obiettivo specifico della pianificazione della linea e dei treni è la costruzione di orari periodici, il che significa che i servizi ferroviari della stessa classe partono a intervalli fissi. Spesso rappresenta un forte vincolo commerciale per la pianificazione dei treni.

Priorità. Le priorità dei treni svolgono un ruolo fondamentale: riducono la capacità poiché i treni prioritari ricevono un trattamento preferenziale rispetto ai treni a priorità più bassa, il che si traduce in un aumento dei ritardi. Ciò consente al traffico prioritario di muoversi come se fosse l'unico traffico nella rete. Di norma, maggiore è il numero di classi di priorità, minore è la capacità disponibile. Solitamente nelle linee a traffico misto merci e passeggeri, quest'ultimo ha la priorità assoluta.

Interruzioni di linea. Possono essere eventi pianificati (tempi di manutenzione, arresti commerciali, ecc.) ed eventi non pianificati (guasti del treno, rotaie interrotte, ecc.) che mettono fuori servizio una linea. Queste interruzioni influiscono sulla capacità di una linea perché riducono direttamente il numero di ore disponibili in un giorno alla circolazione dei treni.

Orario di fermata del treno. Questo parametro tiene conto del tempo in cui i treni stanno fermi su una linea. È una quantità che aumenta direttamente il tempo che un treno impiega ad attraversare una sezione.

3.1.2.4 Qualità del servizio, affidabilità e robustezza

Poiché le operazioni ferroviarie non sono perfette e durante l'esercizio in linea si possono verificare disturbi casuali e difetti di varia natura nella gestione reale dei treni, che ne riducono la capacità teorica, è necessario tenere conto di alcuni tempi cuscinetto - *buffer time* - allo scopo di progettare un orario robusto. Questo effetto stocastico è spesso difficile da prendere in considerazione nelle valutazioni della capacità di linea. Tuttavia, è

necessario un equilibrio tra affidabilità del servizio e massima capacità fisica per trovare il livello di capacità e servizio ottimale. Il tema della robustezza della circolazione nei sistemi ferroviari, quasi inesplorato prima degli anni 2000, ha visto con l'avvento di più avanzati modelli di calcolo e di simulazione un crescendo di interesse nella comunità accademica. Emerge da (Kaas, 2000) che la capacità di una linea è molto influenzata dalla puntualità dei treni e, viceversa, da (Abril, et al., 2008) i ritardi medi aumentano in modo esponenziale quando il numero di treni supera il livello di saturazione, a scapito dell'affidabilità della rete (Figura 3.5).

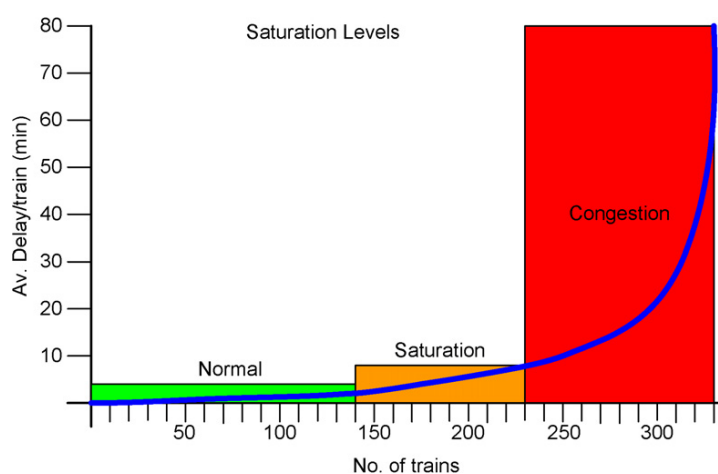


Figura 3.5 Livello di saturazione in base al ritardo medio (Abril, et al., 2008).

Aumentare pertanto il numero di treni oltre un certo livello di saturazione non è redditizio e si ritiene necessario prendere in considerazione e rispettare dei vincoli di *buffer time*, per non incorrere in scarsi livelli di servizio ed eccessiva instabilità della circolazione⁵³. L'importanza di questi tempi cuscinetto è descritta ampiamente dallo studio di (Coviello, Pellegrini, Sobieraj, & Rodriguez, 2017) dal quale emerge, in generale, che le tracce saturanti senza *buffer time* (bt0) sono in numero maggiore, ma presentano una propagazione dei ritardi che sono drammaticamente superiori alle altre tracce. Con un *buffer time* anche solo di 30 secondi si riducono drasticamente i ritardi⁵⁴, mentre il numero delle tracce non

⁵³ Instabilità della circolazione: quando le perturbazioni del traffico si propagano creando un effetto a catena o a frusta, aumento di intensità della perturbazione più ci si discosta dalla fonte.

⁵⁴ Ritardi secondari: ritardi indotti nel sistema a causa di un ritardo primario o a catena di un altro treno nella rete. È trasferito da un treno a, eventualmente, tutti gli altri treni nelle vicinanze. I ritardi primari sono invece una conseguenza di ritardi minori in una stazione, e non il risultato di altri treni che viaggiano sulla stessa linea.

si riduce altrettanto drasticamente, confermando di fatto l'importanza del *buffer time* (Figura 3.6).

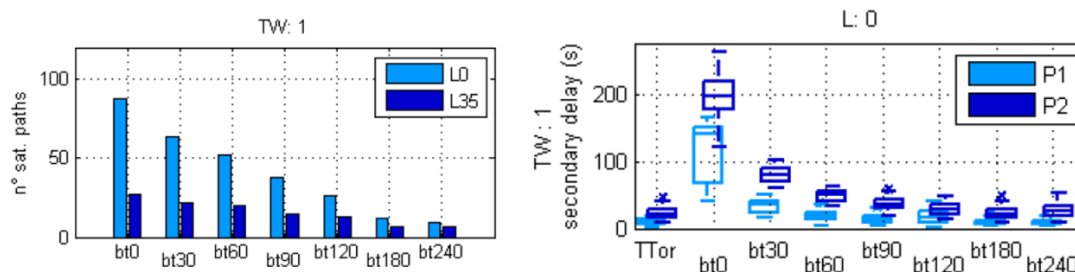


Figura 3.6 Numero di tracce (a sinistra) e ritardi secondari (a destra) in funzione di diversi valori di buffer time in un orario saturato (Coviello, Pellegrini, Sobieraj, & Rodriguez, 2017).

3.2 Metodi di analisi della capacità ferroviaria: stato dell'arte

Nel corso degli anni sono stati sviluppati numerosi approcci per valutare la capacità ferroviaria. La classificazione più comune li raggruppa in: metodi analitici, di ottimizzazione e di simulazione (Abril, et al., 2008). Un'altra classificazione riscontrabile in letteratura, più generale, consiste invece delle seguenti macro-categorie (Kontaxi & Ricci, 2009):

- metodi *sintetici*: usano espressioni di tipo deterministico, matematicamente sono equazioni con incognite tra loro indipendenti; sono definiti anche *statici*;
- metodi *analitici*: usano espressioni di tipo probabilistico; dal punto di vista matematico sono insiemi di equazioni con incognite dipendenti una dall'altra; sono definiti anche *dinamici*;
- metodi *analogici*: si suddividono ulteriormente in metodi asincroni (comprendono i metodi che prevedono l'ottimizzazione di una o più variabili) e metodi sincroni (comprendono i metodi di simulazione della circolazione).

A seguire si darà un'indicazione degli studi di settore e dei riferimenti bibliografici che hanno applicato o esaminato i diversi metodi, rimandando alla loro lettura per le formulazioni ed il funzionamento di ciascuno. La tesi infatti non si propone un'analisi comparata dei diversi metodi, ma si concentra sull'applicazione di una specifica metodologia integrata. Pertanto, questa sezione si prepone come panoramica del campo di studi in cui si inserisce la tesi - delle analisi di capacità ferroviaria - quindi dei principi su cui si basano

i diversi metodi e dell'evoluzione che hanno subito nel tempo. Tutto ciò porta ad una maggiore consapevolezza dell'argomento e permette di avvicinarsi con maggiore confidenza ai più moderni metodi di simulazione e ottimizzazione, che risultano essere l'integrazione e l'evoluzione di differenti principi, metodi e discipline.

3.2.1 Metodi sintetici e analitici

I metodi sintetici e analitici sono modelli molto semplici, prevalentemente impiegati in caso di disponibilità limitata di dati, volti ad analisi preliminari, macroscopiche e/o di scenari strategici (Abril, et al., 2008; Rotoli, Ricci, Navajas Cawood, & Malavasi, 2015).

(Kontaxi & Ricci, 2009) e (Pouryousef, Lautala, & White, 2015) si propongono come “raccolte” dei metodi di analisi della capacità ferroviaria, basati ognuno su più di 50 studi/metodi. Mentre (Pouryousef, Lautala, & White, 2015) propone una rassegna dettagliata dei metodi, (Kontaxi & Ricci, 2009) propone un'analisi comparata di alcuni metodi più rappresentati, applicandoli ad una linea test. (Sacco, Coltro, & Dalla Chiara, 2011) riprende alcuni metodi proposti da (Kontaxi & Ricci, 2009) e offre un loro ulteriore esempio applicato al collegamento ferroviario Torino-Modane. Fra questi si possono trovare i seguenti **metodi sintetici**. Il metodo *FS*, presente in varie formulazioni, delle quali (Kontaxi & Ricci, 2009) fa riferimento alla stessa versione presente in (Vicuna, 1993), una delle prime adottate dalle Ferrovie dello Stato che considera i tempi di percorrenza e i tempi di sosta per sole due classi di treni. Nel 2004 questo metodo viene superato da una nuova espressione (RFI, 2004) adottata da Rete Ferroviaria Italiana (RFI), la quale è basata sulla Fiche UIC 405.1 e consente di calcolare sia la potenzialità teorica, che quella pratica di linea. Quest'ultimo metodo considera valori ricavati secondo un intervallo medio di distanziamento minimo dei treni maggiorato di margini di ampliamento e di tempi supplementari. Si ha infine il metodo di (Canciani, 1991) che tratta la potenzialità di circolazione delle linee ferroviarie a doppio binario con circolazione bitachica⁵⁵ alternante. Questo metodo considera il perditempo di precedenza, rendendo possibile la valutazione (semplificata) della massima capacità consentita anche dagli impianti di linea.

Fra i **metodi analitici** (Kontaxi & Ricci, 2009) riporta ancora, dandone una dimostrazione pratica, il metodo (Bianchi, 1964), la formula DB (Deutsche Bundesbahn, 1979; Vicuna, 1993), il metodo UIC (UIC, 1979; Vicuna, 1993) e il metodo di (Genovesi &

⁵⁵ Considera due sole tipologie di treni.

Ronzino, 2006). Il metodo di Bianchi applica la teoria delle code analizzando la distribuzione degli intervalli fra i treni e dei tempi di servizio. Questo metodo offre un contributo alle relazioni intercorrenti fra le caratteristiche d'impianto e la capacità delle linee a doppio e semplice binario, valutando l'influenza derivante da una circolazione promiscua di treni di diversa importanza, con diritti di priorità degli uni sugli altri in caso di precedenza e d'incrocio. Il metodo DB, messo a punto dalle ferrovie federali tedesche, è basato su funzioni di calcolo di tipo probabilistico dell'intervallo medio di distanziamento fra i treni, considerando soltanto due classi di velocità. Il metodo UIC, riportato in una prima edizione nella Fiche 405R del 1978, determina la capacità di circolazione facendo riferimento alla sezione più critica. Una nuova formulazione UIC (1996) permette di porre in relazione capacità di circolazione e qualità del servizio. Il metodo di (Genovesi & Ronzino, 2006) basandosi su quanto definito da (Corriere, 1982), introduce il perditempo dovuto alle fermate d'orario ed il coefficiente di stabilità su una linea ferroviaria calcolandone la capacità teorica.

In tempi più recenti il già citato metodo UIC 405R, viene ufficialmente sostituito con il metodo della compressione UIC 406 (UIC, 2004) secondo il quale: "il consumo di capacità deve essere analizzato in un tratto di linea attraverso la compressione delle tracce orario dei treni in una finestra di tempo predefinito. Gli effetti di detta compressione non vengono presi in considerazione sulle sezioni di linea adiacenti". Questo è accettabile perché l'analisi deve essere eseguita per la sezione limitante della linea, e nessuna conclusione in merito alla fattibilità del programma di esercizio su tratti di linea vicini dovrebbe essere derivata da quest'analisi (Landex, Kaas, Schittenhelm, & Schneider-Tilli, 2006; Rotoli, Ricci, Navajas Cawood, & Malavasi, 2015). Questo metodo è uno dei più diffusi a livello internazionale ed è particolarmente indicato per valutare la capacità utilizzata e i colli di bottiglia di una linea. Il metodo calcola infatti il grado di utilizzo della capacità di ogni singola sezione: il valore massimo determina il valore di riferimento per tutta la linea (Rotoli, Ricci, Navajas Cawood, & Malavasi, 2015). L'UIC inoltre propone come linee guida alcuni valori soglia di occupazione dell'infrastruttura al fine di garantire una qualità di esercizio soddisfacente. (Landex, Kaas, Schittenhelm, & Schneider-Tilli, 2006) tratta ampiamente questo metodo e offre una guida al suo utilizzo pratico, riportandone anche pregi e difetti. (Rotoli, Ricci, Navajas Cawood, & Malavasi, 2015) svolge invece un'analisi comparativa dei metodi UIC 405R, UIC 406, una versione semplificata dell'UIC 405R e del metodo CUI (metodo dell'Indice di Utilizzo della Capacità). Quest'ultimo metodo calcola il tasso di utilizzo della capacità, valutato come percentuale

del tempo necessario per operare un orario “compresso” o il minimo tecnicamente possibile, rispetto al tempo necessario per operare il programma di esercizio effettivo. Tale procedura è simile al metodo 406 dell’UIC, ma richiede meno dettagli. Il CUI può essere applicato fra due stazioni senza fare appello all’occupazione delle sezioni di blocco, ma semplicemente imponendo dei distanziamenti minimi standard (Rotoli, Ricci, Navajas Cawood, & Malavasi, 2015). Nel 2013 il metodo UIC 406 viene ulteriormente aggiornato a UIC 406R (UIC, 2013) apportandone alcuni significativi miglioramenti. In particolare, a differenza della prima versione, per la valutazione dei servizi a lunga distanza raccomanda di prendere in considerazione interi percorsi senza scomporre la rete. Costituendo un punto di riferimento del settore, il metodo UIC, può comunque essere esteso e riadattato a seconda delle esigenze dei casi di studio. Ad esempio, (Goverde, Corman, & D’Ariano, 2013) estendono il metodo per applicarlo a studi focalizzati più sulla robustezza dell’orario d’esercizio. O ancora, poiché la capacità dipende dall’ordine e quindi dal mix di treni, per tenerne conto (Lai, Liu, & Lin, 2015) estendono il metodo della compressione e utilizzano un’unità standardizzata per indicare gli equivalenti dei treni di base (BTE) e le unità di base dei treni (BTU).

I metodi analitici per il calcolo della capacità delle linee ferroviarie possono essere un buon inizio per identificare i colli di bottiglia e i principali vincoli; tuttavia, i risultati analitici variano da un metodo all’altro a seconda del tipo di parametri che modellano e sono molto sensibili alle variazioni di input dei parametri (Abril, et al., 2008). Sebbene i risultati di questi modelli siano significativi, vanno trattati e interpretati con attenzione, ricorrendo ad approcci più esaustivi se necessario, a seconda della portata dell’analisi o qualora dati più dettagliati siano disponibili.

3.2.2 Metodi di ottimizzazione

I metodi di ottimizzazione sono progettati per fornire metodi più strategici per risolvere il problema della capacità ferroviaria e fornire soluzioni migliori rispetto alle formule puramente analitiche. Questi metodi consistono fondamentalmente nella risoluzione del cosiddetto *Train Timetabling Problem* TTP (Hansen & Pachl, 2014) o, in italiano, “problema dell’orario di esercizio dei treni” nel campo della Ricerca Operativa. Problemi che hanno per obiettivo creare un orario fattibile e possibilmente ottimale rispetto ad una specifica rete e alle esigenze del caso in esame. Questi orari ottimali sono solitamente ottenuti utilizzando tecniche di programmazione matematica, come i modelli di programmazione

lineare misto intera e algoritmi enumerativi (Abril, et al., 2008). Un particolare metodo di ottimizzazione è la saturazione dell'orario; metodo che consente di ottenere la capacità della linea programmando un numero massimo di servizi ferroviari aggiuntivi in un orario a partire da un orario vuoto o da un orario di base iniziale.

(Kontaxi & Ricci, 2009) riporta alcuni dei primi metodi analogici di ottimizzazione, applicandoli come prima ad una linea test. Il metodo di (Petersen E. , 1974), per le linee a singolo binario, ipotizza una distribuzione uniforme delle partenze dei treni e tre diverse classi di velocità. Il metodo di (Cascetta & Nuzzolo, 1980), determina la capacità pratica di una linea con l'introduzione del calcolo dei ritardi e dell'effettiva disponibilità di binari d'incrocio e precedenza. Il metodo di (Corriere, 1982), introduce la variabile di comportamento dei convogli riguardo alla velocità programmata, la propagazione dei ritardi e la circolazione eterotachica, fornendo così un contributo fondamentale al calcolo della capacità pratica. Il metodo di (Reitani & Malaspina, 1995) tratta le linee a doppio binario introducendo parametri come la composizione del traffico, il grado di priorità nella circolazione e l'entità e incidenza dei ritardi. Infine, il metodo di (Delfino & Galaverna, 2003) quantifica l'incremento di potenzialità conseguibile, su linee a traffico misto, con l'introduzione del blocco mobile.

Un riferimento più recente è (Burdett & Kozan, 2006) che utilizza un modello di ottimizzazione non lineare per ottenere una capacità teorica/assoluta per le linee e le reti ferroviarie. Questi approcci tengono conto di numerosi aspetti ferroviari, ad esempio: combinazione di treni, posizione dei segnali, oppure tempi di permanenza. Si basano inoltre sulle proporzioni dei treni per pesare il tempo di percorrenza medio delle sezioni, fattore chiave nella determinazione dei limiti inferiore e superiore della capacità sulla sezione critica. Altri metodi (assoluti) di determinazione della capacità includono gli approcci di ottimizzazione di (De Kort, Heidergott, & Ayhan, 2003) e (Mussone & Calvo, 2013). Tuttavia, nessuno di questi metodi è in grado di gestire un'analisi integrata delle reti, considerando tutti i parametri rilevanti allo stesso tempo (Jensen, Landex, Nielsen, Kroon, & Schmidt, 2017).

Per andare più nello specifico nella trattazione di questi metodi ci si dovrebbe inoltrare nel campo della Ricerca Operativa e degli algoritmi di ottimizzazione, quindi della teoria dei grafi, dei modelli di programmazione lineare misto intera, e degli algoritmi euristici e meta-euristici (algoritmi di tipo evolutivo o a sciami di particelle). Temi che non rientrano prettamente nell'ambito della tesi, perciò per un loro approfondimento si rimanda la lettura a (Abril, et al., 2008) e (Hansen & Pachl, 2014) ed alla letteratura ad essi

correlata. Invece per un *focus* sui metodi di saturazione dell'orario ferroviario si rimanda a (Coviello, Pellegrini, Sobieraj, & Rodriguez, 2017). Questi metodi si differenziano fra di loro principalmente per l'algoritmo su cui si basano (ognuno caratterizzato da *funzioni obiettivo* e *vincoli* propri) e per la modalità prevista di modellizzazione dell'infrastruttura, fattori che determinano l'efficacia, la robustezza, e l'efficienza del modello e della soluzione.

3.2.3 Metodi di simulazione

“Una simulazione è l'imitazione di un'operazione, un processo o un sistema del mondo reale nel tempo. È la rappresentazione del comportamento dinamico di un sistema spostandolo da stato a stato secondo regole ben definite” (Abril, et al., 2008). I metodi di simulazione forniscono un modello, il più vicino possibile alla realtà, per valutare le prestazioni della rete ferroviaria. I dati necessari per la simulazione sono simili ai metodi analitici, ma in genere ad un livello più elevato di dettaglio.

Uno dei primi studi di simulazione delle linee è stato condotto da (Petersen & Taylor, 1982) discretizzando un dato corridoio ferroviario in diversi segmenti di binario in corrispondenza degli scambi. Successivamente (Kaas, 1991) sviluppa un altro modello di simulazione, denominato SCAN (Strategic Capacity Analysis for Network), adatto alla pianificazione strategica. Si tratta di un modello di simulazione stocastica (Monte Carlo) che pianifica i treni in ordine casuale utilizzando un approccio di simulazione sincrona⁵⁶ in ogni iterazione.

Oggi, i metodi di simulazione utilizzano strumenti informatici per gestire calcoli sofisticati e modelli stocastici in modo più rapido ed efficiente. Gli approcci di simulazione utilizzano generalmente software commerciali specificamente progettati per il trasporto ferroviario, come RTC (utilizzato in Nord America) (Sogin, Dick, Lai, & Barkan, 2013), MultiRail, RAILSIM, OpenTrack (Nash & Huerlimann, 2004), RailSys (Bendfeldt, Moh, & Muller, 2000) e CMS (Sameni, Dingler, Preston, & Barkan, 2011; Abril, et al., 2008). (Barber, et al., 2007; Pouryousef, Lautala, & White, 2015) forniscono ulteriori informazioni su questi sistemi e altri ambienti di simulazione disponibili. Esistono anche software non commerciali che possono richiedere all'utente di sviluppare modelli, equazioni e vincoli passo dopo passo (spesso manualmente). Questo richiede più esperienza, creatività e

⁵⁶ Nella simulazione sincrona, l'orario di esercizio dei treni viene seguito in sequenza come in tempo reale, in linea con l'esercizio reale.

impegno, ma può anche offrire una maggiore flessibilità e personalizzazione dei risultati e degli output. Gli strumenti di simulazione ferroviaria commerciale sono più user-friendly, ma i modelli e i processi decisionali costituenti non sono facilmente personalizzabili o revisionabili, il che può ridurre la flessibilità di applicazione di questi strumenti (Pouryousef, Lautala, & White, 2015). I metodi di simulazione sono adoperati negli studi di capacità perché simulando la circolazione dei treni sulle linee e negli impianti restituiscono l'utilizzazione dell'infrastruttura, quindi la capacità consumata e quella residua. Inoltre, integrati con metodi di ottimizzazione, i software di simulazione permettono di generare orari d'esercizio saturi, determinando così la capacità massima di una rete ferroviaria.

Il libro "Railway timetabling & operations" (Hansen & Pachl, 2014) contiene diversi articoli e sezioni, derivati da molteplici studi ferroviari di università e centri accademici (prevalentemente europei). Il libro è una risorsa quasi omnicomprensiva degli argomenti attinenti al problema della programmazione dell'orario ferroviario, quindi dei principi su cui si basano i metodi di analisi della capacità - analitici, di ottimizzazione e simulativi - e in generale dei metodi di analisi e programmazione dell'orario.

I metodi di simulazione stanno prendendo sempre più piede nelle amministrazioni nazionali di gestione dell'infrastruttura ferroviaria conseguentemente alle nuove politiche di settore; sia a livello europeo (Abril, et al., 2008; Hansen & Pachl, 2014; Jensen, Landex, Nielsen, Kroon, & Schmidt, 2017) che del nord America (Pouryousef, Lautala, & White, 2015). Incoraggiando il libero accesso alle reti ferroviarie ed il generale trasferimento modale verso la ferrovia, queste politiche conducono ad un notevole incremento della domanda di capacità sulle linee e nei nodi. I software di simulazione, molto più efficaci ed efficienti dei metodi analitici, offrono pertanto un aiuto sostanziale ai gestori delle ferrovie ad effettuare studi di capacità per ottimizzare gli orari e valutare la capacità delle linee e dei nodi in modo da soddisfare la domanda. La potenzialità dei metodi simulativi deriva dall'elevato grado di dettaglio nella modellizzazione del sistema. Questo permette di considerare tutti i parametri significativi che caratterizzano l'esercizio ferroviario, ma allo stesso tempo richiede una grande quantità di dati, molto dettagliati e un impegnativo e lungo lavoro per la costruzione del modello. È fondamentale pertanto la stretta collaborazione fra ricercatori/prestatore d'opera e gestori dell'infrastruttura ferroviaria/committente per avere un riscontro reale dei risultati e raggiungere efficacemente gli obiettivi di uno studio di questo genere.

3.2.4 Capacità dei nodi ferroviari

Poiché la tesi verte sullo studio di capacità di un nodo ferroviario, composto dal fascio di presa/consegna di Novara Boschetto e dagli impianti dedicati al traffico merci ad esso afferenti, si ritiene opportuno fare una breve parentesi sui metodi di analisi della capacità specifici delle stazioni, intese come impianti, stazioni passeggeri, stazioni di servizio, nodi della rete, fasci di presa/consegna, ecc.

Da quanto riportato finora, in merito ai metodi generali di analisi della capacità ferroviaria, si nota un certo squilibrio tra l'attenzione dedicata alle linee e alle stazioni. Mentre la grande maggioranza dei metodi di analisi della capacità nascono specificatamente per le linee, o si concentrano su di esse; le stazioni risultano essere oggetto di minore interesse di studio. Studiare la capacità delle stazioni risulta comunque importante, sia perché spesso rappresentano i principali colli di bottiglia della rete (Hansen I. , 2000; Abril, et al., 2008; Landex & Jensen, Measures for track complexity and robustness of operation at stations, 2013) sia perché, per un'analisi consistente della capacità di una rete, è indispensabile considerare in modo integrato fra loro tutte le parti che compongono il sistema: linee, stazioni, nodi, terminal logistici, ecc. (UIC, 2013). In genere la capacità delle stazioni è determinata estendendo i metodi utilizzati per le linee. Le stazioni più grandi però presentano un grado di complessità maggiore a causa della reciproca interdipendenza di diversi fattori inerenti alle caratteristiche degli impianti (Vicuna, 1993): numero e dislocazione dei binari, dispositivo di piazzale, connesse possibilità di disimpegno reciproco fra i diversi settori e di movimenti contemporanei di treni e manovre su itinerari compatibili, possibilità offerte dagli impianti di sicurezza, ecc. Per tale ragione le stazioni più complesse richiedono uno studio di capacità separato, con metodi specifici.

(Malavasi & Ricci, Carrying capacity of railway networks: interaction of line and node models, 2000) studia la capacità delle reti ferroviarie, in particolare quella metropolitana di Roma, e l'interazione tra i modelli di analisi delle linee e delle stazioni. Per quanto riguarda queste ultime, ne indaga la capacità per mezzo di modelli sintetici basati sulle possibili combinazioni di percorsi compatibili dei treni (numero di percorsi idonei alla percorrenza contemporanea). (Hansen I. , 2000) descrive e applica diversi approcci analitici attraverso la teoria delle code e l'algebra max-plus per determinare la capacità e la stabilità delle operazioni nelle stazioni ferroviarie. Per quanto riguarda la valutazione della capacità questi metodi (teoria delle code e metodo max-plus) portano a risultati simili; differiscono invece nella stabilità dell'orario. (Hansen I. , 2000) conclude che

analizzando le stazioni con i metodi analitici, è necessario che questi siano supportati da ricerche empiriche più complete, sulla base di dati reali dei treni, e di essere convalidati attraverso la simulazione realistica della circolazione dei treni nelle stazioni. (Yuan & Hansen, 2004) presenta un approccio analitico per il calcolo dell'utilizzo della capacità della stazione olandese The Hague HS. Il metodo esegue una scomposizione delle aree deviatoi in sottosezioni più piccole, *route nodes* (simili ai circuiti di binario), la cui occupazione viene riservata e rilevata nel momento in cui viene creato l'itinerario di un treno che ne prevede l'attraversamento, evitando possibili percorsi contrastanti fra itinerari di diversi treni. (Burdett & Kozan, 2006) estende ed integra (funzione obiettivo e vincoli) anche per le stazioni il metodo di ottimizzazione visto sopra, utilizzato per le linee. (Landex & Jensen, Measures for track complexity and robustness of operation at stations, 2013) presenta cinque metodi per descrivere e analizzare la capacità delle stazioni, metodi prevalentemente analitici e di ottimizzazione. Il primo metodo, un'estensione del metodo UIC 406, può essere utilizzato per stazioni non troppo complesse; mentre gli altri sono indicati anche per stazioni più articolate. Il secondo metodo esamina la possibilità di avere molteplici binari di stazione e la probabilità che i treni in arrivo possano, o no, essere accolti su un determinato binario. Il terzo metodo analizza i conflitti e la complessità dell'infrastruttura nelle aree deviatoi. Il quarto metodo si concentra maggiormente invece sugli orari, e sulla loro complessità e robustezza. L'ultimo metodo cerca di offrire un'analisi integrata dell'utilizzo ottimale dei binari di stazione e dei modelli di arrivo/partenza dei treni. Questi metodi, seppure molto validi per l'analisi di una stazione, risultano disgiuntivi, nel senso che analizzano separatamente le complessità dei diversi elementi della stazione. (Han, Yue, & Zhou, 2014) introduce un metodo di simulazione microscopica per analizzare e valutare la capacità delle stazioni ferroviarie, ottimizzando la circolazione nelle aree deviatoi. (Malavasi, Molková, Ricci, & Rotoli, 2014) analizza e applica tre metodi per la valutazione della capacità di un nodo ferroviario complesso: il metodo Potthoff (Potthoff, 1960), il metodo probabilistico Corazza e Musso (Corazza & Musso, 1991) ed il metodo Deutsche Bahn DB (Deutsche Bundesbahn, 1979). I metodi Potthoff e DB si basano su una concatenazione probabilistica delle tracce ferroviarie, mentre Corazza e Musso derivano i parametri di capacità dagli insiemi di percorsi compatibili di una stazione. Anche se questi metodi sono piuttosto datati, i principi e i concetti su cui si basano sono ancora ampiamente validi; (UIC, 2013) propone infatti un metodo pratico di valutazione della capacità dei nodi basato sul metodo tedesco DB.

Con l'avvento dei più recenti metodi numerici di ottimizzazione e microsimulazione la principale difficoltà nello studio delle stazioni è data dalla selezione efficiente, fra tutti i possibili instradamenti nelle aree deviatori, quelli ottimi. Un problema risolvibile con la teoria dei grafi (Hansen & Pachl, 2014), scomponendo l'infrastruttura in archi e nodi, e applicando gli algoritmi di risoluzione più adatti al caso. Si tratta quindi di un problema che interessa prettamente la *Ricerca Operativa* e la *Programmazione informatica*, poiché la complessità del problema aumenta esponenzialmente con le dimensioni del nodo, di conseguenza anche i tempi di risoluzione dell'algoritmo. Pertanto, spesso si ricerca un compromesso tra la complessità computazionale - tempi di risoluzione dell'algoritmo - e gli *ottimi* del problema. Nei programmi di simulazione e ottimizzazione che implementano algoritmi robusti, efficaci ed efficienti di “selezione dei percorsi ottimali”, la complessità imposta dalle stazioni è intrinsecamente risolta, indifferentemente che si tratti di linee o stazioni.

Possiamo concludere questa sezione dedicata allo “stato dell'arte” dei metodi di analisi della capacità ferroviaria osservando che i metodi analitici possono essere un buon inizio per i metodi di ottimizzazione, mentre i metodi di ottimizzazione e di simulazione possono essere adattati ad ogni ambiente applicativo. I tre livelli rappresentano una metodologia generale per la valutazione delle capacità (Abril, et al., 2008; Pouryousef, Lautala, & White, 2015), dove il primo livello rappresenta una soluzione preliminare e il secondo livello ottiene un orario dei treni che viene convalidato per mezzo di una simulazione, il terzo livello. Pertanto, la tendenza attuale è quella di sviluppare strumenti con una metodologia integrata che incorpora approcci analitici, di ottimizzazione e di simulazione. La metodologia applicata per l'analisi di capacità del caso di studio della tesi rientra proprio fra questi. Pertanto, nel capitolo a seguire verranno descritti più in dettaglio i principi generali su cui si basa, mentre nel Capitolo 4 verranno date delle indicazioni più specifiche al caso di studio.

3.3 Calcolo della capacità

Il calcolo della capacità ha l'obiettivo di determinare il numero massimo di treni che sarebbero in grado di operare su una determinata infrastruttura ferroviaria, durante un intervallo di tempo specifico, date le condizioni operative (Abril, et al., 2008). Seguendo

questa definizione, all'atto pratico, il calcolo si tradurrebbe nella pianificazione di un orario d'esercizio ferroviario saturo che offre un certo livello di servizio.

L'orario ferroviario è il programma di circolazione dei treni in una determinata finestra oraria (solitamente giornaliera). Esso può essere redatto in forma grafica o tabellare. Le funzioni di un orario ferroviario sono (Hansen & Pachl, 2014):

- coordinare le tracce ferroviarie nel processo di pianificazione per un utilizzo ottimale dell'infrastruttura;
- garantire la prevedibilità del traffico ferroviario;
- produrre dati sugli orari per le comunicazioni con gli utenti;
- gestire il controllo del traffico, l'uso delle locomotive e del materiale rotabile, e la programmazione dell'equipaggio.

Il primo punto conduce alla concreta determinazione della capacità della rete. Si può dunque osservare che le funzioni dell'orario non sono connesse rigorosamente con la sua esecuzione. Tra l'altro, per le reti ferroviarie sulle quali è stato liberalizzato l'accesso, la definizione dell'orario non è solo una procedura di pianificazione, ma è l'*interfaccia commerciale* tra i gestori dell'infrastruttura e le società operative dei treni. In questo scenario le tracce programmabili sono il prodotto venduto dalle società di gestione dell'infrastruttura a quelle di gestione dei treni (operatori ferroviari). Assegnare una traccia oraria ad un operatore significa vendere il diritto di effettuare un treno su quel percorso in condizioni operative specificate.

Il calcolo della capacità può pertanto essere visto come:

- i. creazione di un orario d'esercizio base;
- ii. ottimizzazione e saturazione dell'orario.

La prima parte fa riferimento a temi classici della tecnica ferroviaria ed è subordinata a vincoli tipici del settore, come l'infrastruttura, i sistemi di alimentazione, di segnalamento e di sicurezza, nonché del materiale rotabile. La seconda parte, che eredita i vincoli della prima, è legata più all'ambito della Ricerca Operativa ed è vincolata, in più, dalla complessità computazionale.

Così scomposto il problema, i primi passi per il calcolo della capacità sono: costruire lo schema infrastrutturale e l'orario di esercizio della linea, quindi saturare. Di seguito si percorreranno queste tappe, estrapolando da (Vicuna G. , 1993) concetti legati ai temi più classici della tecnica ferroviaria e da (Hansen & Pachl, 2014) quelli più moderni legati

all'orario e alla sua ottimizzazione. Si è fatto riferimento, tra l'altro, anche alla (UIC, 2013) e a (Malavasi & Ricci, 2000).

Infine, un approccio di questo genere è tipico dei metodi di simulazione impiegati per il calcolo di capacità delle reti ferroviarie.

3.3.1 Calcolo dell'orario ferroviario

3.3.1.1 Stima e modellizzazione dei tempi di percorrenza: la traccia oraria

Nell'ambito della programmazione dell'orario di circolazione, il tempo di percorrenza di un treno può essere scomposto nelle seguenti componenti (Hansen & Pachl, 2014):

- tempo di percorrenza puro dello spazio tra ciascuna coppia di fermate programmate consecutive;
- tempo di sosta programmato alle fermate;
- tempo di recupero;
- tempo di attesa pianificato.

La prima componente, il tempo di percorrenza fra le fermate, su cui non incidono altri fattori di tempo se non quelli strettamente legati al moto del materiale rotabile sull'infrastruttura, è il tempo di marcia più breve possibile, risultato dal calcolo del tempo di percorrenza di un tracciato. Per consentire a un treno di recuperare piccoli ritardi, è necessario invece aggiungere il tempo di recupero. Si distinguono due tipi di tempi di recupero (Hansen & Pachl, 2014):

- tempo di recupero *regolare*;
- tempo di recupero *speciale*.

Il *tempo di recupero regolare* viene aggiunto a ogni tracciato come percentuale del tempo di percorrenza puro della tratta, sulle ferrovie europee solitamente viene aggiunto un supplemento del 3% - 7%. Su alcune ferrovie, il *tempo di recupero regolare* è uniformemente distribuito sul tracciato del treno, mentre altre ferrovie preferiscono concentrare i tempi di recupero alla fine della corsa e ai grandi terminal intermedi (Figura 3.7). Talvolta, ai terminali di grandi dimensioni, il tempo di recupero non viene aggiunto al tempo di

marcia nella fase di approccio al terminale, ma al tempo di sosta al suo interno. Il *tempo di recupero speciale* viene invece utilizzato per compensare l'influenza di lavori di manutenzione, di costruzione sulla linea o di sezioni che si trovano in cattive condizioni. Diversamente dal normale tempo di recupero, non viene aggiunto come percentuale del tempo di percorrenza, ma come supplemento fisso nella sezione interessata. Il *tempo di attesa programmato* viene aggiunto per motivi di pianificazione, ad esempio sincronizzare gli orari delle diverse linee passeggeri ai punti di trasbordo, sincronizzare gli orari con un calendario ciclico, o attendere per una precedenza o un incrocio. I *tempi di attesa programmati* sono spesso aggiunti al tempo di sosta nelle fermate, o alle volte anche al tempo di percorrenza lungo il tracciato.

Così definite le componenti del tempo di percorrenza di un tratto della linea, esse possono essere rappresentate in un grafico orario, in cui il treno in movimento costituisce la cosiddetta **traccia oraria**. La traccia oraria si sviluppa dalla stazione origine della corsa fino alla stazione di destinazione e può essere suddivisa in porzioni minori, chiamate **tratte**. Ciascuna tratta può essere formata a sua volta da più sezioni di blocco. Le tracce orarie vengono rappresentate da tradizione negli orari grafici, normali diagrammi cartesiani in cui gli intervalli di tempo vengono riportati in ascisse e gli intervalli di spazio (sezioni di linea) in ordinate⁵⁷. I treni vengono rappresentati con linee oblique (tracce orarie) ascendenti e discendenti, a seconda del verso di percorrenza della linea. La griglia orizzontale viene fatta in corrispondenza delle stazioni e dei posti di linea che delimitano le sezioni di distanziamento (posti di movimento, posti di blocco, ecc.). La griglia verticale viene fatta in corrispondenza delle unità di tempo utilizzate. Da ciò deriva che le tracce dei treni per le linee a semplice binario si possono incontrare solo in corrispondenza delle righe orizzontali che rappresentano le stazioni o i posti di movimento atti al ricevimento treni. L'inclinazione del tracciato di un treno è invece rappresentativa della sua velocità: un treno più veloce risulta sul grafico meno inclinato di uno lento (Vicuna G. , 1993).

⁵⁷ Alcuni Paesi potrebbero avere in ascisse gli intervalli di spazio e in ordinate i tempi.

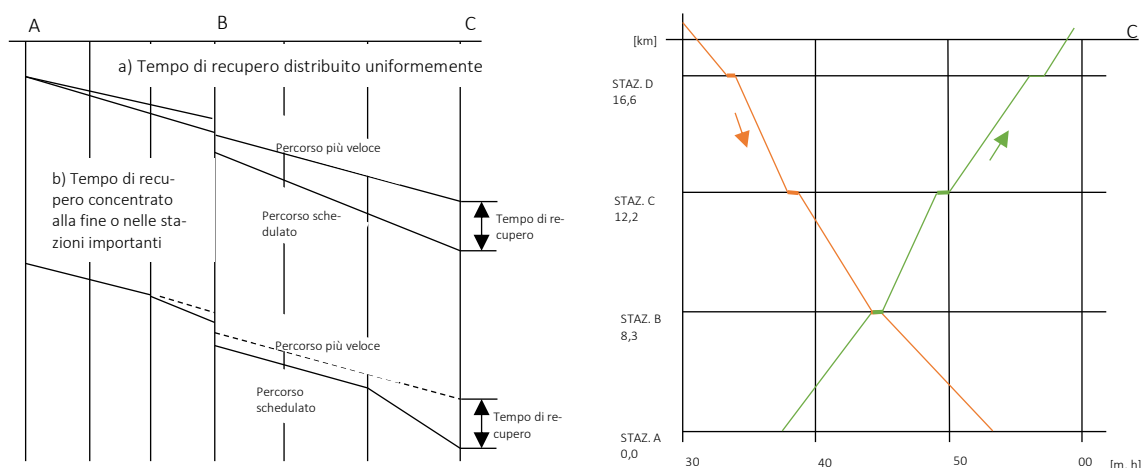


Figura 3.7 Tempi di recupero, a sinistra, e rappresentazione dell'orario grafico a destra.

3.3.1.2 Modellizzazione delle tracce orarie: distanziamento fra due treni

La traccia oraria di un treno descrive l'utilizzo dell'infrastruttura: l'occupazione della linea ferroviaria nello spazio e nel tempo. Quando si considerano però due o più tracce, poiché requisito fondamentale dell'orario è che non ci siano conflitti⁵⁸ tra le corse, non è più sufficiente fare riferimento all'occupazione semplicemente in termini di percorrenza. Bisogna considerare per quanto tempo dev'essere riservata l'infrastruttura al passaggio di un solo treno ai fini di una circolazione in tutta sicurezza. Nella pratica questo viene fatto prevedendo dei tempi aggiuntivi nell'intorno della traccia, graficamente rappresentati da "blocchi rettangolari". L'estensione di tali rettangoli deriva dai sistemi di blocco e di segnalamento già esposti in precedenza (3.1.2.1) e sono determinati dalla distanza da rispettare fra un treno e l'altro per una circolazione a norma e priva di conflitti. Questa distanza è formata da diverse componenti che possono essere viste in termini di spazio o di tempo, potendo passare da una grandezza all'altra note le caratteristiche di moto del treno. Riprendendo i concetti del capitolo (3.1.2.1), una *sezione di blocco* è definita come il tratto compreso tra due segnali di prima categoria nella stessa direzione di marcia. Dunque, affinché un treno possa impegnare una sezione di blocco, dev'essere autorizzato da

⁵⁸ Si ha un conflitto ogni qualvolta non vengono rispettate le norme della circolazione ferroviaria. Norme relative al distanziamento tra i treni, atte a garantire che ciascun convoglio circoli regolarmente sul binario che gli è stato assegnato e non incontri un convoglio fermo o in movimento sullo stesso tratto di linea che ne impedisca la regolare circolazione.

un segnale che dia il via libera. Le condizioni strettamente necessarie perché questo si verifichi sono:

- la sezione di blocco che segue deve essere libera (**lunghezza sezione**);
- il convoglio che segue deve essere completamente fuori dalla sezione di blocco interessata (**lunghezza treno**) e se previsto deve aver superato una determinata distanza (alcune decine di metri) da quest'ultimo (**lunghezza di overlap**);

Tali condizioni determinano parte delle componenti del distanziamento tra due treni consecutivi o in alternativa il tempo di occupazione di una sezione di blocco da parte di un treno (Figura 3.8). Tempo durante il quale la sezione viene bloccata o riservata dal corrispettivo treno e non può essere occupata da un altro. D'ora in avanti quando si parlerà di occupazione della sezione di blocco o della linea si intenderà questo concetto.

Si aggiungono a queste componenti di distanziamento:

- tempo per la formazione dell'itinerario: tempo necessario alla tecnologia di
- segnalamento per ricevere ed elaborare le informazioni ed infine cambiare l'aspetto del segnale di avviso;
- **tempo per l'avvistamento del segnale**: tempo necessario al personale di macchina per avvistare il segnale a terra e compiere la conseguente azione;
- **tempo di approccio**: tempo necessario al treno per percorrere la sezione di approccio (lo spazio tra il segnale di avviso e quello di protezione o tra due segnali di protezione consecutivi qualora non siano previsti segnali di avviso);
- **tempo per il rilascio dell'itinerario**: tempo necessario alla tecnologia di segnalamento per ricevere ed elaborare le informazioni ed infine cambiare l'aspetto del segnale di protezione.

Disegnando l'occupazione di tutte le sezioni di blocco che un treno occupa in un diagramma spazio-tempo (orario grafico) si costruisce una "scala a gradoni" (*staircases*) di occupazione dell'intera linea (Figura 3.9). Questa rappresenta l'uso operativo di una linea da parte di un treno e grazie ad essa è possibile determinare il distanziamento minimo tra due treni su tutta la linea. L'occupazione delle sezioni di blocco determina direttamente la distanza che deve sussistere fra due treni consecutivi poiché, per non avere conflitti su uno stesso percorso, la loro occupazione non si deve sovrapporre. Questa distanza rappresenta il minimo intervallo di tempo fra due treni, e può essere relativa ad una sola

sezione di blocco o all'intera linea. Nel primo caso si considerano i tempi di occupazione della sola sezione, mentre nel secondo caso bisogna considerare i "blocchi" di occupazione dell'intera linea e prendere il minimo intervallo in modo che nessuno si sovrapponga. In questo caso le "scale" di occupazione della linea di due treni successivi si toccherebbero senza alcuna tolleranza in almeno una sezione di blocco (la "sezione blocco critica"). Sebbene la Figura 3.9 mostri che i treni si susseguono nella stessa direzione, gli stessi ragionamenti possono essere fatti per tracce in direzioni opposte.

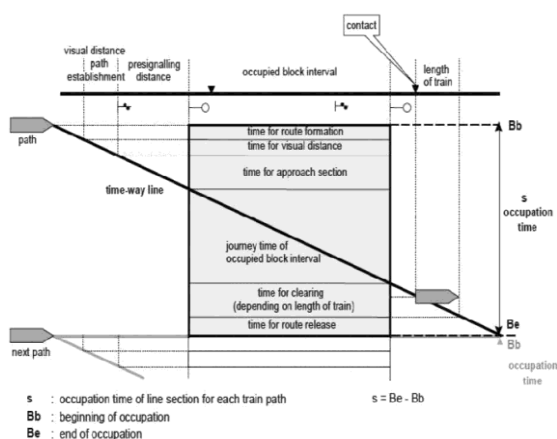


Figura 3.8 Occupazione delle sezioni di blocco (UIC, 2013).

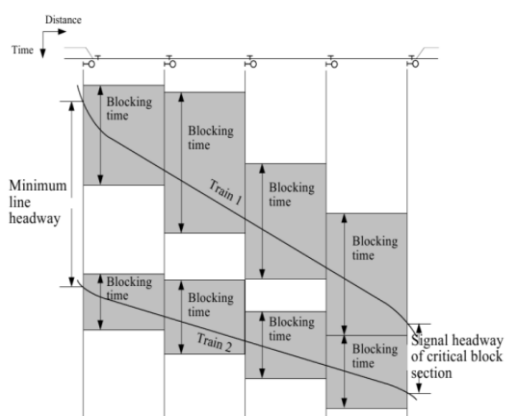


Figura 3.9 Occupazione della linea, *staircases*.

Praticamente, per calcolare il distanziamento minimo fra due treni su tutta la linea, si avvicinano le tracce fino a farle coincidere in uno dei due punti estremi della linea (a seconda della velocità e della direzione di marcia dei treni). L'occupazione delle sezioni di blocco si sovrapporranno allora in almeno una sezione. Ciascuna sovrapposizione equivale al tempo di cui il percorso del secondo treno dev'essere posticipato per eliminare il conflitto nella corrispettiva sezione (Figura 3.10). Quando ci sono delle sovrapposizioni per più sezioni di blocco, il valore massimo dà il tempo di cui il secondo treno dev'essere posticipato per eliminare tutti i conflitti. Questo è la minima distanza tra i due treni considerata tutta la linea.

Operativamente la sovrapposizione è data da:

$$\text{sovrapposizione} = t_{f,1(k)} - t_{i,2(k)}$$

$t_{f,1}$ = tempo di fine occupazione della sezione di blocco k del primo treno

$t_{i,2}$ = tempo di inizio occupazione della sezione di blocco del secondo treno

Mentre il minimo distanziamento sulla linea tra i due treni:

$$\Delta t_{min,1-2} = \max(t_{f,1(k)} - t_{i,2(k)})$$

per $k = 1, \dots, n$

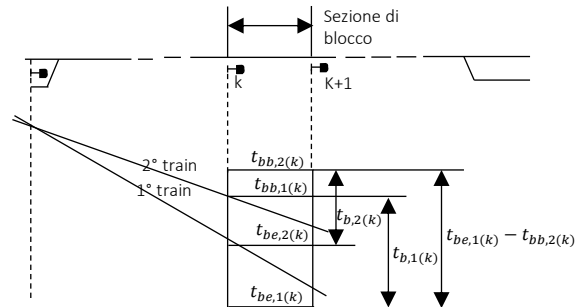


Figura 3.10 Distanziamento minimo fra treni

Calcolare il distanziamento minimo della linea in questo modo è un approccio deterministico, utilizzato comunemente nella pianificazione delle ferrovie per la sua semplicità. Sarebbe più giusto però descrivere le operazioni ferroviarie come fenomeni stocastici, impegno che la ricerca attuale sta cercando di perseguire (Hansen & Pachl, 2014).

Infine, si possono fare le seguenti osservazioni sull'occupazione delle sezioni di blocco e della linea, dunque sulla capacità. La maggiore o minore occupazione di una sezione di blocco dipende:

- dalle caratteristiche del materiale rotabile: più un treno è veloce, meno tempo impiegherà a percorrere le lunghezze prima viste, viceversa se è più lento. In relazione anche all'inclinazione della traccia;
- dalla lunghezza delle sezioni di blocco: più è lunga più tempo sarà necessario a liberarla;
- dal sistema di segnalamento in virtù della lunghezza di approccio o di avviso, che può avere maggiore o minore estensione:
 - nelle sezioni concatenate, un treno che entra in una prima sezione, autorizzato dall'aspetto verde, automaticamente riserva e dunque inizia ad occupare anche la seconda sezione poiché prima di potersi fermare dovrà occupare anche la seconda sezione di blocco. Il tempo di inizio occupazione della seconda sezione di blocco corrisponde quindi a quello della prima, questo chiaramente occupa capacità sulla linea. Ciò non avviene nelle sezioni di blocco isolate (Figura 3.11);
 - in prossimità delle stazioni di linea si può presentare un effetto simile: in virtù della lunghezza di sezione da rispettare le sezioni di blocco che precedono una stazione potrebbero avere un'occupazione eccessiva, se in stazione è presente un treno, data dall'attesa che il treno liberi la sezione di

blocco. Come prima, il tempo di fine occupazione delle sezioni precedenti si prolungherebbe finché non viene liberata la stazione. In questo caso, per non limitare eccessivamente la capacità della linea, si può rilasciare l'occupazione delle sezioni precedenti (vedi paragrafo successivo);

- dalle fermate in punti di manovra o in stazione: l'occupazione della sezione di blocco a cui si fa corrispondere la fermata è chiaramente maggiore.

Nelle sezioni in cui ci sono degli scambi o delle deviate - aree deviatoi - la sezione può essere scomposta in più tratte per ciascun elemento, e ad ogni tratta assegnare un blocco di occupazione separato. Quando la sezione è riservata per il passaggio di un treno, tutti i tratti della sezione sono riservati nello stesso momento (uguale inizio del tempo di occupazione). Man mano che il treno attraversa e libera i diversi tratti, possono essere rilasciati. Non avranno dunque lo stesso tempo di fine occupazione, ma questo sarà progressivo per ciascun tratto. Nelle stazioni, le aree deviatoi, solitamente vanno dal segnale di prima categoria di protezione (che precede la stazione) al segnale di prima categoria di partenza (alla fine della stazione). Questo principio prende il nome di “rilascio elastico”.

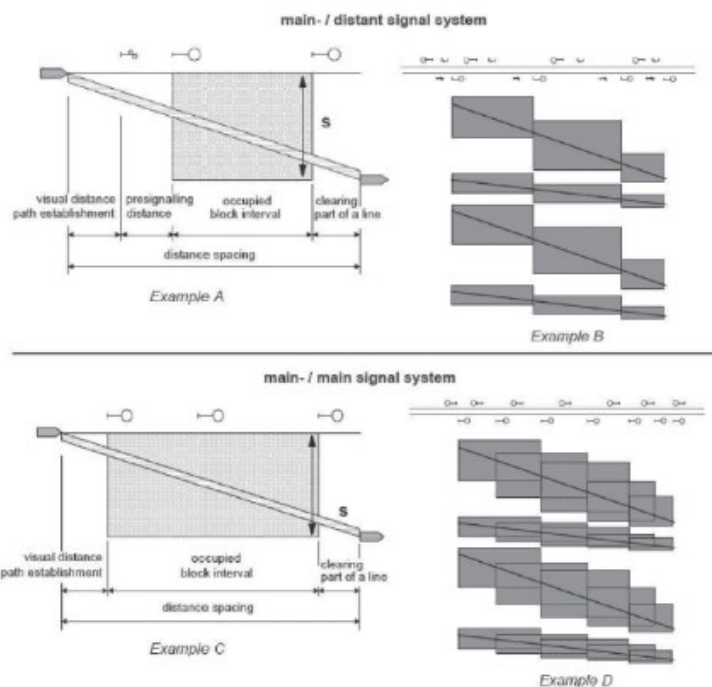


Figura 3.11 Esempio di tempi di occupazione per diversi sistemi di segnalamento (Malavasi & Ricci, 2000).

3.3.1.3 Compilazione dell'orario: inserimento di più tracce

Una volta determinati i distanziamenti temporali minimi fra le varie tipologie di tracce previste, si procede con il loro inserimento nell'orario. Il numero delle tracce inserite è limitato soltanto dalla capacità massima teorica o da un vincolo imposto sulla capacità pratica al fine di garantire un determinato livello di qualità sulla linea⁵⁹. All'atto pratico, durante questa fase di compilazione dell'orario, i distanziamenti minimi fra un treno e l'altro (calcolate come al sotto-capitolo precedente) possono essere imposte come:

- distanziamento temporale minimo che i treni devono rispettare durante l'utilizzo delle stazioni;
- distanziamento temporale minimo che i treni devono rispettare percorrendo le sezioni di blocco tra una stazione e la successiva.

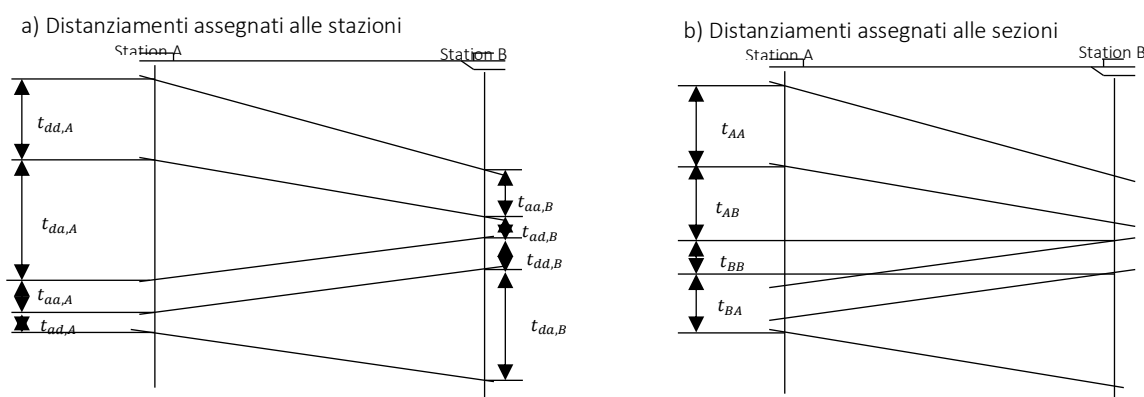


Figura 3.12 Principi di assegnazione del distanziamento minimo.

Imporre che siano rispettati i distanziamenti minimi nelle stazioni è fino ad oggi la pratica più diffusa per le comuni applicazioni basate sull'orario ferroviario (Hansen & Pachl, 2014). Sono presi in considerazione in questo caso quattro tipi di distanziamenti temporali (cioè per ciascuna combinazione possibile di tracce, bisogna specificare il distanziamento minimo sia nella stazione di arrivo che di partenza):

- il distanziamento temporale tra due treni che partono in sequenza nella stessa direzione (partenza - partenza);

⁵⁹ L'UIC (*Union internationale des chemins de fer*, associazione internazionale ferroviaria) definisce dei valori standard di *capacità pratica consumata* entro i quali viene mantenuta una qualità accettabile del servizio sulle linee (3.3.3 Valutazione della capacità consumata, Tabella 3.1).

- il distanziamento temporale tra due treni che arrivano dalla stessa direzione (arrivo - arrivo);
- il distanziamento temporale tra l'arrivo di un treno e la partenza di un treno in senso opposto sulla stessa linea (arrivo - partenza);
- il distanziamento temporale tra la partenza di un treno e l'arrivo di un treno in senso opposto sulla stessa linea (partenza - arrivo).

Il punto in cui si applica questo distanziamento di solito non è un segnale, ma è l'asse di stazione o la tabella di fermata (*timing point*). Questo tipo di approccio basato sul distanziamento temporale da rispettare durante l'utilizzo delle stazioni tiene conto implicitamente anche del distanziamento in linea.

Se si impone invece un distanziamento temporale minimo da rispettare lungo la sezione (tra le tracce assegnate ad una sezione tra due stazioni), non ci sono *diversi tipi di distanziamenti*. Il distanziamento minimo da rispettare è sempre la differenza tra i tempi in cui due treni successivi entrano nella sezione, indifferente dalla direzione di marcia (Figura 3.12). Negli ultimi tempi questo metodo sta diventando abbastanza popolare per le analisi di capacità (Hansen & Pachl, 2014). Il vantaggio di questo metodo è che per ogni combinazione di tracce bisogna assegnare un solo distanziamento minimo. Nel caso precedente invece due: uno per ciascuna stazione.

La distanziamento minimo può inoltre essere espresso come differenza di tempo fra due treni che attraversano uno stesso punto (come un segnale o il timing point) o come differenza di tempo fra il tempo di inizio di occupazione di una sezione di blocco $t_{i,1(k)}$ – $t_{i,2(k)}$ (Figura 3.13). Il secondo modo è più vantaggioso nelle analisi di capacità, mentre per la pianificazione dell'orario di esercizio il primo metodo è più facilmente applicabile. Quello che cambia fra i due è l'informazione trasmessa a valle. Nel primo caso viene trasmessa l'occupazione della sezione, da qui il vantaggio per gli studi di capacità.

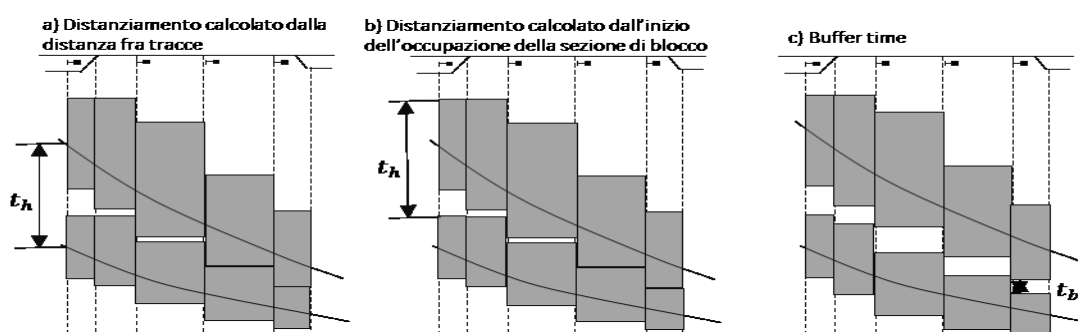


Figura 3.13 Modalità di calcolare il distanziamento minimo tra due treni e il buffer time

Infine, la distanza programmata tra due treni deve prevedere un *buffer time* necessario per compensare i ritardi (3.1.2.4). Dunque, teoricamente i blocchi di occupazione delle sezioni non possono mai sovrapporsi fra di loro (Figura 3.13 c). Oggi, la maggior parte delle ferrovie assegna il *buffer time* in modo deterministico, cioè tempi fissi da aggiungere alle diverse combinazioni di treni.

3.3.2 Ottimizzazione e saturazione dell'orario

Quando viene eseguita la compilazione dell'orario e si cerca di inserire il maggior numero di tracce che possono circolare in modo coordinato e senza conflitti, bisogna assegnare incroci, precedenza e instradamenti⁶⁰ in modo da massimizzare il numero di tracce in questione. Questo viene fatto ottimizzando la circolazione e quindi l'orario di esercizio, sotto l'imprescindibile vincolo di assenza dei conflitti.

La realizzazione di un orario d'esercizio saturo, un problema di massimizzazione del numero di tracce programmate, rappresenta dunque un caso particolare del più ampio problema di "ottimizzazione di un orario esistente". Problemi classici della *Ricerca Operativa* oggi risolvibili efficacemente con programmi di simulazione informatica. Programmi che richiedono un database infrastrutturale molto sofisticato che contenga non solo il layout della traccia con tutti i limiti di velocità e le restrizioni di linea, ma anche tutti i dati di segnalamento necessari per il calcolo dell'occupazione delle sezioni di blocco. In letteratura, il problema della saturazione è stato affrontato e risolto in diversi modi, in (Coviello, Pellegrini, Sobieraj, & Rodriguez, 2017) è presente un'accurata recensione dei diversi metodi. Di seguito ci limiteremo a presentare i principi di base, utili per una corretta comprensione del lavoro pratico svolto ed esposto al capitolo successivo.

3.3.2.1 Modellizzazione dell'infrastruttura

Nei processi di ottimizzazione, la modellizzazione dell'infrastruttura è fondamentale per razionalizzare i movimenti dei treni, semplificando così la complessità di computazione del problema.

Secondo (Hansen & Pachl, 2014) per la modellazione di un'infrastruttura ferroviaria, solitamente vengono utilizzate strutture derivate dalla teoria dei grafi. I grafi sono modelli

⁶⁰ Instradamenti: in inglese *routing*, assegnazione di itinerari alternativi ad una traccia, rispettando l'origine, la destinazione e le fermate intermedie se previste.

molto flessibili e rappresentano quindi un potente mezzo per descrivere anche l'infrastruttura ferroviaria più complessa. In un modello a grafo, l'infrastruttura è divisa in parti, chiamate archi. Questi archi sono uniti da nodi. Un nodo (o vertice), in una rete ferroviaria, rappresenta una località (una stazione o un punto di manovra). Un arco ha la funzione di connettere due nodi. Esistono due livelli di dettagli dell'infrastruttura (Hansen & Pachl, 2014)

Modello microscopico. Questo modello contiene il livello più alto possibile di dettagli su nodi e archi. Le informazioni sulla traccia, come velocità, gradiente o raggio, sono combinate con il sistema di segnalamento e alcune informazioni operative come ad esempio il tipo di materiale rotabile associato ad un percorso o i minimi tempi di sosta da rispettare. Un arco contiene informazioni su lunghezza, velocità massime, livellette e raggi di curvatura. In generale, questo modello viene utilizzato per il calcolo esatto del tempo di percorrenza, la costruzione degli orari, il rilevamento e la risoluzione dei conflitti.

Modello macroscopico. Questo modello contiene informazioni aggregate su nodi e archi. Contiene meno archi e nodi rispetto al modello microscopico (Figura 3.14). Ha anche una visione più astratta dell'infrastruttura. Un tipico nodo macroscopico rappresenta una stazione o una località di servizio (*junction* in inglese). Un arco può contenere informazioni su lunghezza, tipo di linea, tempo medio di esecuzione. In generale, l'utilizzo di questo modello è preferito per attività di pianificazione a lungo termine o problemi di routing speciali.

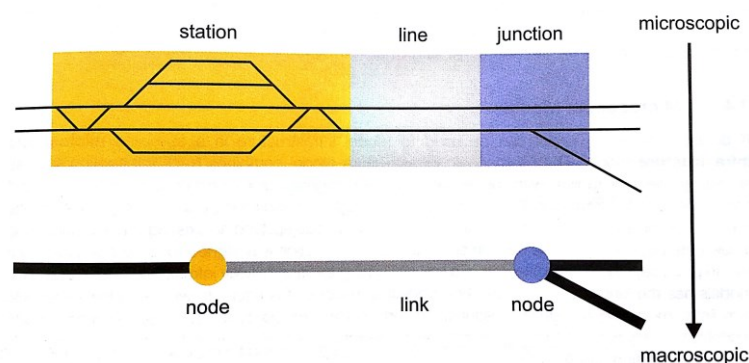


Figura 3.14 Livelli del modello infrastrutturale (Hansen & Pachl, 2014)

3.3.2.2 Granularità del modello microscopico

Tipicamente un modello microscopico dell'infrastruttura dev'essere in grado di rappresentare tutti gli itinerari possibili in linea e soprattutto nelle stazioni. In genere la modellizzazione degli itinerari è fatta sulla base delle **sezioni di blocco** e dei **circuiti di binario**.

Una sezione di blocco, come già visto, è una porzione di linea delimitata da due segnali principali. Essa può essere fisicamente costituita da uno o più circuiti di binario. Un circuito di binario è una porzione più piccola di binario in cui viene rilevata automaticamente la presenza di un treno. Diverse sezioni di blocco possono condividere uno o più circuiti di binario. Nella Figura 3.15, le sezioni di blocco s1-s3 e s2-s3 condividono il circuito di binario tc5 (Marangon, 2015). Quando la testa di un treno entra nel primo circuito di una sezione di blocco, a essa sono riservati tutti i seguenti circuiti appartenenti alla stessa sezione di blocco. Se un treno utilizza un circuito di binario, nessun altro treno può usarlo. Per utilizzo è intesa sia l'occupazione fisica che la riservazione preliminare. Sempre per ragioni di sicurezza, solo un treno può utilizzare la stessa sezione di blocco contemporaneamente. In caso di rilascio del percorso, le sezioni di blocco vengono rilasciate quando la coda del treno ha liberato l'ultimo circuito di binario della sezione di blocco.

Nelle sezioni in cui sono presenti degli scambi si potrebbero applicare i sistemi *route-lock* e *route-release*, che non riservano necessariamente una sezione di blocco intera per il passaggio di un treno, ma solo i corrispondenti circuiti di binario che permetterebbero un passaggio contemporaneo di due treni (Theeg, 2009). Detto insieme di circuiti di binario rappresentano una *route* o un itinerario.

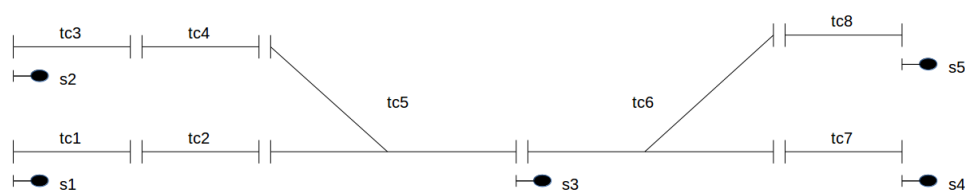


Figura 3.15 Circuiti di binario (Marangon, 2015).

Ciascun circuito di binario può essere formato da un arco e due nodi agli estremi. Mentre una sezione di blocco è definita da un determinato nodo di inizio e di fine, fra i quali vi possono essere più archi. Se l'infrastruttura è modellizzata in termini di sezioni di blocco, l'unica informazione disponibile è la presenza del treno in una determinata sezione di blocco: non viene presa in considerazione alcuna informazione sulla posizione esatta del treno dopo aver superato il segnale di ingresso. Se l'infrastruttura è modellizzata in termini

di circuiti di binario, le informazioni disponibili sono la presenza di un treno in un determinato circuito di binario. In questo caso, possiamo avere entrambi i sistemi di *route-block* e *route-release*.

Gli itinerari che si vanno così a formare sono un insieme di circuiti di binario o di sezioni di blocco che un treno può utilizzare per percorrere la linea, attraversare una stazione o degli scambi isolati. Un itinerario può essere creato solo se la corrispettiva sezione è percorribile dal punto di vista operativo. Ad esempio, un itinerario che dovrebbe essere utilizzato da locomotive elettriche, non può comprendere sezioni che non siano elettrificate. Questo semplice approccio può essere utilizzato per trasferire i requisiti tecnici (ad esempio l'elettificazione) o le regole operative nel modello (Hansen & Pachl, 2014). Per la modellizzazione dei percorsi nelle grandi stazioni solitamente si usano modelli diversi, in grado di ridurre la complessità dei movimenti dei treni e ottimizzare la scelta degli itinerari al suo interno. Esempi di questi modelli si possono trovare in (Hansen & Pachl, 2014) ed in (Han, Yue, & Zhou, 2014).

3.3.2.3 Ottimizzazione e saturazione

Modellizzando l'infrastruttura in questa maniera, l'ottimizzazione dell'orario ferroviario si traduce in un problema della teoria dei grafi tipico della Ricerca Operativa, caratterizzato da una determinata funzione obiettivo da massimizzare o minimizzare nel rispetto di determinati vincoli. Il problema può essere visto come:

- Calcolo dei percorsi più brevi tra due nodi (problema del percorso più breve della teoria dei grafi). L'algoritmo Dijkstra potrebbe essere usato per risolvere questo tipo di problema, vedi Dijkstra (1959).
- Calcolo dei flussi massimi o minimi, in una rete a grafo, tenendo conto di determinate funzioni di capacità per i collegamenti o i nodi, e non funzioni del tempo (qui è possibile utilizzare i problemi di flusso massimo e minimo *Out-of-Kilter* o Edmonds e Karp).

Chiaramente problemi di questo tipo si complicano notevolmente quando sono applicati a sistemi reali, soggetti a saturazione con risoluzione dei conflitti. Gli approcci applicati sono allora basati su algoritmi euristici o genetici, che esulano dalle competenze di questa tesi. Diciamo solo che in virtù di un orario quanto più ottimizzato, ai programmi di risoluzione utilizzati verrebbe lasciata la simultanea libertà di generare i tempi di arrivo e di

partenza nelle stazioni, e di selezionare gli itinerari da assegnare ai treni. Tuttavia, ciò introduce numerosi gradi di libertà, portando a un costo computazionale eccessivamente grande (Hansen & Pachl, 2014). Pertanto, in un approccio basato sulla programmazione informatica, i due step sono realizzati separatamente.

3.3.3 Valutazione della capacità consumata

La *valutazione* della capacità rappresenta l'ultima delle tappe di uno studio della capacità ferroviaria. La valutazione avviene solitamente per mezzo di KPIs (*Key Performance Indicators*), indici di prestazione. Non esistono degli indici definiti in modo imperativo da usare come metro di misura assoluta. La scelta dei KPIs da utilizzare viene lasciata a chi è incaricato dello studio, che quindi deve prediligere quelli più efficaci agli obiettivi del caso in esame.

Convenzionalmente vi sono due principali modalità di valutare la capacità ferroviaria:

- In termini di numero di tracce nell'unità di tempo;
- In termini di tempo di occupazione dell'infrastruttura rispetto ad una data finestra temporale.

Sono due modi per descrivere la stessa cosa. Il primo guarda solo alle *tracce* dei treni in un orario grafico, restituendo un'informazione puramente deterministica e schematica. Il secondo, include i “rettangoli” di *occupazione delle sezioni di blocco* nell'intorno della traccia, inquadrando meglio gli effetti della eterogeneità del traffico, della bi-direzionalità dei flussi, dei colli di bottiglia, ecc. La maggiore quantità di informazioni è accompagnata in questo caso anche da una maggiore difficoltà di interpretazione dei risultati numerici, data la molteplicità di fattori incidenti, non pesati o normalizzati.

Seguendo un approccio alla valutazione di capacità basato sugli orari, il numero di tracce nell'unità di tempo può essere ricavato come *output* dai metodi di ottimizzazione e di simulazione, che se dotati di algoritmi di saturazione, sono in grado di calcolare anche la capacità massima della rete. Il secondo metodo di valutazione è invece il tipico metodo utilizzato dai modelli analitici, fra i quali i più conosciuti sono quelli di “compressione dell'orario” come l'UIC406.

I due indici, numero di tracce e occupazione dell'infrastruttura, sono spesso complementari, per una descrizione più ampia e completa del problema. Raramente l'obiettivo di uno studio di capacità è la sola determinazione del numero di tracce, piuttosto si

ricercano le criticità dell’infrastruttura, i colli di bottiglia, o le prestazioni in termini di qualità della circolazione, elementi che si prestano ad essere descritti con indici come la *occupazione/capacità consumata*.

3.3.3.1 Capacità consumata

Il consumo di capacità di una linea, può essere visualizzato in modo molto chiaro su un orario d’esercizio, spostando virtualmente le “scale” di occupazione delle sezioni di blocco il più vicino possibile (3.3.1.2) senza alcun buffer time, ma senza cambiare la sequenza dei treni (Figura 3.16).

L’occupazione dell’infrastruttura OTR (*Occupancy Time Rate*) viene allora calcolata come il rapporto tra la somma dei tempi di occupazione divisi per il periodo di tempo totale.

$$OTR [\%] = \frac{\sum \text{Tempi di Occupazione}}{\text{Finestra Oraria}}$$

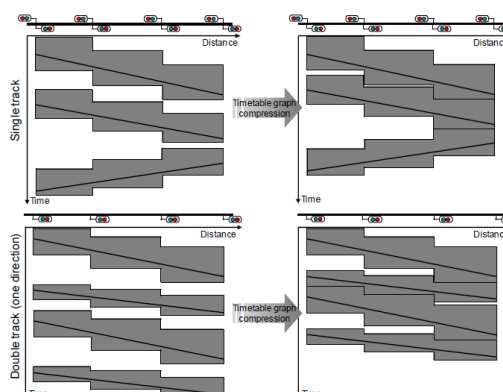


Figura 3.16 Metodo della compressione.

L’UIC ha proposto come linee guida alcuni valori soglia di occupazione dell’infrastruttura al fine di garantire una qualità di esercizio soddisfacente. Questi valori sono funzione del tipo di linea e dell’utilizzo dell’infrastruttura (Tabella 3.1).

Tabella 3.1 Tassi di occupazione proposti dall’UIC406R per le linee

Tipo di linea	Ora di punta	Periodo giornaliero
Linea a traffico passeggero suburbano	85%	70%
Linee ad alta velocità	75%	60%
Linee a traffico misto	75%	60%

Nei nodi e nelle aree con binari di scambio e di stazione vi sono pochi dati empirici relativi ai tempi di occupazione appropriati (Tabella 3.2). Questi valori devono essere confermati dai calcoli, e quindi tracciando i grafici di occupazione, prima che vengano applicati.

Tabella 3.2 Tassi di occupazione proposti dall'UIC406R per i nodi

Occupazione Nodi	
Aree deviatori (switch area)	60%...80%
Area di stazione (track area)	40%...50%

3.4 Conclusioni

La crescente applicazione dei modelli matematici di ottimizzazione negli orari ferroviari è stata stimolata da due direzioni. Innanzitutto, dagli operatori ferroviari che si confrontano con una concorrenza in continua crescita, in particolare in Europa. Molte di queste società operano su base commerciale o semi-commerciale, il che mette più pressione sull'efficienza e sull'eccellenza operativa. L'applicazione di modelli matematici di ottimizzazione può aiutare a realizzare questi obiettivi. In secondo luogo, dalla comunità scientifica che ha speso un grande impegno a modellare i problemi di pianificazione che si presentano nel mondo ferroviario nel modo più appropriato. Insieme alle tecniche matematiche di ottimizzazione e all'aumento della potenza di calcolo, molti di questi problemi possono essere risolti al giorno d'oggi in tempi relativamente brevi. Tuttavia, rimane importante bilanciare il livello di dettaglio nei modelli e il tempo di calcolo necessario per trovare soluzioni appropriate ed effettivamente fruibili.

4 Analisi di capacità del nodo di Novara

I concetti teorici presentati nei capitoli precedenti vengono in questo applicati alla situazione specifica del nodo merci di Novara. Del nodo merci di Novara si è ampiamente trattato nel Capitolo 2, dandone un inquadramento territoriale sia a livello europeo sia locale, quindi studiandone l'offerta e la domanda attuale. Si è ancora visto come, a fronte della tendenza crescente della domanda di trasporto merci su rotaia, si sono formulati dei *Modelli di Esercizio* futuri che prevedono un incremento di capacità sulle linee afferenti al nodo. In questo contesto, l'Amministrazione locale di Novara e il gestore dell'infrastruttura ferroviaria RFI si sono impegnati a programmare e avviare interventi infrastrutturali nel breve e medio periodo. Si tratta di interventi atti a garantire un determinato livello di qualità del traffico ferroviario nella zona, nel rispetto anche del benessere cittadino, data la vicinanza della ferrovia e dei diversi terminal - di cui si compone il nodo merci - al centro abitato di Novara.

In questo capitolo ci si propone, dunque, di analizzare gli impatti degli interventi infrastrutturali - totali o parziali - che verranno introdotti sul fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto e sulle linee che dal fascio sono indirizzate verso i valichi svizzeri, passando per Vignale. L'analisi di capacità svolta si inserisce inoltre in un ambiente integrato di ottimizzazione dell'uso dell'infrastruttura avvalendosi di uno strumento di simulazione del traffico ferroviario del Dipartimento di Trasporti del Politecnico di Torino, SASTRE, per studiare la risposta del sistema, compatibilmente con i vincoli e le diverse configurazioni di progetto che si possono presentare.

Verranno, in ordine, trattati nel capitolo: definizione degli obiettivi e dell'area di studio, descrizione degli scenari di studio, la metodologia impiegata per lo svolgimento delle analisi, quindi i risultati per ogni scenario e la loro discussione.

4.1 Obiettivi

I progetti RFI di intervento infrastrutturale sul nodo merci di Novara (Capitolo 2, Interventi RFI pianificati) hanno come principali obiettivi:

- i. migliorare il comfort cittadino di Novara, decongestionando le linee nell'immediata vicinanza del centro abitato, dunque nei pressi della stazione passeggeri Novara Centrale;

- ii. incrementare la qualità del servizio ferroviario offerto, in termini di capacità ed efficienza nella gestione del traffico.

La tesi si propone quindi di valutare “se” e “in quali condizioni” questi obiettivi siano raggiunti in relazione agli interventi pianificati. La *chiave* di studio sarà l’analisi di capacità basata sull’orario ferroviario, metodo i cui risultati sono efficaci per una valutazione di questo tipo.

4.2 Area di studio

L’area di studio è stata definita come da Figura 4.1, in modo che sia funzionale ai sopraindicati obiettivi e alla modalità di analisi impiegata. Si è tenuto conto nella sua definizione anche di un approccio proposto da (UIC, 2013), che dichiara:

“Nello studio della capacità dei nodi, fasci di A/P, terminal logistici o intermodali, si deve prendere in considerazione l’interazione con la rete; in virtù dell’interazione reciproca dei percorsi dei treni o dei movimenti di manovra che interessano più parti del sistema.”

Assunto che gli interventi coinvolgono le sole parti evidenziate in Figura 4.2:

- fascio arrivi/partenze Novara Boschetto (rosso);
- bretella di collegamento Novara Boschetto e Vignale (giallo);
- stazione di Vignale (viola);

L’area di studio viene così estesa, comprendendo in aggiunta quanto segue.

- I tratti linea a Nord di Vignale, lato Borgomanero e lato Oleggio, precisamente:
 - Vignale - Caltignaga (inclusa) - Momo (esclusa);
 - Vignale - PM Cameri (inclusa) - Bellinzago (esclusa).
- Il tratto di linea Vignale - Novara Centrale - Novara Boschetto, ad oggi l’unica via d’accesso a Novara Boschetto⁶¹.

⁶¹ Come meglio specificato al Capitolo 2 nella sezione dedicata agli Interventi Pianificati, allo stato attuale la bretella corrisponde al *binario pari dell’Interconnessione Ovest della linea ad alta velocità Torino – Milano*, non si estende fino alla linea in Vignale e dunque non è utilizzata in alcun modo dai treni merci come via di accesso al fascio arrivi/partenza.

- Il terminal CIM (Centro Interportuale Merci), presso il quale avviene lo smistamento dei treni merci adibiti al Trasporto Combinato non Accompagnato (TCnA, container e semirimorchi).

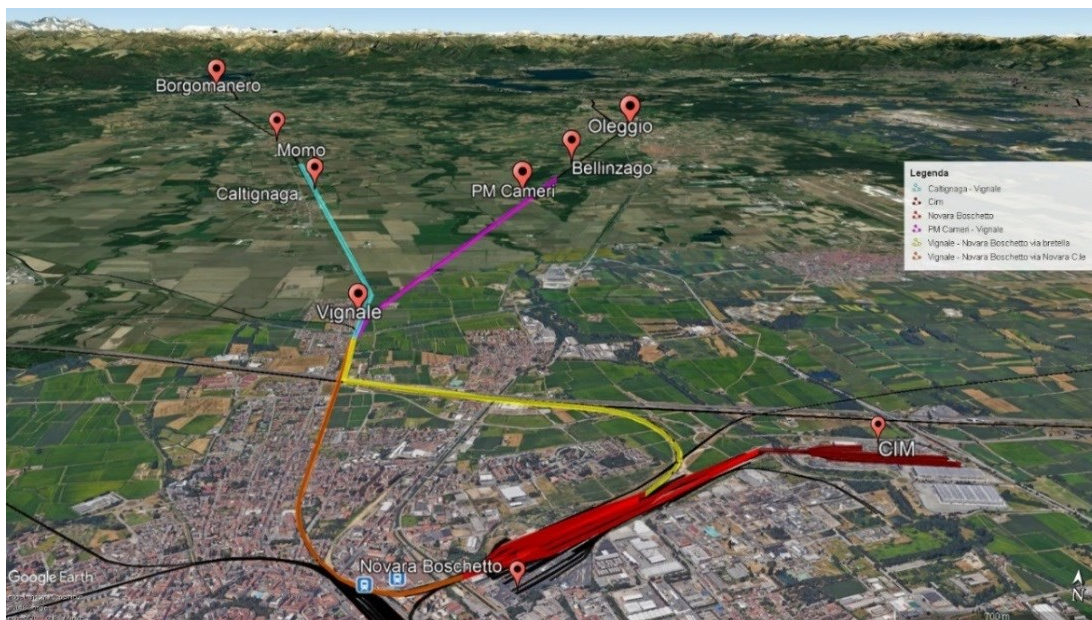


Figura 4.1 Area di studio (Google Earth).

4.3 Scenari di studio

Gli scenari infrastrutturali di studio sono in totale quattro, rappresentanti tutti configurazioni future di intervento. Le parti dell'area di studio soggette a intervento sono quelle specificate in Figura 4.2. Gli scenari seguono un ordine crescente di entità degli interventi infrastrutturali, simulando in questo modo le fasi realizzative del PRG di Novara Boschetto e Vignale, che per motivi economici non è possibile realizzare in un'unica soluzione. Così il primo scenario preso in considerazione rappresenta l'intervento minimale pianificato, vi saranno poi due scenari intermedi, mentre l'ultimo rappresenta il limite superiore di intervento, coincidente con il PRG di Novara Boschetto e Vignale completo (Capitolo 2, Interventi RFI pianificati).

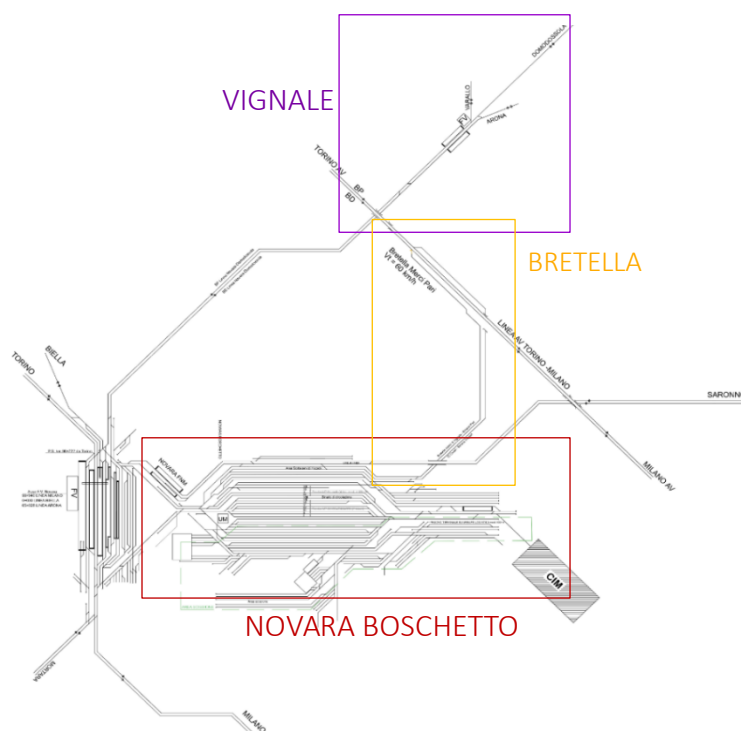


Figura 4.2 Area di studio ed elementi soggetti ad intervento infrastrutturale (ITALFERR, 2018).

4.3.1 Scenario 1

Lo scenario 1, raffigurato in Figura 4.3, rappresenta il limite inferiore di intervento nell'area. Con esso si applicano gli interventi ritenuti prioritari del PRG 1a Fase (Capitolo 2, Interventi RFI pianificati):

- realizzazione della bretella merci: intervento che sfrutta l'esistente binario pari dell'Interconnessione Ovest della linea ad alta velocità Torino-Milano, adattandolo ad un traffico merci e prolungandolo per creare un collegamento diretto fra la stazione di Vignale ed il fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto, evitando in questo modo di passare da Novara Centrale. La bretella è a binario singolo e il suo principale obiettivo è quello di trasferire i treni merci dal tratto Vignale - Novara Centrale, su un tratto che per l'appunto non interessi il centro abitato di Novara;
- riconfigurazione interna di Novara Boschetto:
 - spostamento dei binari del terminal dell'autostrada viaggiante dalla posizione attuale (parte est del fascio a/p), nella parte superiore del fascio. Qui i binari saranno di nuova costruzione, in tutto 4, implementando il modulo

standard europeo 750 m. I binari dell'autostrada viaggiante così ricollocati saranno collegati in Novara Boschetto alla bretella, in questo modo i treni merci adibiti al Trasporto Combinato Accompagnato (TCA) utilizzeranno questa via di entrata/uscita;

- nessun intervento sui binari del fascio arrivo/partenza dedicati ai treni merci “tradizionali”, TCnA, che rimangono come da situazione attuale, per un totale di 7 binari;
- costruzione di un binario di precedenza/incrocio in Vignale, lato Borgomanero. Tale binario avrà modulo 750 m, in modo da poter accogliere treni merci europei di lunghezza fino a 740 m. La precedenza è utilizzabile dai soli treni con origine/destinazione Borgomanero.

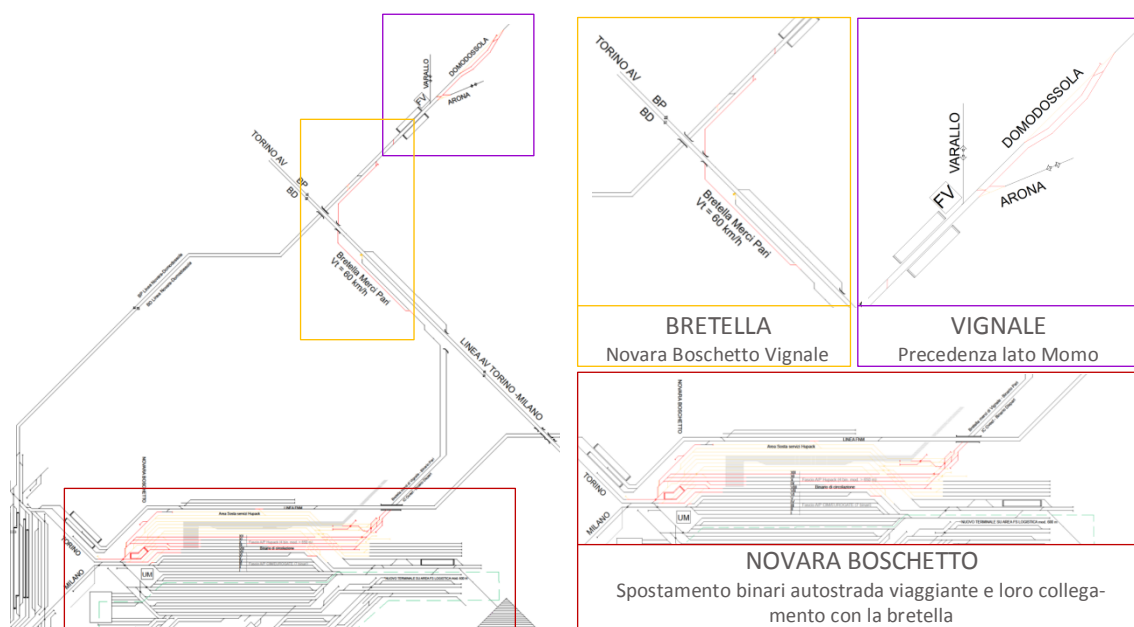


Figura 4.3 Scenario 1, interventi infrastrutturali (rosso: tratti infrastrutturali di nuova costruzione, giallo: demolizioni), (ITALFERR, 2018).

4.3.2 Scenario 2

Lo scenario 2 in Figura 4.4 rappresenta una configurazione di intervento intermedia. Differisce dallo scenario 1 solamente per un intervento aggiuntivo all'interno del fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto:

- collegamento alla bretella merci di due binari del fascio arrivi/partenze dedicati a treni merci tradizionali TCnA, in aggiunta ai già collegati binari dell'autostrada viaggiante dello scenario 1. Questo intervento ha l'obiettivo di incrementare il trasferimento di treni merci dal tratto Vignale - Novara Centrale sulla bretella.

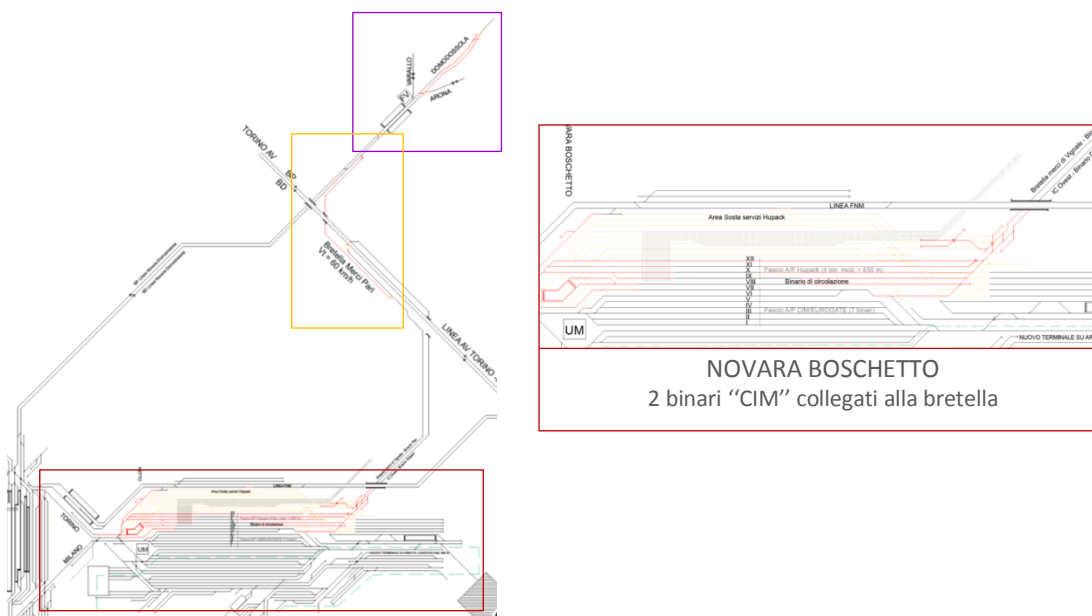


Figura 4.4 Scenario 2, interventi infrastrutturali (rosso: tratti infrastrutturali di nuova costruzione, giallo: demolizioni), (ITALFERR, 2018).

4.3.3 Scenario 3

Come lo scenario 2, questa configurazione prevede interventi infrastrutturali solo sul fascio a/p Novara Boschetto. Con lo scenario 3, si raggiunge il PRG completo di Novara Boschetto (Figura 4.5), realizzando:

- collegamento di tutti i binari del fascio arrivi/partenze (7 binari TCnA + 1 binario di circolazione + 4 binari TCA) alla bretella merci. Di questo modo tutti i treni merci, siano essi dell'autostrada viaggiante e non, possono accedere a Novara Boschetto in via prioritaria dalla bretella ed evitare per quanto possibile il passaggio via Novara Centrale. In sede di analisi è da verificare la capacità della bretella così collegata.
- adattamento di tutti i binari di cui sopra, al modulo standard europeo di 750 m, laddove permesso (dipende dalla disponibilità planimetrica del territorio).

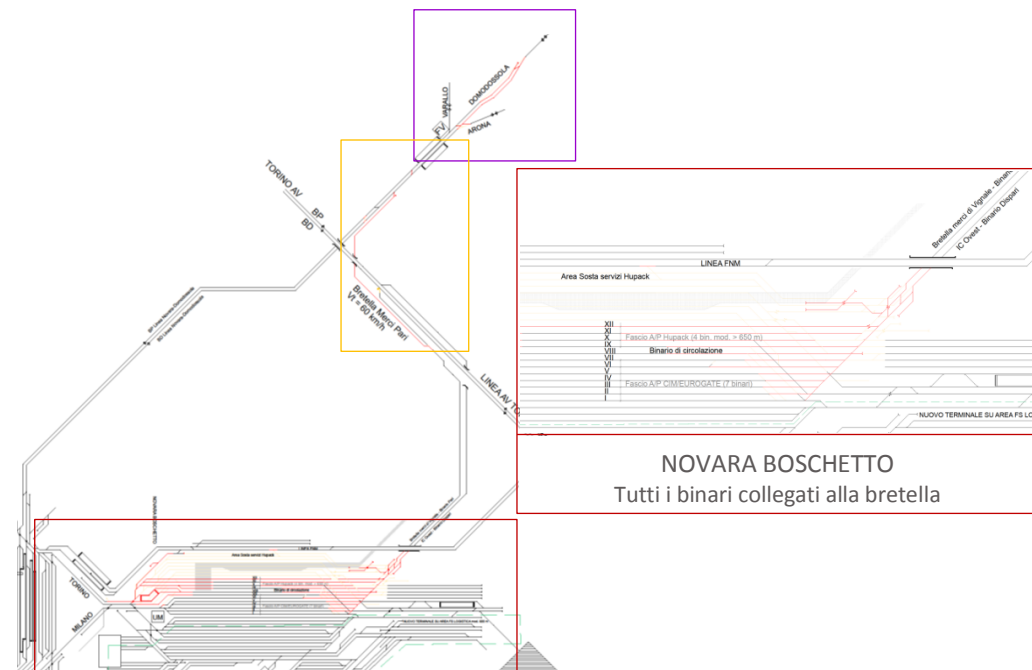


Figura 4.5 Scenario 3, interventi infrastrutturali (rosso: tratti infrastrutturali di nuova costruzione, giallo: demolizioni), (ITALFERR, 2018).

4.3.4 Scenario 4

Con lo scenario 4 (Figura 4.6) si raggiunge il *limite superiore* di interventi, corrispondente di fatto alla configurazione infrastrutturale completa della PRG di Novara Boschetto e Vignale. Rispetto allo scenario 3, il più completo di quelli visti finora, si aggiungono i seguenti interventi:

- prolungamento della bretella merci sulla tratta di linea verso Vignale, fino a costituire un terzo binario di stazione in Vignale, adibito solo a traffico merci;
- costruzione di un secondo binario di precedenza/incrocio in Vignale, lato Oleggio. Tale binario avrà modulo 750 m, in modo da poter accogliere treni merci europei di lunghezza fino a 740 m. La precedenza è utilizzabile dai soli treni da/per Oleggio.

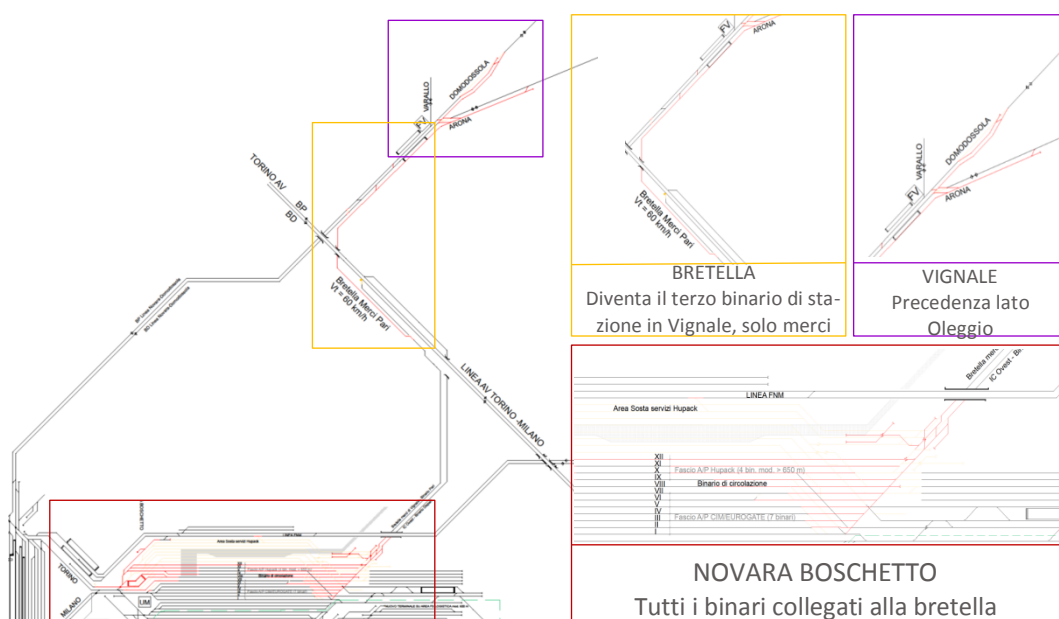


Figura 4.6 Scenario 4, interventi infrastrutturali (in rosso i tratti infrastrutturali di nuova costruzione), (ITALFERR, 2018).

4.4 Metodologia e impostazione delle analisi

L'analisi di capacità del caso studio in esame è stata realizzata seguendo un approccio tipico dei metodi di simulazione basati sugli orari ferroviari. Un approccio che si compone principalmente della modellizzazione del problema e sua risoluzione per mezzo di performanti algoritmi propri della Ricerca Operativa, in grado di generare orari ferroviari fattibili⁶², ottimizzati e saturi. Sulla base di questi dati, la valutazione della capacità è realizzata per mezzo di KPIs opportunamente definiti. Tutto ciò si svolge all'interno di un ambiente informatico integrato: il pacchetto di calcolo e analisi SASTRE (Simulazione ed Analisi Sistemi di Trasporto su Rotaie) nato all'interno del Dipartimento DIATI - area Trasporti del Politecnico di Torino. Utilizzare questo strumento di calcolo e simulazione, in comparazione a programmi di microsimulazione commerciali (come ad esempio Open-Track), ha permesso:

- Una modellizzazione microscopica molto accurata del problema, ma allo stesso tempo di facile inserimento e/o modifica;

⁶² Un orario è fattibile quando rispetta vincoli:

- Tecnici: minimo distanziamento (no conflitti), rispetto dei tempi di percorrenza, ecc.;
- Operativi: tempi di sosta minimi/massimi, coincidenze fra treni, ecc.

- La generazione automatica di un orario fattibile e saturo in tempi ragionevoli, a indicare che gli algoritmi utilizzati dal programma sono abbastanza ottimizzati, in termini di prestazioni di calcolo;
- La personalizzazione degli input e degli output in modo da adattarli al meglio alle necessità del caso oggetto di studio.

Complessivamente, le diverse fasi operative del metodo si possono schematizzare come segue in Figura 4.7.

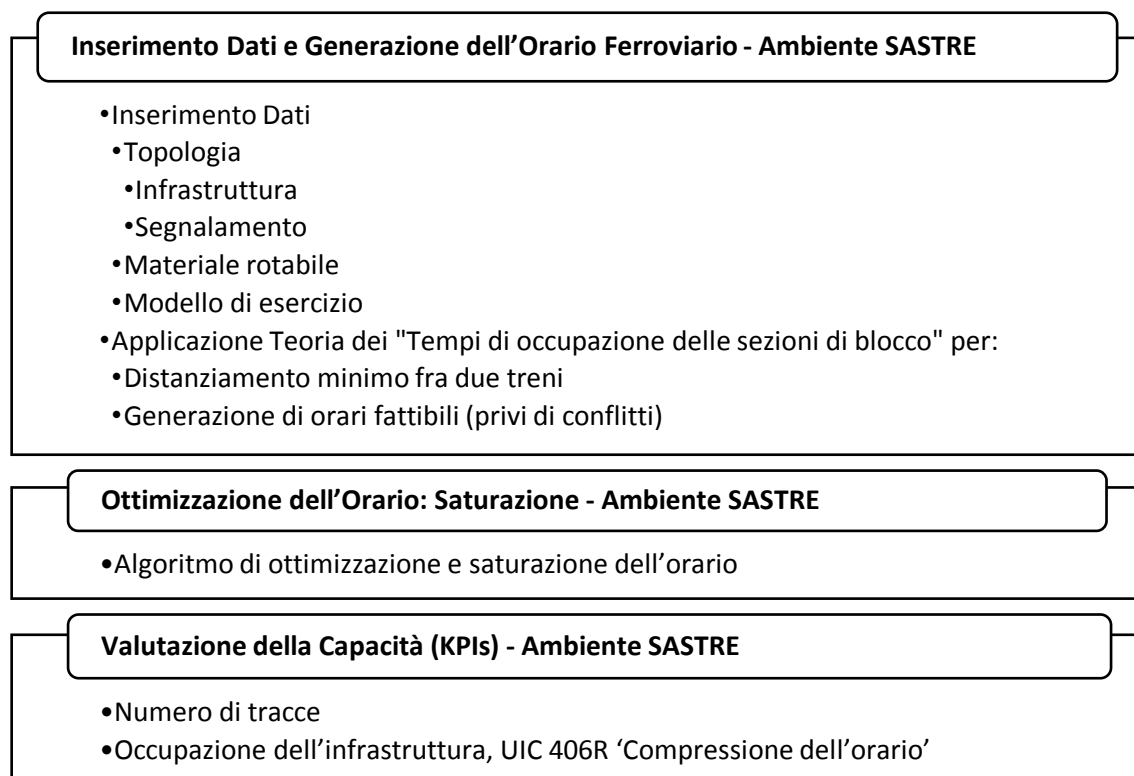


Figura 4.7 Fasi dell'approccio utilizzato per l'analisi di capacità.

4.4.1 Inserimento Dati

L'ambiente di simulazione SASTRE è in grado di calcolare i **diagrammi di marcia** (cioè i diagrammi spazio-tempo o spazio-velocità) dei treni usando come dati di input le caratteristiche tecniche di **infrastruttura**, **sistema di segnalamento** e **materiale rotabile**.

I dati raccolti e inseriti, sono elencati con maggiore dettaglio in Tabella 4.1 (Coviello N. , 2018), con indicazione generalizzata anche delle fonti. Per un elenco completo delle fonti dei dati utilizzati nello studio si rimanda invece alla bibliografia finale.

Tabella 4.1 Modello microscopico

	Dati	Fonti
Infrastruttura	Le Parti Topologiche sono qualificate da caratteristiche come lunghezza, velocità massime, livelletta e raggio di curvatura; Posizione e caratteristiche (numero di aspetti, possibili restrizioni di velocità) dei segnali; Posizione dei punti orario (per esempio, i punti in cui le fermate d'orario vengono programmate); Posizione dei giunti isolati che definiscono i circuiti di binario utilizzati dal sistema di segnalamento per verificare l'occupazione delle sezioni di blocco, cosa che a sua volta influenza l'aspetto dei segnali; Alimentazione della linea; Percorsi (intesi come sequenze di Parti Topologiche) utilizzati dalle corse.	Profili schematici di stazione, RFI. Fascicoli di Linea, RFI. Profili piano-altimetrici delle linee, RFI.
Materiale Rotabile	Tipi e caratteristiche del materiale rotabile, come massa, lunghezza, velocità massima, caratteristiche di trazione (diagramma forza di trazione-velocità) e frenatura, resistenza al moto (formula trinomiale delle resistenze ordinarie al moto, definita tramite i coefficienti) e altre.	PGOS⁶³, RFI. Fascicoli di Linea: massima massa rimorchiabile, RFI. PGOS, Circolabilità dei veicoli, RFI. Lista arrivi per treni, CIM. Schede tecniche di locomotive e carri impiegati.
Esercizio	Corse, definite come un tipo di materiale rotabile, associate ad un percorso; Orario per ciascuna corsa il quale definisce - per ciascun punto orario utilizzato nel percorso prescelto - i tempi di arrivo e partenza programmati, così come i minimi tempi di sosta da rispettare; Possibili vincoli aggiuntivi riguardanti il sistema di segnalamento o il sistema di gestione della circolazione.	Specifiche tecniche di circolazione, RFI. M53, RFI. Occupazione dei binari, CIM.

⁶³ Piano Generale dell'Orario di Servizio.

In maniera analoga ai programmi di simulazione commerciali, nonché alla logica dei Computer Vitali di bordo treno (per esempio in ERTMS), la frenatura è modellizzata a decelerazione costante attraverso una *decelerazione standard* (Coviello N. , 2018). Con questi dati, insieme alle “condizioni al contorno” riguardanti l’orario ed i tempi di sosta nelle stazioni, il simulatore calcola i **profili di marcia dei treni** tramite l’integrazione numerica dell’equazione fondamentale del moto. L’integrazione è effettuata fra ogni coppia di fermate consecutive.

I dati topologici sono relativi agli elementi dell’area di studio (stazioni e tratti di linea):

- stazioni⁶⁴: Caltignaga, P.M. Cameri, Vignale, Novara Boschetto, CIM;
- tratti di linea:
 - o Momo - Caltignaga;
 - o Bellinzago - P.M. Cameri;
 - o Vignale - Novara Centrale - Novara Boschetto;
 - o Vignale - Novara Boschetto (bretella);
 - o CIM - Novara Boschetto.

Nonostante quest’area non si estenda su grandi distanze, data l’eterogeneità degli elementi di cui è composta (linee a semplice binario, linea a doppio binario, stazioni passeggeri, posto di manovra, fascio a/p, terminal intermodale), ne risulta un modello di una certa complessità, di cui Novara Boschetto e CIM rappresentano la maggiore criticità, costituendo di fatto un nodo. Lo studio di capacità dei nodi, soprattutto con metodi di simulazione, è un’area della tecnica e circolazione dei trasporti ferroviari ancora poco esplorata, come visto anche all’ultima sezione del Capitolo 3 dai dati incerti del (UIC, 2013) sulla stima dei valori di capacità raccomandata nei nodi.

4.4.1.1 Materiale Rotabile

Si ritiene utile, data l’importanza rivestita nel calcolo dei profili di marcia, fare un breve e schematico accenno al materiale rotabile che si è preso in considerazione nello studio.

In Tabella 4.2 e Tabella 4.3 si riportano le caratteristiche generali delle locomotive e dei carri utilizzati, ricavati da un controllo a campione sui traffici provenienti da Domo-dossola. Nella realtà il materiale rotabile utilizzato è molto variegato e dipende dalle IIFF

⁶⁴ Stazioni intese come luoghi dove i treni possono fermare (posti di manovra, terminal, fasci arrivo/partenza, ecc.).

merci operanti. Le varie caratteristiche sono state ricavate da schede tecniche delle locomotive e dei carri. Sulla base poi dei limiti di massa trainabili (Tabella 4.4) sulle linee e per le locomotive in esame, considerando treni da 740 m (standard europeo), sono stati definiti il numero di carri e di locomotori necessari a trainarli, quindi le caratteristiche di tutti i dei treni completi impiegati nel modello. Per ogni tipologia di trasporto: passeggeri (Tabella 4.5), TCA e TCnA (Tabella 4.6), è stato utilizzato un solo modello di treno. Per il traffico passeggeri ci si attiene al materiale rotabile attualmente utilizzato, considerando la sola tipologia di treno “MDVC” (Medie Distanze Vestiboli Centrali) formato da (AMP - Agenzia della Mobilità Piemonte, 2016): una locomotiva *E464N*, una carrozza a due piani *npBDL* e tre carrozze a piano ribassato *nBC-clim*.

Tabella 4.2 Caratteristiche tecniche delle locomotive.

Locomotive			
	Merci		Passeggeri
	E484	E474	E464
Massa totale (t)	85	87	72
Massa aderente (t)	85	87	65
Lunghezza totale (m)	19	19	16
Potenza continuativa (kW)	5600	6000	3000
Accelerazione max (m/s ²)	1	1	0,5
Velocità max (km/h)	140	140	160
N° unità	1	1	1
Tipo locomotiva	electrical	electrical	electrical
Massimo sforzo di trazione (kN)	300	300	200
Massa frenata (t)	75	75	50

Tabella 4.3 Caratteristiche tecniche dei carri.

Carri						
	Saadkms	Sgns	Sggmrs	UIC-X	MDVC nB	MDVC npB
85% massa totale (t)	1725	1487	1147	50	129	50
Lunghezza totale (m)	647	392	296	26	79	26
Velocità massima (km/h)	120	100	100	160	140	140
N° unità	33	20	10	1	3	1
Massa frenata (t)	1419	1560	1050	65	159	64
Descrizione	TCA ultra-basso	TCnA 60'	TCnA 90'	TCA autisti	REG	REG

Tabella 4.4 Limiti di massa rimorchiabile, da Fascicoli di Linea.

Limite massa rimorchiabile (t)		
Locomotiva	Domodossola	Arona
E484	1200	1600
E474	1200	1600
E464	720	1160

Tabella 4.5 Caratteristiche treno passeggeri

Passeggeri E464+MDVC	
Massa totale (t)	251
Massa frenata (t)	273
% massa frenata	108

Tabella 4.6 Caratteristiche treni completi.

	Autostrada Viaggiante TCA		Treni merci TCnA	
	Tipologia	N° unità	Tipologia	N° unità
Locomotive	E474	2	E484	2
Carri	UIC-X	1	Sgns	20
	Saadkms	33	Sggmrs	10
Massa totale (t)	1862		2720	
Massa frenata (t)	1559		2695	
% massa frenata	84		99	
Massa rimorchiata (t)	1775		2635	

Una volta modellizzati tutti gli elementi topologici, il materiale rotabile e quello di esercizio, il programma SASTRE calcola i profili di marcia, che costituiscono l'output di questa prima fase del modello. In Figura 4.8 si riporta a titolo di esempio il profilo di marcia di un treno dell'autostrada viaggiante fra PM Cameri e il fascio di Novara Boschetto. Si nota che in generale i treni mantengono una velocità massima che si aggira sugli 80 km/h. Risentono un po', ma in maniera verosimile, per la massa elevata in fase di accelerazione (considerato treni lunghi da 740 m). In alcuni punti si registra una velocità molto bassa, dovuto al fatto che su alcune deviate è impostato il limite a 10 km/h. Questo limite deriva dalle "Specifiche tecniche di circolazione dell'orario, RFI" in cui è indicato che per alcuni treni con sagoma P/C 80 circolanti sulla Domodossola-Novara, per via del particolare rodiggio, hanno l'obbligo di percorrere a 10 km/h i deviatoli che normalmente sarebbero percorribili a 30 km/h.

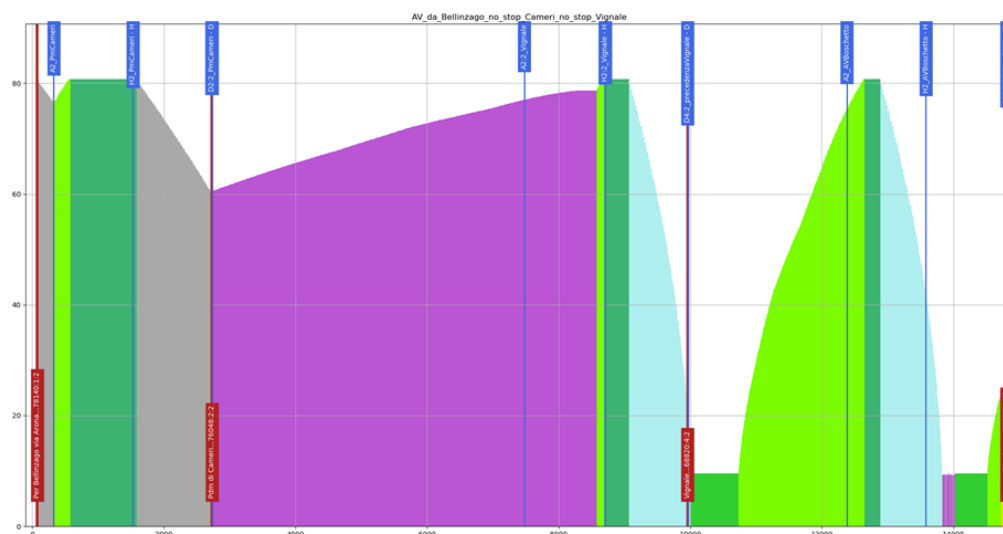


Figura 4.8 Profilo di marcia di un treno dell'autostrada viaggiante.

Come detto la velocità massima registrata si aggira sugli 80 km/h. La velocità massima in linea è comunque limitata a 90 km/h (linea rossa, Figura 4.9) a causa delle limitazioni inerenti al grado di frenatura come da Tabella B⁶⁵ della PGOS. Se sulla linea in esame fosse attivo il blocco automatico a correnti codificate, il limite sarebbe pari a 120 km/h (linea blu Figura 4.9, e il programma simulerebbe di conseguenza). Da entrambe le linee afferenti, fino a Vignale compresa, si ha però il blocco elettrico conta-assi, mentre da Vignale a Novara si ha il blocco elettrico automatico BAcf.

A valle di tutte queste osservazioni si può concludere che l'elevata massa dei convogli, lunghi fino a 740 metri, non costituisce un limite alla circolazione, neppure quando si prendono in considerazioni valori molto alti, prossimi al limite massimo teorico.

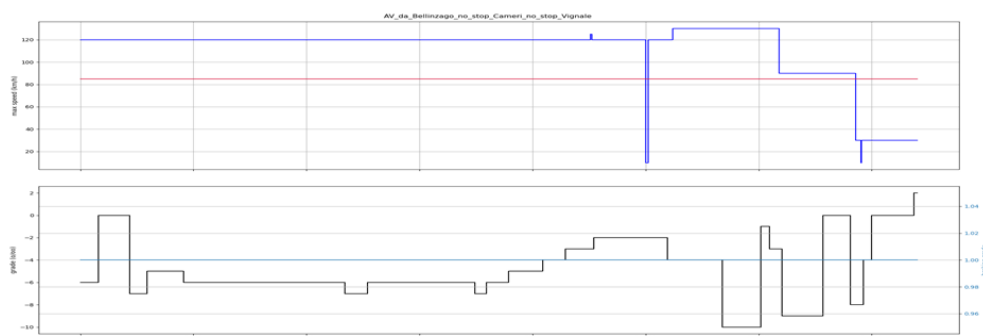


Figura 4.9 Velocità massima sulla linea.

⁶⁵ Tabella B PGOS: indica la velocità massima assoluta ammessa, funzione del tipo di freno, grado di frenatura della linea e percentuale di massa esistente nel treno.

4.4.2 Generazione automatica di un orario fattibile

La generazione automatica di orari ferroviari è in generale un problema classico della Ricerca Operativa, prevede vincoli e algoritmi di una complessità non indifferente, che esulano dagli obiettivi e dalle competenze della tesi. Lo strumento di calcolo utilizzato dal pacchetto SASTRE si basa su un modello di Programmazione Lineare Misto-Intera (MILP). Per maggiori dettagli sul modello si rimanda la lettura all'Appendice 1 di (Coviello N. , 2018) .

Rientrando invece nell'ambito dei Trasporti, è opportuno specificare che a differenza del modello microscopico della prima fase, in cui l'elemento fondamentale era la parte topologica, l'*elemento base* della generazione di un orario fattibile è il **circuito di binario**, chiamato TDS in SASTRE, *Track Detection Section* (Coviello N. , 2018). Seguendo la Teoria di "Occupazione delle Sezioni di Blocco" (Capitolo 3), i circuiti di binario (tds) possono essere utilizzati da un solo treno alla volta. L'utilizzo di un tds inizia nell'istante in cui il sistema di segnalamento lo riserva per un certo treno e finisce quando la coda del treno in questione abbandona il tds ed il sistema di segnalamento lo riconosce come libero. A questo punto il tds può essere riservato (e dunque utilizzato) da altri treni. I tds che compongono una sezione di blocco vengono riservati contemporaneamente, ma sono rilasciati separatamente, man mano che la coda del treno libera ciascun tds ("rilascio elastico", Capitolo 3 Un orario è fattibile – privo di conflitti di circolazione – quando in nessun tds sono presenti accavallamenti tra i periodi di utilizzo dei treni che lo percorrono. In Figura 4.10 si propone un esempio grafico per illustrare quanto appena detto, estratto direttamente dal modello in SASTRE. Come da Figura 4.10 (a) tutta l'infrastruttura risulta composta da circuiti di binario (tds, etichette viola). Distinguiamo nella stazione di PM Cameri le sezioni di blocco H1-D1 e H2-D2, ciascuna delle quali formata da più tds (Figura 4.10 b): H1-D1 da tds375 e tds379; H2-D2 da tds380 e tds379. Allora, dalla Figura 4.10 (c), che riporta il diagramma di Gantt⁶⁶ del tratto in esame, si può osservare che i

⁶⁶ Il diagramma di Gantt rappresenta il tempo di occupazione di ciascun tds per ogni treno pianificato. Come per l'orario grafico, si tratta di un diagramma spazio – tempo, con in ordinata lo spazio (a sinistra: tds, a destra: località) e in ascissa il tempo (parte superiore: ore progressive della giornata, parte inferiore: tempo in secondi). L'occupazione di un treno, è dunque rappresentata con un rettangolo colorato formato da una parte più trasparente e una opaca. La parte trasparente indica il tempo per il quale un tds è riservato al passaggio dello specifico treno, mentre la parte opaca indica il tempo di occupazione fisica effettiva del tds da parte del treno. L'insieme dei rettangoli di occupazione di tutti i tds attraversati da un treno, definiscono l'occupazione dei tds per una corsa.

tds di una stessa sezione di blocco sono riservati contemporaneamente, uguale tempo di inizio occupazione. Si nota infatti che in direzione Vignale – PM Cameri il tempo di inizio occupazione si resetta in corrispondenza del tds375 (cambia sezione di blocco, inizio H1-D1), mentre nella direzione opposta lo stesso accade fra il tds379 (fine H2-D2) e tds375 (inizio nuova sezione di blocco).

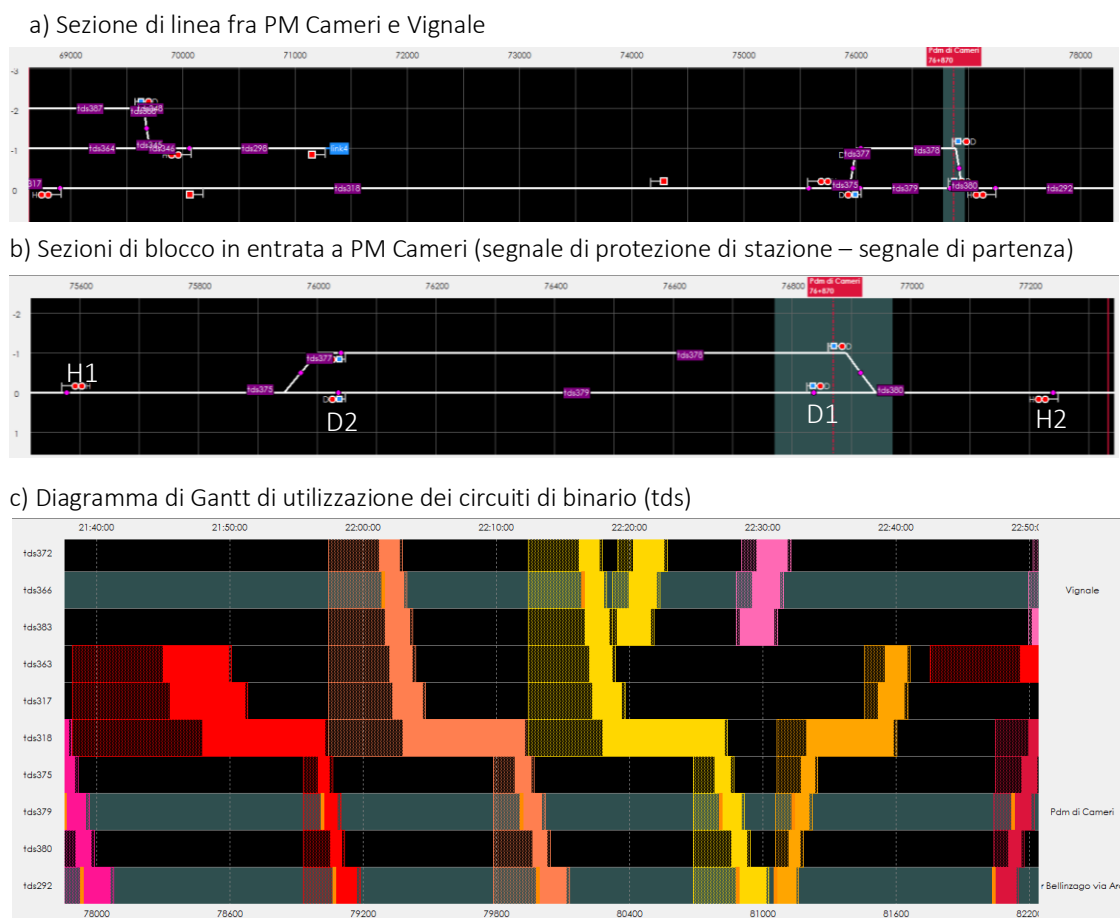


Figura 4.10 Circuiti di binario (tds) in SASTRE.

In questa prima fase non è prevista la saturazione dell'orario, ma soltanto la sua generazione dalle corse inserite al primo passo (modello di esercizio). La saturazione, come vedremo nella prossima sezione, prevede invece la generazione di nuove corse a partire da quelle date in input.

4.4.3 Ottimizzazione dell'orario: saturazione

La saturazione dell'orario, realizzata sempre in ambiente SASTRE, si avvicina molto a quella eseguita in (Coviello, Pellegrini, Sobieraj, & Rodriguez, 2017). In particolare, basandosi sul modello microscopico inserito nella prima fase, un algoritmo massimizza il numero di corse aggiuntive saturanti, inserite nell'orario originale, all'interno di una finestra temporale. La finestra temporale è definita come l'intervallo di tempo in cui l'algoritmo può pianificare il tempo di ingresso di una corsa saturante sull'infrastruttura considerata. Le corse che appartengono all'orario originale sono fisse e non possono essere modificate durante la saturazione. La finestra temporale, il set di corse saturanti, l'ordine di saturazione ed eventualmente il numero massimo di corse da inserire, sono dati di input. L'output è rappresentato invece dall'orario saturato e fattibile, che per come è stato ottenuto in questa fase è nominale e di fatto teorico, non considerando buffer time fra due treni consecutivi. Rappresentano cioè una situazione critica per la stabilità dell'orario, poiché un minimo ritardo di un solo treno potrebbe causare un conflitto. Questo può essere evitato (o almeno limitato) programmando un buffer time minimo tra i treni. Il buffer time è definito come il tempo minimo che deve sempre separare, in ciascun circuito di binario e per ogni coppia di treni consecutivi, la fine dell'utilizzo del primo treno dall'inizio di utilizzo del secondo (Coviello, Pellegrini, Sobieraj, & Rodriguez, 2017).

A quanto detto, si aggiungono le seguenti considerazioni, specifiche del caso in esame:

- eseguendo la saturazione, si assume che la **capacità globale** disponibile sia utilizzata al 100%;
- la saturazione è stata eseguita in modo **asincrono**: le corse con la priorità più alta vengono simulate per prime e i conflitti tra di loro vengono risolti con una strategia “primo arrivato, primo servito”; le occupazioni infrastrutturali risultanti vengono archiviate. Quindi il processo viene ripetuto per ciascun gruppo prioritario, saturando sempre di più le finestre temporali ancora inutilizzate;
- durante le saturazioni si rispetta il numero di tracce merci attuali (limite minimo di tracce saturanti da inserire), ma non il loro ordine di circolazione. Questo è supportato dalla letteratura (UIC, 2013), (Hansen & Pachl, 2014), (Coviello N. , 2018), ecc., secondo la quale, nel caso di interventi infrastrutturali di maggiore entità, è appropriato prendere in considerazione modifiche massicce dell'orario d'esercizio o *in extremis* di considerarne uno completamente nuovo;

- nel definire il tracciato delle corse si è incluso anche il terminal del CIM, a fronte delle considerazioni fatte nella sezione 4.2 relative all'area di studio e agli effetti di rete;
- le corse saturanti sono definite come **coppie di treni** (andata/ritorno) allo scopo di omogenizzare la circolazione in entrambe le direzioni di marcia;
- durante la saturazione, la finestra temporale *globale* è scomposta in **sottofinestre**, per ridurre la complessità computazionale e omogenizzare la circolazione su tutte le ore della giornata.

4.4.3.1 Fasi operative di saturazione

Le fasi operative si possono così schematizzare:

- definizione della finestra oraria *globale* di saturazione⁶⁷ (22 h);
- definizione e ancoraggio delle corse passeggeri dell'orario originale;
- definizione dell'insieme delle corse saturanti;
- tipo di materiale rotabile, associate ad un percorso (sequenze di Parti Topologiche);
- tempi di arrivo e partenza programmati, così come i minimi tempi di sosta da rispettare;
- definizione della priorità di saturazione delle corse;
- definizione, se opportuno, del limite di saturazione (n° massimo corse saturanti).

Si ritiene utile riportare “come” sono stati definiti i tempi di sosta e le priorità delle corse saturanti, data l'importanza di questi parametri sulla logica di circolazione dei treni nell'area di studio. La particolarità di quest'area, come già menzionato, è che Novara Boschetto e il CIM costituiscono di fatto un *nodo* simile ai nodi passeggeri, ma con attività diverse al suo interno. Attività che richiedono tempi di attesa specifici della logistica dei trasporti merci, mentre le priorità delle corse saturanti determinano l'ordine di esecuzione delle attività. Ad esempio, imponendo la saturazione prima del CIM e poi del fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto, di fatto si sta assumendo che i treni merci adibiti a TCnA vengano prioritariamente “lavorati” (scaricati e caricati) e solo in secondo luogo fatti aspettare sui binari di stazionamento del fascio arrivi/partenze. Così impostato il

⁶⁷ Vincolo che all'atto pratico è stato rilassato, dando la possibilità di inserire alcune tracce anche oltre le 22 ore.

problema, si riproducono in prima approssimazione le dinamiche reali del nodo considerando allo stesso tempo l'interazione con la rete nella quale si inserisce.

Modellizzazione dei tempi di attesa nel fascio A/P, terminal autostrada viaggiante (TCA) e CIM, binari di precedenza/deviata in stazione:

- terminal autostrada viaggiante RoLa (scarico + carico + verifica treno + tempo cuscinetto per altre eventuali operazioni): 1 - 1,5 ore⁶⁸;
- CIM (scarico + carico + verifica treno + tempo cuscinetto per altre eventuali operazioni): 5 - 10 ore⁶⁹;
- fascio arrivi/partenze Novara Boschetto (stazionamento): 1 - 10 ore⁷⁰;
- Binari di precedenza o di deviata in stazione: 5 - 20 minuti.

Priorità delle corse merci e limiti di saturazione:

1. Autostrada viaggiante, trasporto merci TCA:
 - a. 11 coppie da Borgomanero (attuali);
 - b. 8 coppie da Oleggio (modello di esercizio RFI al 2020, 16 treni sulla rete Oleggio-Novara);
2. CIM, trasporto merci TCnA:
 - a. 28 coppie (potenzialità propria del CIM⁷¹);
3. fascio A/P Novara Boschetto, trasporto merci TCnA:
 - a. nessun limite, saturazione fino al raggiungimento del 100% della capacità globale disponibile.

Negli scenari con la bretella, è stato imposto all'algoritmo di saturazione, la priorità di far passare i treni merci con origine/destinazione Novara Boschetto o CIM prima dalla bretella, e solo dopo aver raggiunto il suo limite di capacità da Novara Centrale.

⁶⁸ Non si è avuta informazione diretta del terminal di Novara Boschetto, ma il dato deriva dallo “*Studio di prefattibilità dell’autostrada viaggiante del Valico di Mestre, Regione Veneto*”.

⁶⁹ Valori mediati dei dati provenienti dal Responsabile di Manovra di Eurogateway (società che gestisce il terminal intermodale CIM e Novara Boschetto).

⁷⁰ Valori medi ricavati dal M53 di Novara Boschetto.

⁷¹ 28 treni da lavorare dentro il CIM in 22 h: il CIM ha 7 binari, quindi corrisponde a 4 treni al giorno/binario.

4.4.4 Valutazione della capacità: KPIs

Valutare la capacità si traduce dal punto di vista pratico nell'analisi dell'orario d'esercizio saturato. È essenziale a questo scopo definire gli indicatori o le unità di misura - KPIs (*Key Performance Indicators*) - per mezzo dei quali si vogliono misurare le prestazioni di capacità. Nel caso in esame si è deciso di effettuare la valutazione mediante due indici di prestazione:

- i. numero di coppie treni, classificati per:
 - tipologia di trasporto:
 - passeggeri - REG;
 - trasporto merci TCA;
 - trasporto merci TCnA;
 - origine/destinazione:
 - da/per Borgomanero;
 - da/per Oleggio;
 - da/per CIM;
 - da/per Novara Boschetto (fascio arrivi/partenze + terminal autostrada viaggiante);
 - da/per Novara (solo regionali);
 - finestra temporale:
 - giornaliera;
 - distribuzione oraria;
- ii. tasso di occupazione dell'infrastruttura.

Il primo indice offre un'indicazione nominale della capacità. Data la sua semplicità non ci soffermiamo sulle modalità di calcolo (output diretto della saturazione), ma ne vedremo solo i risultati. Il secondo indice invece è utilizzato per un'analisi dei colli di bottiglia, mirata all'identificazione degli elementi infrastrutturali critici che dovrebbero essere modificati od ottimizzati. L'ottenimento di questo indice comporta un ulteriore step di calcolo che vede l'applicazione del "Metodo di compressione dell'orario" UIC 406.

Nella valutazione dei risultati non si considerano i tempi globali di viaggio dei treni perché per traffico merci è di secondaria importanza.

L'occupazione infrastrutturale è uno dei principali criteri di valutazione del rendimento e della qualità del servizio offerto da un orario d'esercizio ferroviario (Goverde &

Hansen, 2013). È un indice però che dev'essere trattato con cura, perché può portare ad un'interpretazione ambigua dei risultati. Per questo motivo, si vogliono dare nei prossimi paragrafi delle indicazioni in più sull'approccio utilizzato.

4.4.4.1 Occupazione dell'infrastruttura

L'occupazione dell'infrastruttura o dei binari è la quota di tempo necessario a far circolare i treni su una determinata infrastruttura ferroviaria secondo un determinato schema orario. Misura per quanto tempo l'infrastruttura è occupata da uno schema orario. Per una data infrastruttura (compresi i sistemi di sicurezza e segnalamento) e periodo di tempo, l'occupazione dell'infrastruttura quantifica il consumo di capacità di tre principali parametri di progettazione dell'orario: il numero di treni, la velocità media del treno e l'eterogeneità del traffico (Goverde & Hansen, 2013). Ovviamente, più treni sono in programma e più capacità viene consumata. Ma anche velocità più elevate consumano capacità poiché ciò comporta distanze di frenata più lunghe e quindi treni che si susseguono a distanze maggiori tra loro. In terzo luogo, le differenze di tempo di percorrenza consumano capacità poiché un treno veloce deve mantenere un elevato distanziamento dal precedente treno lento per evitare di raggiungerlo dove non è possibile sorpassare.

$$OTR (\%) = \frac{\text{Tempo occupazione infrastruttura}}{\text{Finestra temporale}}$$

L'occupazione dell'infrastruttura su una sezione di linea può essere calcolata utilizzando il metodo di compressione dell'orario UIC 406. L'occupazione dell'infrastruttura si basa sulla teoria dei tempi di occupazione delle sezioni di blocco che modella l'intervallo di tempo in cui le sezioni di blocco o gli scambi sono assegnati esclusivamente a un treno e quindi bloccati per altri treni. I successivi tempi di occupazione su una linea tra due stazioni danno, in un diagramma temporale, la “scala” di occupazione per un treno. Spingendo le “scale” per tutti i treni successivi, l'uno contro l'altro, si ottiene un orario compresso con il tempo minimo necessario per eseguire lo schema orario, come visto al Capitolo 3. La compressione viene effettuata considerando ciascuna *compression section*⁷² alla volta, rispettando il minimo distanziamento tra due tracce in quei circuiti di binario e **trascurando possibili conflitti in cdb esterni**. L'ordine di utilizzazione dei cdb da parte

⁷² Compression section: insieme non ordinato di circuiti di binario, *cdb*, per il quale si vuole analizzare la capacità.

delle corse viene conservato durante la compressione. Alla fine della compressione, ciascuna coppia di corse si toccherà in un cdb (o in più di uno), che quindi può essere considerato "critico" per quella coppia di corse, e non in generale. Il cdb critico a livello generale sarà quello con l'occupazione maggiore.

Poiché la compressione viene eseguita solo sulla sezione specificata trascurando i conflitti esterni, l'occupazione infrastrutturale è un buon indice per valutare la capacità consumata, mentre lo è meno per la valutazione di quella disponibile. Affinché i risultati della compressione abbiano significatività, è necessario scegliere con cura le sezioni di compressione. (Landex, Capacity at Railway Stations, 2011) riporta alcuni esempi in cui dimostra come può essere ingannevole applicare il metodo della compressione in corrispondenza di incroci, precedenze e stazioni se si divide la sezione proprio in questi punti, risultandone un consumo di capacità improprio e più basso (Figura 3.16). Nello stesso (UIC, 2013) si riportano dati incerti e non del tutto confermati per le valutazioni di capacità dei nodi, come riportato al Capitolo 3.

Prendendo spunto da (Landex, Kaas, Schittenhelm, & Schneider-Tilli, 2006) si conclude osservando che a causa del rilassamento dei vincoli, man mano che si riducono le dimensioni delle sezioni (trascurando conflitti esterni), l'indicazione sulla capacità consumata e disponibile della sezione in esame risulta contestuale alla più ampia area in cui si inserisce. Per questo stesso motivo e per la molteplicità di parametri incidenti⁷³ non normalizzati, si considera che le capacità di tratti topologici diversi non sono paragonabili a priori e in termini assoluti, ma sempre in modo relativo⁷⁴.

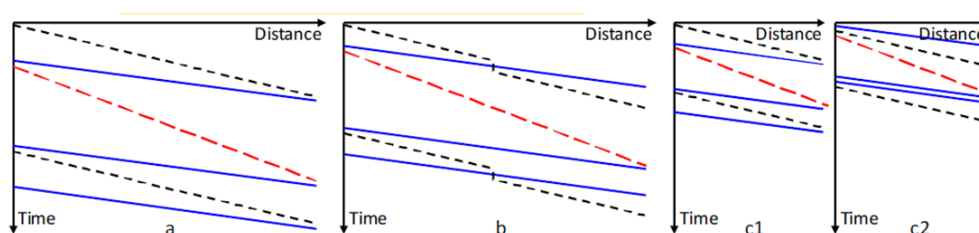


Figura 4.11 Consumo capacità di: a) sezione di linea; b) linea con precedenza; c) linea divisa in corrispondenza della precedenza (Landex, Capacity at Railway Stations, 2011).

Nel caso di studio della tesi, si segue dunque una logica di valutazione della capacità che va aumentando progressivamente il livello di dettaglio, partendo dalla valutazione di

⁷³ Caratteristiche infrastrutturali della linea, caratteristiche del materiale rotabile, parametri operazionali, ecc.

⁷⁴ Relativo al contesto in cui si inseriscono e ai parametri incidenti.

macroaree fino a tratti **microscopici** di infrastruttura (Figura 4.12), allo scopo di contestualizzare ad ogni passo le sezioni prese in esame.

Gli output della valutazione di capacità, esposti nella sezione relativa ai *risultati*, rappresentano i risultati finali dello studio di capacità del nodo merci di Novara, sulla base dei quali si valuta il raggiungimento degli obiettivi esposti all’inizio del capitolo.

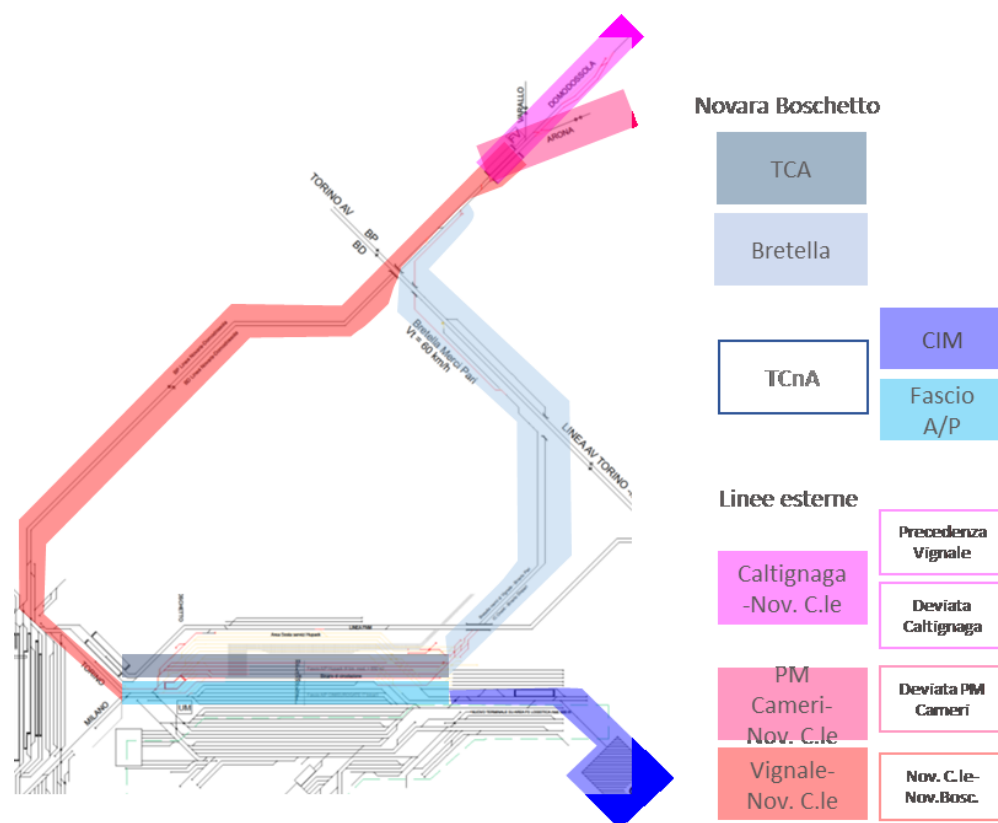


Figura 4.12 Suddivisione aree di compressione (*compression sections*): Novara Boschetto e le Linee esterne sono le due principali macroaree, all’interno delle quali possiamo distinguere delle *meso* (TCA, bretella, TCnA, Caltignaga-Vignale/PM Cameri/Novara Centrale) e delle *micro-sezioni* (CIM, fascio a/p, precedenza Vignale, binario di stazione in devziata a Caltignaga/PM Cameri, tratto di accesso Novara Centrale-Novara Boschetto).

4.5 Risultati

In questa sezione si considerano i risultati delle analisi di capacità degli scenari 1, 2, 3 e 4. Poiché i dati relativi allo scenario 0, quello attuale (Capitolo 2, situazione attuale), non provengono da un’analisi simulativa, ma sono estratti direttamente da fonti RFI, non sono a priori confrontabili con gli altri scenari (1, 2, 3 e 4) che invece sono stati simulati. Per questo motivo si fa un uso puramente indicativo dei dati dello scenario 0 e relativo

soltanto al primo indice di prestazione (*numero di tracce*). La scelta di non simulare tale scenario è in linea con gli obiettivi della tesi: indagare se, e in quale misura, gli interventi infrastrutturali programmati da RFI riescano ad accogliere la domanda attuale e futura. Dunque, le analisi sono state eseguite avendo come principale *focus* il dimensionamento - in termini di *capacità pratica* massima (senza buffer time)⁷⁵ - e la stima dell'*utilizzazione* degli elementi infrastrutturali di nuova costruzione contestualmente alla rete in cui si inseriscono. Conseguentemente sono stati valutati anche gli incrementi di capacità globale prodotti da ciascun intervento, tenendo presente che non vi erano particolari obiettivi da raggiungere in questo senso: garantire un'offerta pari ad almeno la domanda attuale e studiare la fattibilità del *Modello di Esercizio al 2020*. L'ulteriore capacità disponibile, se generata, non rientra fra i principali obiettivi di RFI e quindi nemmeno di quelli del caso di studio della tesi. Tuttavia, nelle saturazioni dell'orario senza buffer time si è registrata una capacità globale non indifferente che ha dato spunto a interessanti riflessioni riportate nella prima parte di discussione dei risultati. Con questa prima parte, in cui si presentano i risultati relativi al KPI *coppie treni/giorno*, si vuole dare un'indicazione generale della capacità sulle diverse direttrici dell'area di studio. Indicazione utile ad orientare ed introdurre l'analisi di dettaglio eseguita nella seconda parte per mezzo dell'indice *occupazione infrastrutturale*, che conduce alle valutazioni finali sul raggiungimento o meno degli obiettivi degli interventi.

4.5.1 Coppie di treni/giorno

In Tabella 4.7 si riporta una panoramica delle *coppie treni/giorno*, classificati per località e tipologia di trasporto (TCA, TCnA). La prima voce in tabella indica il totale di coppie treni/giorno, comprendendo sia treni passeggeri che treni merci. Si ricorda che nella saturazione sono stati presi in considerazione soltanto questi ultimi, lasciando invariato il numero di treni passeggeri rispetto allo scenario 0:

- 9 coppie di treni passeggeri da/per Caltignaga;
- 7 coppie di treni passeggeri da/per PM Cameri.

⁷⁵ *Capacità pratica* perché si tiene conto del contesto in cui ciascun intervento infrastrutturale si inserisce, e dunque degli *effetti di rete*. Di questo modo la capacità è un valore contestuale e concreto, non astratto dalla realtà dell'esercizio ferroviario. Si ritiene vantaggioso un approccio di questo tipo, che evita di sovra o sottostimare la capacità.

Tabella 4.7 Coppie treni/giorno, per località e tipologia di traffico merci, senza buffer time (bt0)

		Scenari bt0 (coppie treni/giorno)				
		0	1	2	3	4
Caltignaga	Totale	29	39	41	43	45
	TCA	9	11	11	11	11
	TCnA	11	19	21	23	25
PM Cameri	Totale	18	44	43	43	44
	TCA	0	8	8	8	8
	TCnA	11	29	28	28	29
Vignale	Totale	47	83	84	86	89
	TCA	9	19	19	19	19
	TCnA	22	48	49	51	54
Nov. Bosc.	Totale	41	67	68	70	73
	TCA	9	19	19	19	19
	TCnA	32	48	49	51	54

La prima osservazione che si fa, con riferimento anche alla Figura 4.13, è che il maggior Δ di capacità - in termini di *coppie treni/giorno* - lo si ha fra lo scenario 0, quello attuale e non analizzato con il metodo di simulazione, e lo scenario 1. Questo grande Δ può essere motivato appunto dall'applicazione della simulazione e saturazione dell'orario, che è stata eseguita in questa prima fase senza considerare parametri di qualità come i buffer time. Quella ottenuta dalla saturazione è dunque una capacità massima, poco *pratica*, che andrebbe affinata con l'introduzione di buffer time e con uno studio dei ritardi per provarne la stabilità. È comunque molto utile fare un'analisi anche in questi termini, per dimensionare gli elementi infrastrutturali e avere un'idea della loro potenzialità di utilizzo. Questo si addice bene al caso di studio in esame, in cui si analizzano modifiche infrastrutturali che comprendono nuovi elementi, come la bretella di collegamento fra Novara Boschetto e Vignale o i binari di precedenza in Vignale.

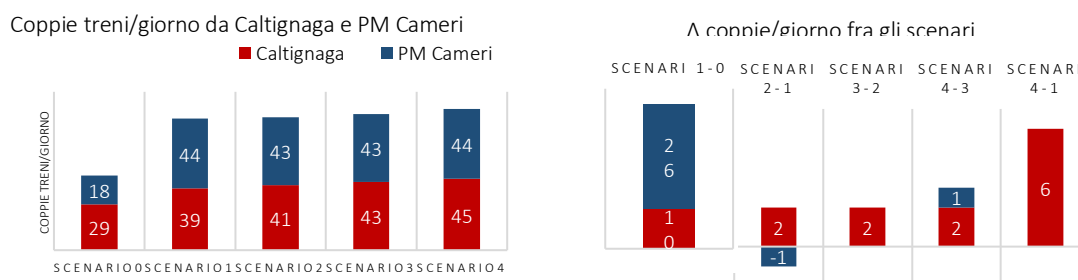


Figura 4.13 Numero di coppie di treni/giorno da Caltignaga e PM Cameri e Δ fra gli scenari.

Per cercare di fare luce sulle cause alla base dell'elevato Δ di capacità fra lo scenario 0 e lo scenario 1 si è andato a indagare (in maniera approssimata) su come è stato ottimizzato l'orario, e dunque la circolazione, per massimizzarne il numero di corse. Si è valutato, in prima ipotesi, se l'ottimizzazione della circolazione è ricollegabile ad una riduzione dei tempi di percorrenza in linea, per effetto dell'introduzione dei nuovi elementi infrastrutturali. I risultati da questo punto di vista sono negativi, come si può vedere in Tabella 4.9 le corse dirette⁷⁶ che percorrono la bretella con origine/destinazione Novara Boschetto hanno complessivamente tempi di percorrenza leggermente superiori rispetto al tratto attuale via Novara Centrale. La differenza è in generale trascurabile (considerata la natura del traffico prettamente merci) ad eccezione del caso delle corse dirette Momo – Novara Boschetto che non usano la bretella. In questo caso, il minor tempo di percorrenza è dovuto al non attraversamento di deviatori in Vignale che, in tutti gli altri casi, ne limitano la velocità e dunque allungano i tempi di percorrenza. Dalla Tabella 4.9 emerge, in aggiunta, che le corse programmate a sostare, o su un binario di precedenza in Vignale o su un binario di deviateda nelle stazioni di Caltignaga o PM Cameri, presentano nel caso “si bretella” maggiori tempi di percorrenza, ad indicare che i treni sostano su questi binari per più tempo. Inoltre, confrontando in generale i tempi di sosta su questi binari fra lo scenario 0 (massimo 5 minuti di sosta) e lo scenario 1 (Tabella 4.9), in quest'ultimo caso i tempi sono più elevati⁷⁷. Dunque, cercando di ottimizzare l'orario allo scopo di massimizzare il numero di corse saturanti prima sulla bretella e poi su tutta la rete, l'algoritmo prevede tempi di sosta maggiori sulle precedenze o sui binari di deviateda in stazione, ad indicare che questi elementi effettivamente contribuiscono all'incremento della capacità globale. A solo scopo informativo, si sono riportati in **Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.** i tempi di percorrenza dello scenario attuale (non simulato) estrapolati dagli M53, tempi programmati reali. Si può, confrontando questa tabella con la precedente, affermare che i valori di percorrenza ottenuti con le simulazioni sono congrui alla realtà dell'esercizio. Le piccole differenze sono dovute, oltre ai motivi visti alla sezione 4.4.1.1 relativa al Materiale Rotabile, al fatto che negli scenari simulati le linee sono leggermente prolungate lato Caltignaga e PM Cameri, in direzione della prima

⁷⁶ Corse dirette: corse senza fermata su alcun binario di precedenza o in stazione.

⁷⁷ Negli scenari saturati, il tempo di sosta è stato impostato entro i limiti 5 – 20 minuti.

stazione successiva verso nord, mentre il tempo di percorrenza nello scenario 0 è calcolato strettamente fra le località di Caltignaga/PM Cameri e Novara Boschetto.

Il risultato di questa breve analisi relativo all’impatto della bretella sulla circolazione di linea non contrasta la validità dell’intervento, il cui obiettivo principale non è agevolare la circolazione (la circolazione è funzione della massimizzazione del numero corse), bensì quello di liberare il tratto Vignale – Novara Centrale dal traffico merci. Obiettivo che come vedremo nella sezione successiva è invece raggiunto efficacemente.

Tabella 4.8 Tempi medi di percorrenza dello scenario 0 (M53, RFI).

Tempi medi di percorrenza: scenario 0			
		media	σ
diretto	Caltignaga - NB	00:13:30	00:03:05
diretto	NB - Caltignaga	00:14:35	00:02:36
con stop		00:19:09	00:00:21
diretto	PM Cameri - NB	00:23:15	00:03:25
diretto	NB - PM Cameri	00:13:30	00:00:30
con stop		00:21:00	00:03:14

Le principali cause dell’elevato Δ corse fra lo scenario 0 e lo scenario 1, sono allora da ricercare fra i seguenti fattori: sovrastima della capacità eseguendo la saturazione della rete senza considerare buffer time; sottoutilizzo della rete attuale (capacità disponibile); razionalizzazione della circolazione nella fase di saturazione dell’orario.

Per quanto riguarda i soli scenari simulati, sempre con riferimento alla Figura 4.13, osserviamo che non si registrano particolari variazioni di capacità globale fra uno scenario e l’altro. Ciò nonostante, la tendenza delle coppie di treni/giorno è crescente, ad indicare che gli interventi producono in ogni caso un effetto positivo. Soltanto fra gli scenari estremi 1 - 4 si produce un incremento sensibile del numero di corse, di preciso 6 coppie treni/giorno. Per una analisi dettagliata sulle cause si rimanda alla sezione successiva, in cui si eseguirà un’analisi molto più dettagliata dell’occupazione e utilizzazione infrastrutturale.

Tabella 4.9 Scenario 2, confronto fra i tempi di percorrenza delle corse che usano o no la bretella; dirette⁷⁶; 1 stop⁷⁸.

Tempi medi di percorrenza: scenario 2							
Passa su bretella		Corse dirette		Corse con 1 stop		Tempo stop	
		media	σ	media	σ	media	σ
sì	Bellinzago - NB	00:18:01	00:00:05	00:31:02	00:06:16	00:13:01	00:03:06
no		00:17:19	00:00:01	00:24:00	00:03:13	00:06:41	00:01:36
sì	NB - Bellinzago	00:19:45	00:00:00	00:30:15	00:06:35	00:10:30	00:03:18
no		00:18:38	00:00:02	00:25:09	00:03:55	00:06:31	00:01:57
sì	Momo - NB	00:17:03	00:00:01	00:33:03	00:08:10	00:16:00	00:04:04
no		00:13:50	00:00:01	00:32:55	00:01:13	00:19:05	00:00:36
sì	NB - Momo	00:15:40	00:00:01	00:25:52	00:06:25	00:10:12	00:03:12
no		00:15:22	00:00:01	00:24:31	00:06:03	00:09:09	00:03:01

I dati di Figura 4.13 sono esposti in maniera più estesa in Figura 4.14, nella quale per ogni scenario viene specificato il numero di coppie treni/giorno per località, includendo questa volta oltre Caltignaga e PM Cameri anche Vignale (la cui capacità risulta la somma dei primi due tratti) e Novara Boschetto (numero di coppie pari a Vignale, escluse i treni passeggeri). Insieme alla classificazione del traffico per località, si fa una classificazione per tipologia di trasporto: REG sono i treni passeggeri che nell'area sono solo regionali o regionali veloci, TCA sono treni merci adibiti al Trasporto Combinato Accompagnato (autostrada viaggiante), TCnA sono treni merci adibiti al Trasporto Combinato non Accompagnato (container e semirimorchi). Si nota che in linea con le impostazioni della saturazione (4.4.3.1 Fasi operative di saturazione), fra i vari scenari simulati, gli unici valori che variano sono quelli relativi al TCnA.

⁷⁸ Anche se in alcuni casi ci sarebbe la possibilità di fermarsi due volte (es. i treni via Caltignaga, possono sostare o nella stazione di Caltignaga o sul binario di precedenza in Vignale), è stato imposto che per una corsa ci sia la possibilità di fermarsi solo in un punto, considerata la corta estensione della linea dell'area di studio.

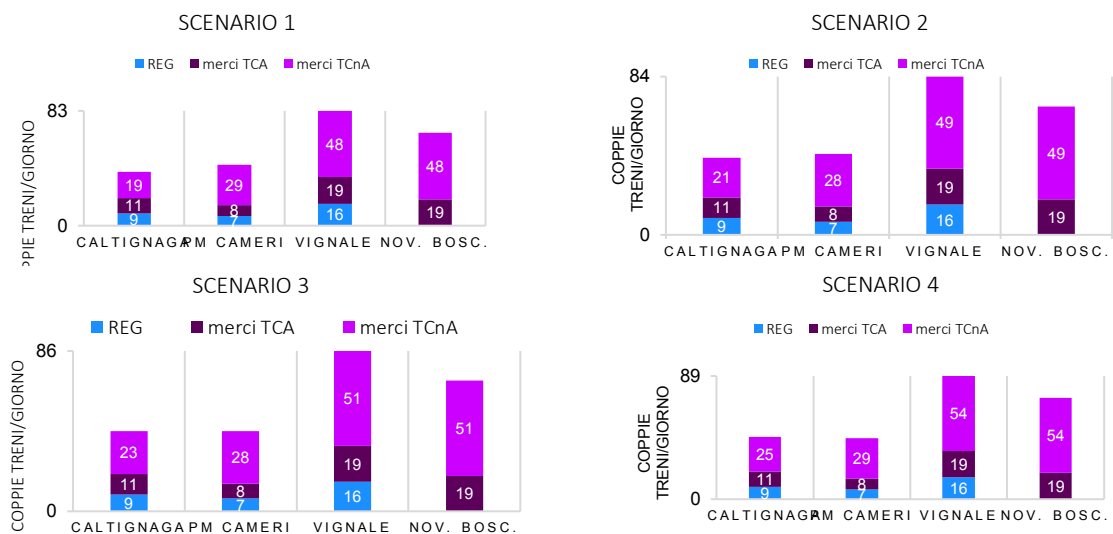


Figura 4.14 Coppie di treni/giorno per località e tipologia di traffico.

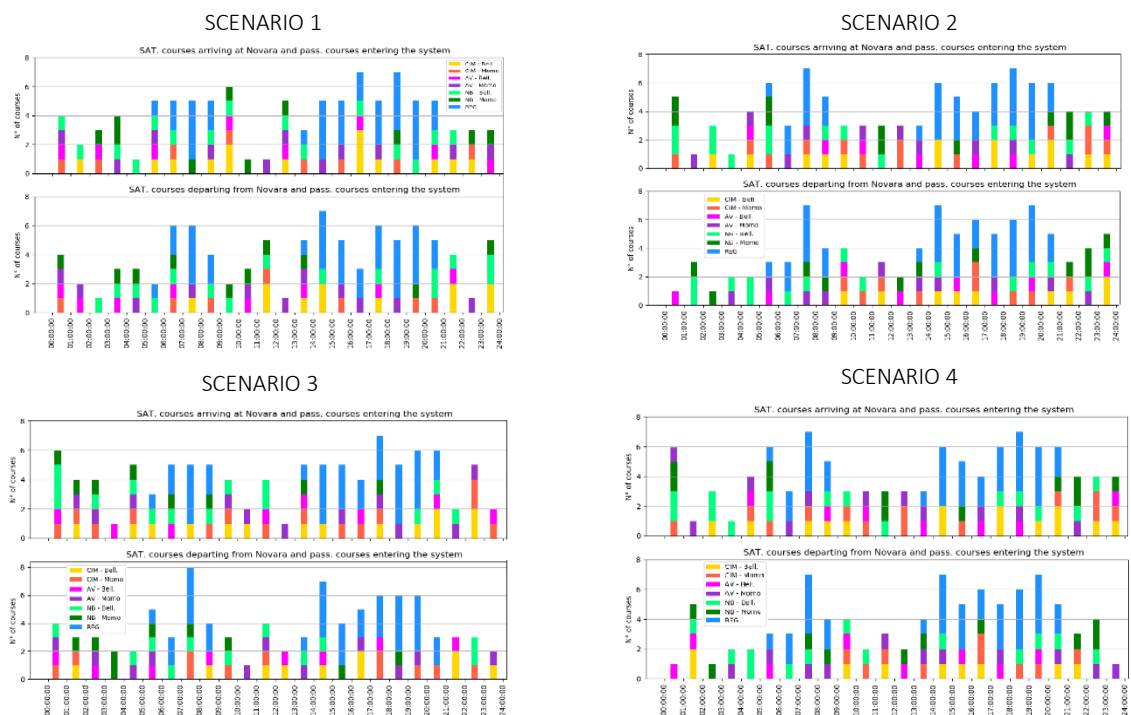


Figura 4.15 Arrivi e partenze per origine e destinazione (treni/ora).

In Figura 4.15 sono invece esposti in maniera più dettagliata gli arrivi e partenze/ora per ciascuna origine/destinazione e per ciascuna tipologia di trasporto (REG, TCA, TCnA). La tipologia di trasporto è contenuta implicitamente nell'indicazione di origine o destinazione delle corse. Con “AV” si indica il terminal dell'autostrada viaggiante in Novara Boschetto (sono quindi treni TCA); con “NB” si indicano i binari del fascio

arrivi/partenze di Novara Boschetto dedicati ad accogliere i treni TCnA; con “CIM” si indica appunto il terminal di smistamento dei treni TCnA. Osservando quindi le distribuzioni orarie degli arrivi/partenze dei grafici, non si notano comportamenti particolari, se non un loro andamento piuttosto sinuoso, con picchi negativi prevalentemente nelle fasce orarie di passaggio dei treni regionali. Questo ad indicare che in queste fasce orarie, per come è stato impostato il problema⁷⁹, la circolazione dei treni passeggeri non preclude la possibilità di introdurre tracce merci. L’omogeneità che si può notare nella distribuzione oraria è effetto delle impostazioni utilizzate nella saturazione, ovvero della suddivisione in sottofinestre di saturazione (4.4.3.1 Fasi operative di saturazione).

4.5.2 Occupazione dell’infrastruttura

Come preannunciato, in questa sezione verrà effettuata un’analisi di dettaglio in termini di occupazione dell’infrastruttura, con l’obiettivo di individuare i colli di bottiglia dell’area di studio e valutare l’impatto degli interventi caratteristici di ogni scenario.

Come spiegato in 4.4.4.1, relativamente alla metodologia utilizzata, l’analisi è stata effettuata aumentando progressivamente il grado di dettaglio per contestualizzare ogni elemento infrastrutturale ed evitare di trasmettere un’informazione ambigua sulla capacità disponibile⁸⁰. Come si può osservare dalle figure che raccolgono i risultati di *occupazione infrastrutturale* per ciascun scenario di studio: Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19, l’analisi è strutturata su tre livelli di dettaglio: leggendo i diagrammi in verticale il livello di dettaglio rimane lo stesso, mentre in orizzontale il livello di dettaglio aumenta da sinistra (macroregioni) verso destra (micro-sezioni). Eseguendo la saturazione della rete, si è assunto che la *capacità globale* disponibile sia utilizzata al 100%, dunque la capacità disponibile è contestuale a questo limite⁸¹. I risultati riportati in questi diagrammi sono espressi in termini di occupazione infrastrutturale percentuale, seguendo la definizione data in 4.4.4.1, e dal punto di vista pratico indicano per quanto tempo nell’arco delle 24 ore la corrispettiva sezione è occupata (e riservata) dal passaggio dei treni. Per l’ultimo livello di dettaglio, si è infine considerato opportuno riportare anche un’indicazione nominale delle coppie treni/giorno.

⁷⁹ Non sono stati considerati buffer time fra il distanziamento di due treni.

⁸⁰ In virtù del fatto che riducendo le “sezioni di compressione” si trascurano i conflitti esterni.

⁸¹ La capacità disponibile dell’intera area di studio alla fine della saturazione è complessivamente nulla o, se presente, non utilizzabile.

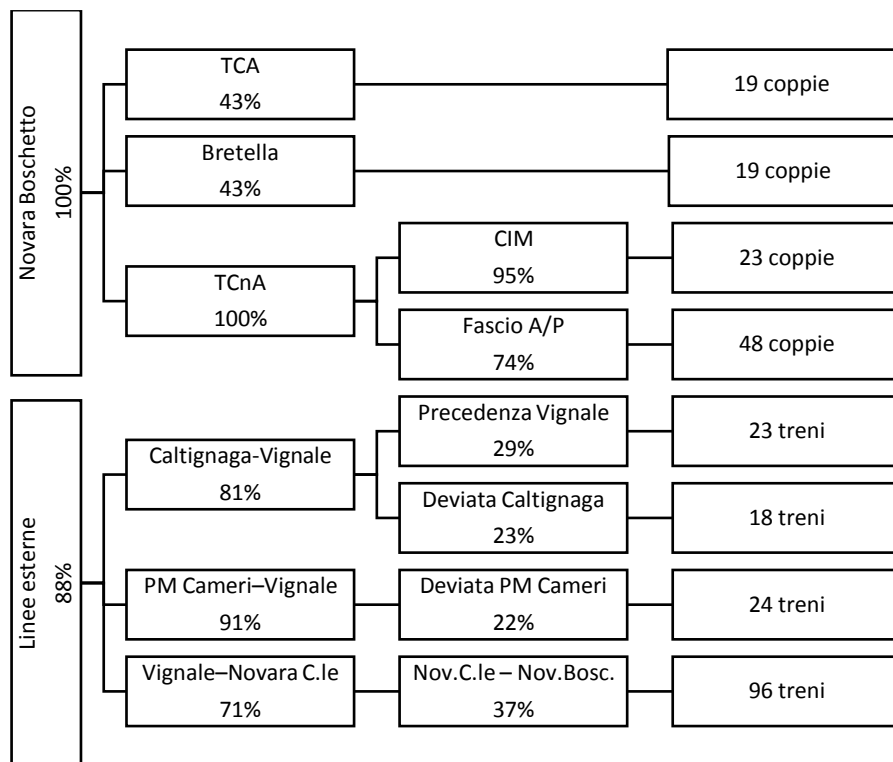


Figura 4.16 Scenario 1, occupazione dell'infrastruttura.

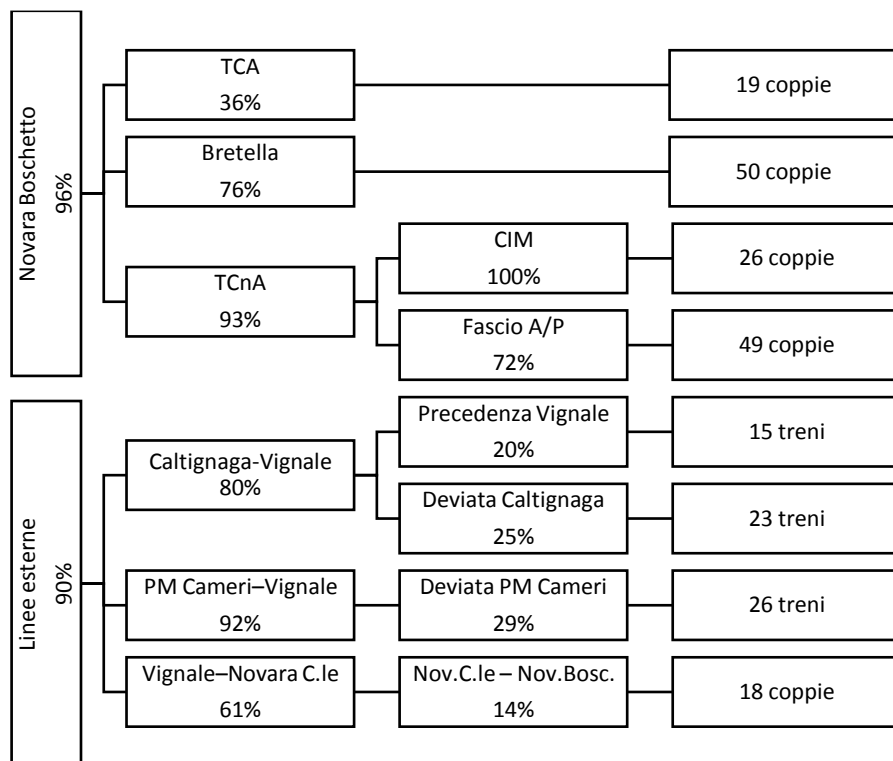


Figura 4.17 Scenario 2, occupazione infrastruttura.

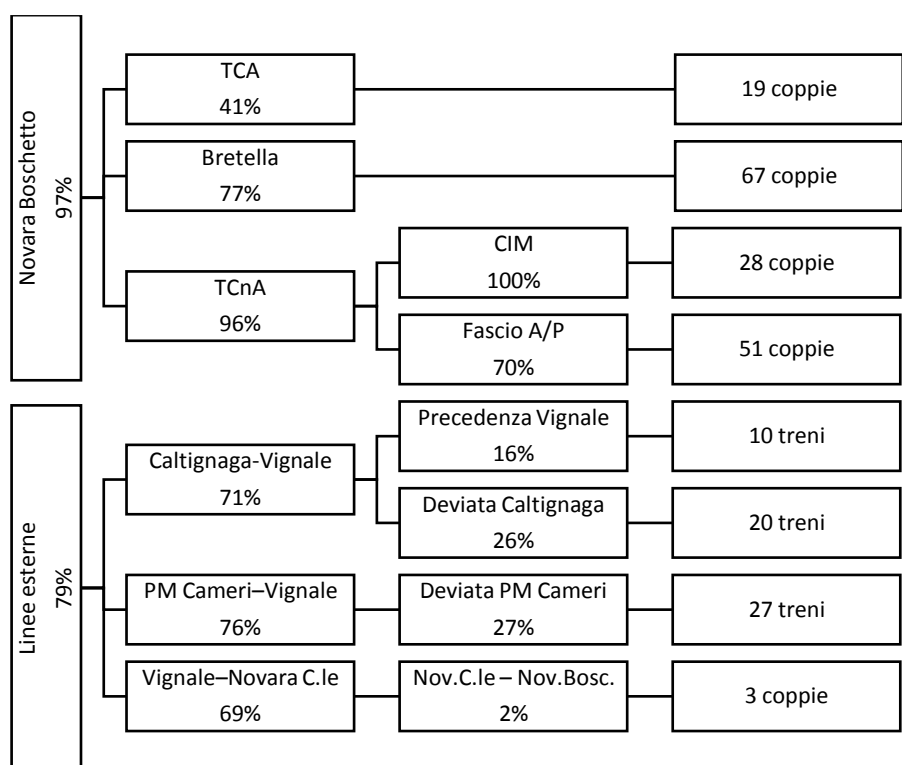


Figura 4.18 Scenario 3, occupazione infrastruttura.

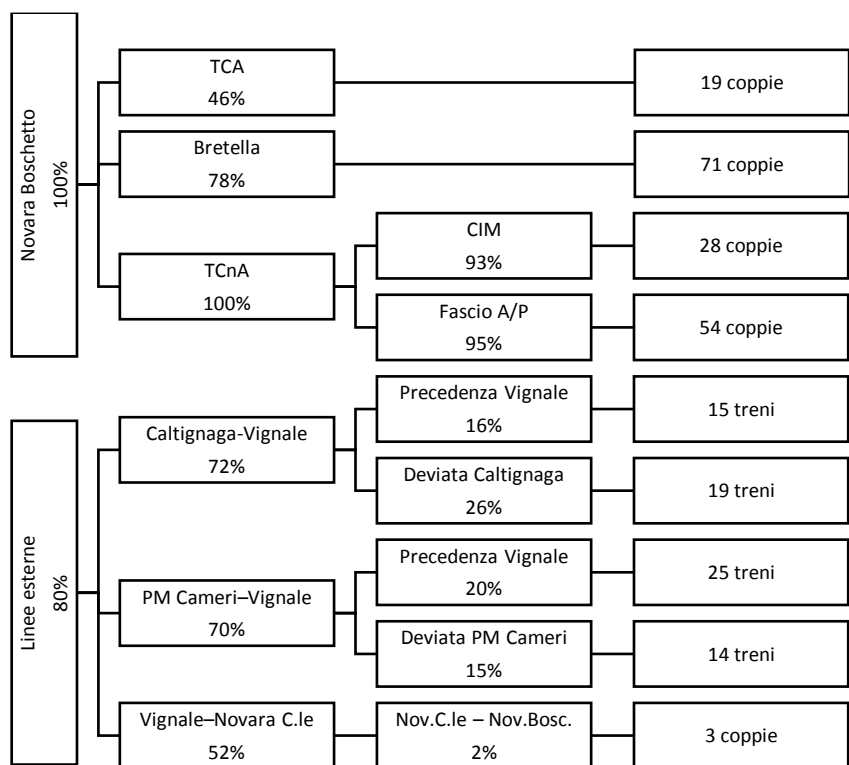


Figura 4.19 Scenario 4, occupazione infrastruttura.

A valle di questi risultati, la prima considerazione che si può fare è che sia il nodo di Novara Boschetto che i tratti di linea esterni ad esso sono molto occupati, indice di un dimensionamento piuttosto equilibrato dell'infrastruttura a livello globale. Nel caso di una sproporzione fra l'occupazione dei due elementi, ad esempio Novara Boschetto e linee esterne, si potrebbe pensare che uno dei due è *sotto* o *sovra-dimensionato*: quello con l'occupazione maggiore avrà bisogno di interventi aggiuntivi che ne incrementino la capacità disponibile o viceversa gli interventi sull'elemento in difetto di occupazione risultano sovradimensionati o non necessari.

Il primo passo da fare per identificare le unità infrastrutturali critiche alla capacità e alla circolazione nell'area di studio, e dunque quelle che fra tutte necessiterebbero di modifiche, è individuare i colli di bottiglia. Per collo di bottiglia si intende l'unità infrastrutturale il cui limite di capacità viene raggiunto per primo⁸² e che determina il limite contestualmente all'area o alla rete cui si fa riferimento. Per identificare il collo di bottiglia più critico della rete si propone l'utilizzo di un diagramma ad albero⁸³, all'interno del quale seguire sempre il ramo con il valore più alto di capacità consumata percentuale⁸⁴. Seguendo questo approccio l'unità infrastrutturale più critica risulta, in tutti gli scenari, il CIM. Essendo questo un terminal intermodale di smistamento treni⁸⁵, la criticità è dovuta a caratteristiche proprie del terminal - numero di binari, modalità di accesso, tempo di smistamento dei treni, tempo di processamento dei treni ecc. - che allo stato attuale non sono in grado di rispondere efficacemente ad una portata di traffico merci prossima a quella simulata. Volendo individuare, oltre il CIM, la seconda sezione più critica, si segue un procedimento come illustrato in Figura 4.20, eliminando il ramo del CIM (conseguentemente si elimina anche la casella TCnA, poiché a questo punto l'area risulta composta da un solo elemento, il fascio A/P: coincide con esso⁸⁶) e quindi come prima seguendo il ramo con la capacità consumata più grande. Così facendo si ricava che nello scenario 1 e 4 il collo di bottiglia, dopo il CIM, è il fascio di arrivi/partenze di Novara Boschetto, mentre negli scenari 2 e 3 il collo di bottiglia è la bretella. Allora, dato che questi elementi

⁸² Il limite è raggiunto dall'unità infrastrutturale con la più alta capacità consumata, che non necessariamente è del 100% in virtù dell'eterogeneità del traffico e dell'esistenza di corse con percorsi diversi (i blocchi di occupazione non si toccano in tutte le sezioni di blocco).

⁸³ Rimanda ai metodi di *Branch and Bound* propri della Ricerca Operativa.

⁸⁴ Capacità consumata ed occupazione infrastrutturale sono in questo caso sinonimi.

⁸⁵ Non di proprietà RFI, dunque non rientra nei progetti di intervento considerati nella tesi.

⁸⁶ Se invece avessi avuto sotto l'area TCnA 3 sotto-elementi, eliminandone uno sarebbero rimasti altri 2, e allora non avrei potuto eseguire questa semplificazione, ma avrei dovuto ricalcolare la capacità consumata dell'area TCnA privata dell'elemento eliminato, e procedere come prima a scegliere sempre il ramo con il valore maggiore.

fanno parte della rete ferroviaria di competenza RFI, desiderando un eventuale aumento di capacità, si potrebbe pensare ad un intervento aggiuntivo su di essi. I valori di occupazione dell'infrastruttura per i due elementi, *fascio A/P* e *bretella*, sono confrontabili in tutti gli scenari, ma in vista di un ulteriore intervento, questo sarebbe prioritario sul fascio A/P poiché in alternativa alla bretella, i treni possono utilizzare come via d'accesso quella attuale, lato Novara Centrale.

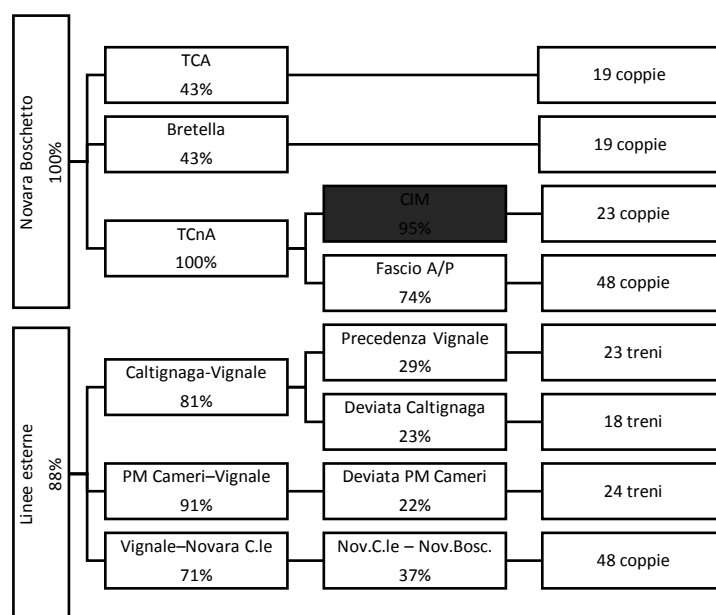


Figura 4.20 Valutazione collo di bottiglia escludendo il CIM.

Poiché i colli di bottiglia rilevati durante l'analisi di capacità si collocano tutti nella macroarea di Novara Boschetto, per quanto concerne la macroarea delle *linee esterne* si è deciso di riportare in Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19, all'ultimo livello di dettaglio, delle sezioni infrastrutturali non necessariamente significative ad uno studio dei colli di bottiglia, ma che offrono ai lettori delle informazioni molto più interessanti sull'utilità di questi elementi. In particolare, si è deciso di indagare l'utilizzazione dei binari di deviate nelle stazioni di Caltignaga e PM Cameri, del tratto di accesso a Novara Boschetto via Novara Centrale (per confermare la riduzione di utilizzo di questo tratto) ed infine le precedenze di nuova costruzione in Vignale lato Borgomanero e lato Oleggio. I risultati complessivi sono positivi, le precedenze ed i binari di deviate nelle stazioni sono utilizzati, e la riduzione sul tratto Novara Centrale - Novara Boschetto è confermata.

Passando alla valutazione dell'**impatto degli interventi** caratteristici di ciascun scenario in relazione agli obiettivi elencati nella prima parte di questo capitolo (0), emergono

i risultati riportati di seguito. Ai fini della valutazione, oltre ai diagrammi ad albero prima visti, si è fatto ricorso anche ai diagrammi di Gantt⁶⁶ di utilizzazione dei circuiti di binario.

Scenario 1. La bretella collegata ai soli binari del terminal dell'autostrada viaggiante, riesce ad accogliere senza problemi tutti i treni TCA pianificati (Figura 4.16). Questo conferma che i 16 treni del Modello d'esercizio al 2020 possono essere accolti tutti sia dalla bretella che dal terminal dell'autostrada viaggiante. Si osserva inoltre che la capacità consumata dalla bretella è relativamente bassa, riscontrabile sia come valori nominali in Figura 4.16 (43%) sia dal diagramma di Gantt⁶⁶ di utilizzazione dei circuiti di binario in Figura 4.20, in cui si può osservare che la distribuzione dei rettangoli di occupazione sui circuiti di binario corrispondenti alla bretella (tds evidenziati di giallo) non è particolarmente densa. In questo scenario, infatti, tutti i treni merci TCnA accedono a Novara Boschetto utilizzando il tratto Vignale - Novara Centrale⁸⁷, non saturando di fatto la bretella. La precedenza in Vignale lato Borgomanero è effettivamente utilizzata, comprovandolo sia dai dati di Figura 4.16 (23 treni/giorno) sia graficamente dal diagramma di Gantt in Figura 4.22.

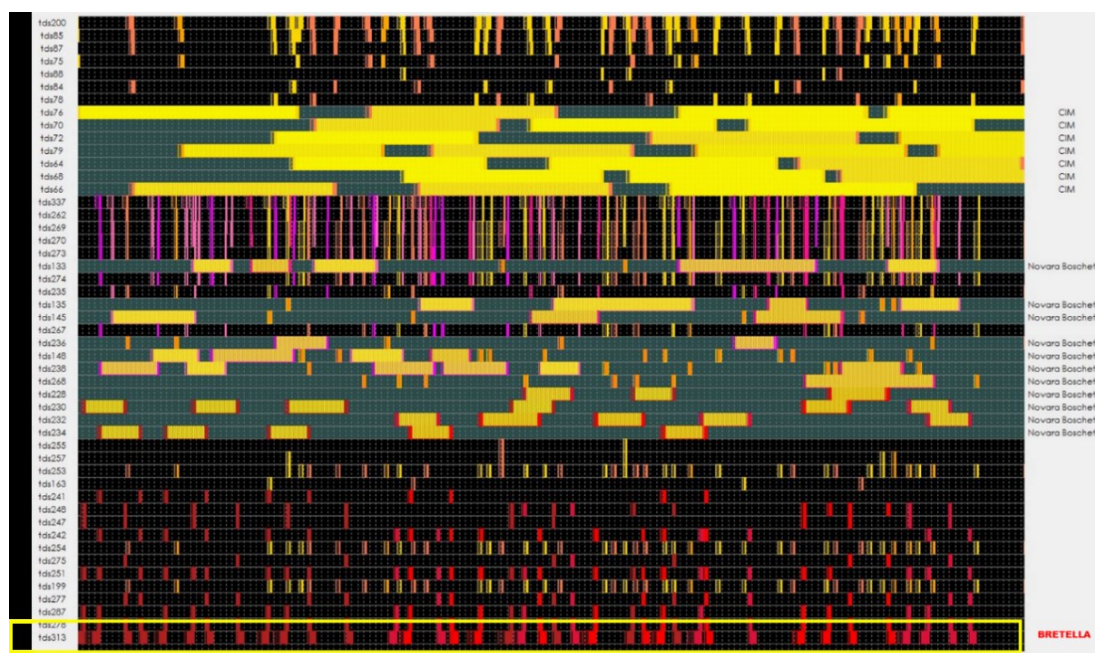


Figura 4.21 Diagramma di Gantt di utilizzazione dei circuiti di binario (cdb) della tratta Vignale - Novara Boschetto, scenario 1.

⁸⁷ Non essendoci un collegamento alla bretella dei binari TCnA del fascio A/P di Novara Boschetto.

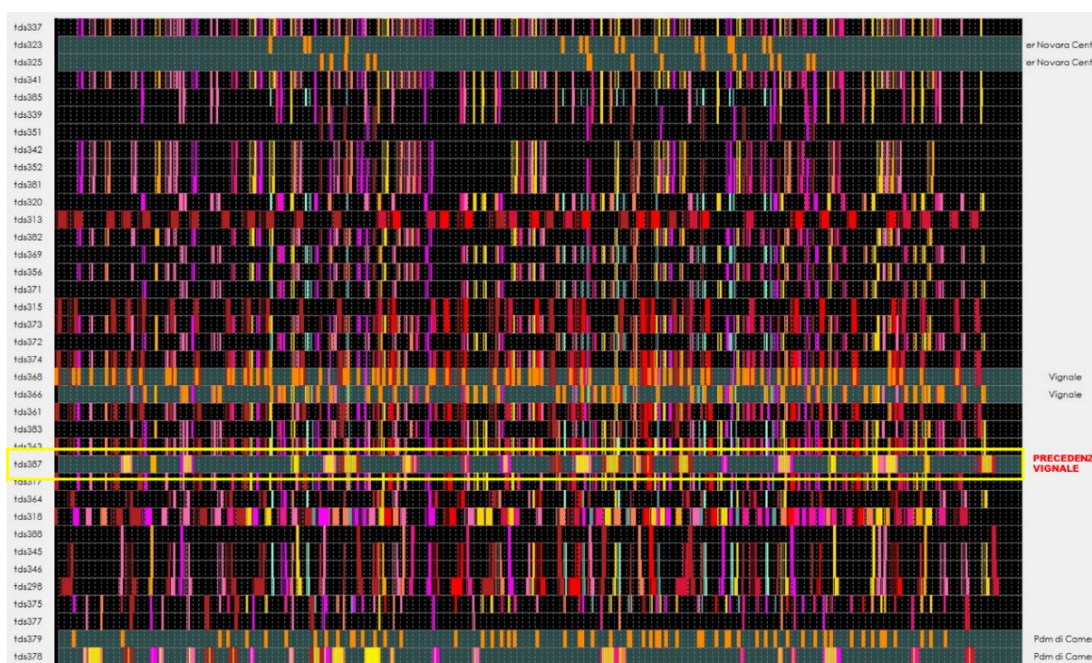


Figura 4.22 Diagramma di Gantt di utilizzazione dei circuiti di binario (cdb) della tratta Novara Centrale - Vignale - PM Cameri, scenario 1.

Scenario 2. L'intervento di collegamento alla bretella di solo due dei sette binari del fascio A/P di Novara Boschetto (in aggiunta a quelli del terminal TCA), ha un impatto significativo sul trasferimento di treni merci dal tratto Vignale - Novara Centrale sulla bretella. Le coppie di treni sulla bretella risultano 50 in tutto, di cui 19 TCA e 31 TCnA, riducendo quindi il traffico lato Novara Centrale a sole 18 coppie di treni TCnA (Figura 4.17 e Figura 4.24). La bretella risulta questa volta molto più occupata con 76% di capacità consumata (Figura 4.17), occupazione ben osservabile anche sul diagramma di Gantt (Figura 4.23).

In questo scenario si registra una particolare situazione nell'utilizzazione della precedenza in Vignale: i treni sulla precedenza si riducono rispetto allo scenario 1, Figura 4.17. Il motivo è che allo scopo di raggiungere un massimo di corse saturanti, l'algoritmo di saturazione ha previsto questa *soluzione di circolazione dei treni*⁸⁸ come un possibile ottimo, e poiché non sono stati fatti ulteriori tentativi di saturazione dell'orario risulta l'unica soluzione. In realtà aumentando il numero di tentativi di saturazione dell'orario avremmo ottenuto una serie di soluzioni ottime diverse fra loro, ognuna delle quali probabilmente avrebbe previsto un numero diverso di passaggi sulla precedenza.

⁸⁸ Orario e percorsi delle corse che massimizzano il numero di tracce.

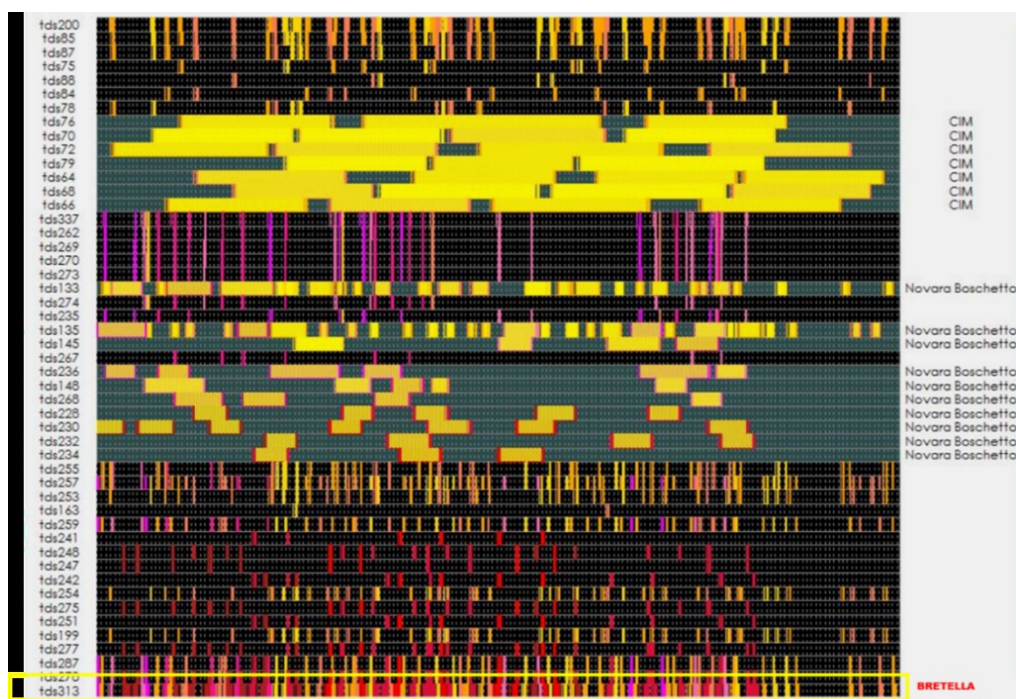


Figura 4.23 Diagramma di Gantt di utilizzazione dei circuiti di binario della tratta Vignale - Novara Boschetto, scenario 2.

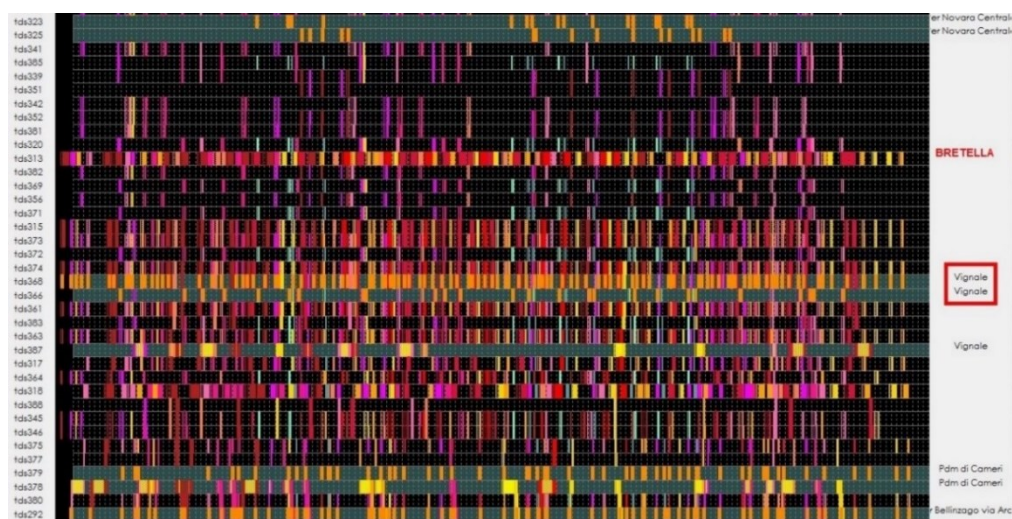


Figura 4.24 Diagramma di Gantt di occupazione dei cdb della tratta Novara Centrale - Vignale - PM Cameri/Caltignaga, scenario 2.

Scenario 3. Collegando alla bretella tutti i binari del fascio A/P di Novara Boschetto, senza considerare buffer time tra le corse, questa riesce ad accogliere 67 coppie treni/giorno (19 TCA e 48 TCnA, Figura 4.18), 17 coppie in più rispetto allo scenario precedente. La saturazione è stata fatta in modo asincrono, saturando prima la bretella e solo una volta raggiunto il suo limite di capacità, si è imposto all'algoritmo di far passare

le corse dei treni merci via Novara Centrale. Quindi, il valore qui ottenuto di 67 coppie treni/giorno circolanti sulla bretella può essere considerato il valore massimo di *capacità pratica* senza buffer time della bretella. Un valore più teorico che pratico, ma utile al dimensionamento dell'opera. I valori di occupazione all'interno di Novara Boschetto e per quanto riguarda la bretella sono simili allo scenario precedente, considerato che non si è avuto un sensibile incremento di tracce, ma solo una loro redistribuzione sui diversi tratti di accesso a Novara Boschetto.

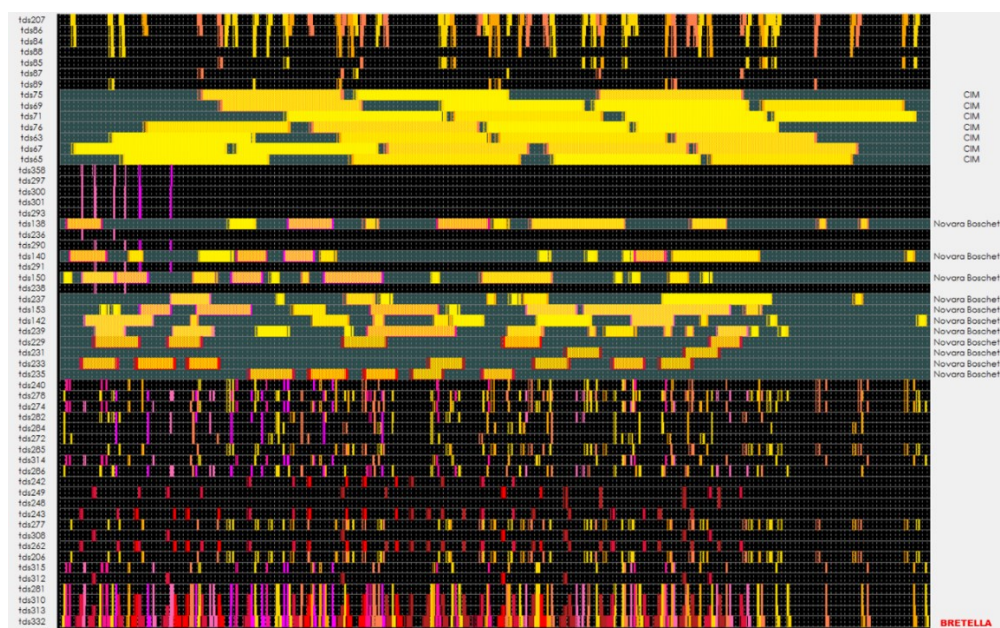


Figura 4.25 Diagramma di Gantt di utilizzazione dei circuiti di binario della tratta Vignale - Novara Boschetto, scenario 3.

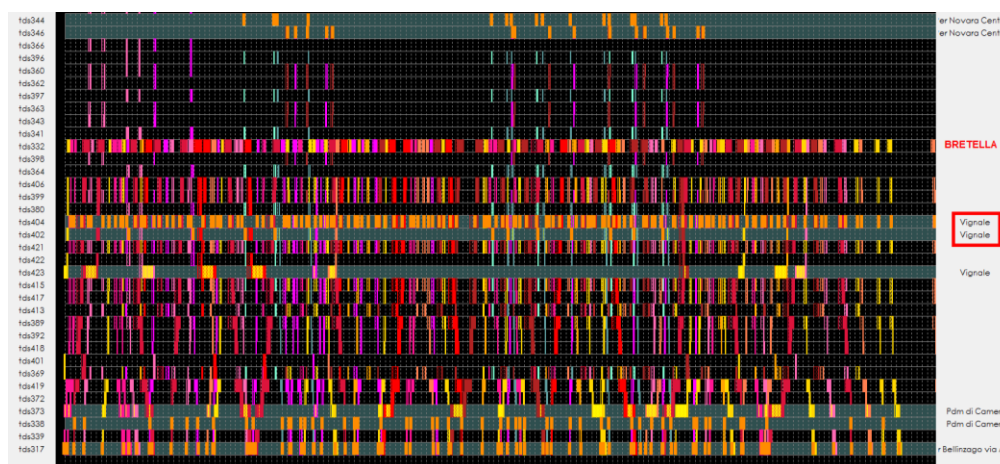


Figura 4.26 Diagramma di Gantt di occupazione dei circuiti di binario della tratta Novara Centrale - Vignale - PM Cameri/Caltignaga, scenario 3.

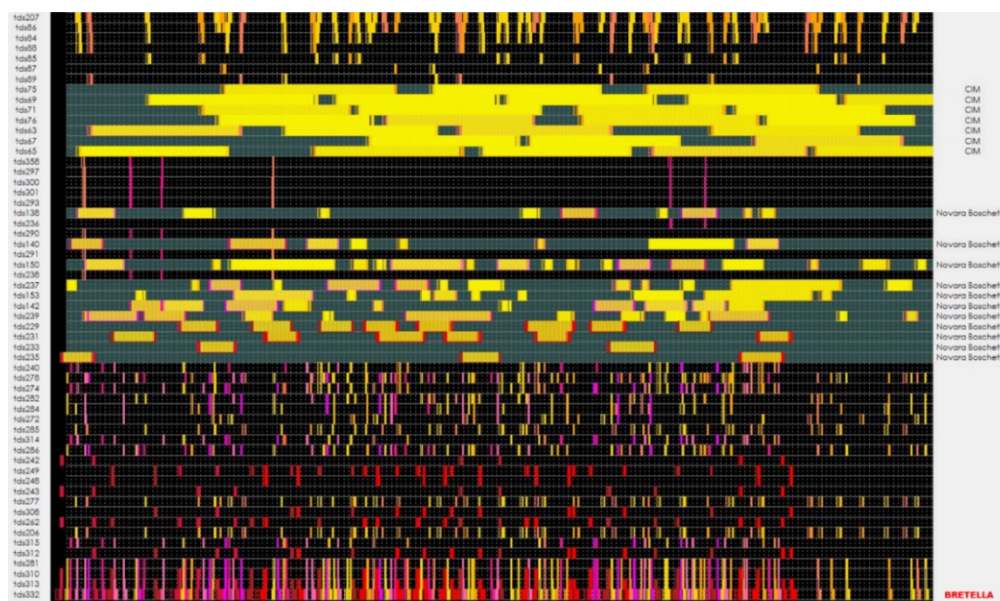


Figura 4.27 Diagramma di Gantt di utilizzazione dei circuiti di binario della tratta Vignale - Novara Boschetto, scenario 4.

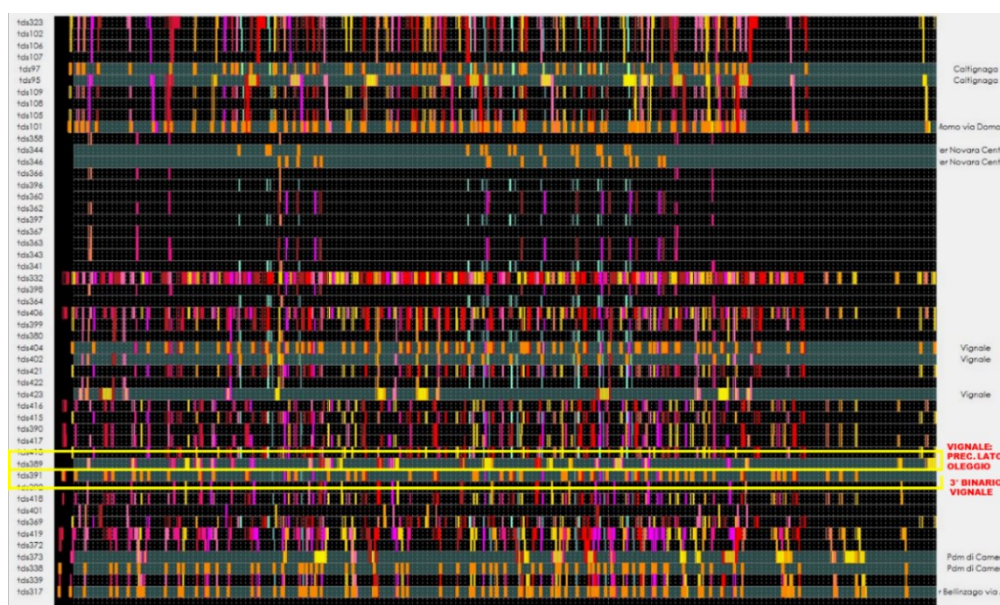


Figura 4.28 Diagramma di Gantt di occupazione dei cdb della tratta Novara Centrale - Vignale - PM Cameri/Caltignaga, scenario 4.

Scenario 4. Gli interventi caratteristici di questo scenario sono il prolungamento della bretella fino a costituire il terzo binario di stazione in Vignale, dedicato al solo traffico merci, e la costruzione della precedenza in Vignale lato Oleggio. Per valutare l'impatto del primo intervento si guarda all'utilizzazione del terzo binario di stazione in Vignale, che è percorso solo dai treni provenienti dalla linea lato Oleggio, data la disposizione dei

binari di scambio da progetto (RFI, 2017). L'occupazione nominale è del 43%, valore non indifferente, ma prevedibile poiché tutto il traffico da Oleggio passa appunto di qui. Invece, per quanto riguarda il binario di precedenza in Vignale lato Oleggio, si osserva che è utilizzato da circa 25 treni (Figura 4.19), comprovandone l'utilizzazione anche dal diagramma di Gantt in Figura 4.26.

Oltre alle considerazioni fatte sulla macroarea di Novara Boschetto nel paragrafo relativo ai colli di bottiglia, da un confronto globale di tutti gli scenari di progetto (Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19) si osserva che l'occupazione delle linee nello scenario 1 e 2 è praticamente analoga, così come quella fra lo scenario 3 e 4. Passando dallo scenario 2 allo scenario 3 si registra invece un minore consumo di capacità. Il fatto che non si riduca soltanto l'occupazione del tratto Vignale - Novara Centrale, dovuto al trasferimento di un numero maggiore di treni merci sulla bretella⁸⁹, ma si riduce anche l'occupazione degli altri tratti Vignale - Caltignaga/PM Cameri, porterebbe a pensare che ci sia un effetto positivo su tutta la circolazione di linea. In realtà, se si va ad indagare più a fondo si arriva alla conclusione che questa riduzione di capacità consumata non ha una reale significatività. In Tabella 4.10 si vede infatti che la capacità consumata sulle linee verso Caltignaga e PM Cameri esclusa la stazione di Vignale è praticamente analoga nei due scenari, invece la capacità consumata esclusivamente all'interno della stazione di Vignale differisce leggermente. Potremmo ricollegare questa differenza di capacità consumata a quella fra gli scenari 2 e 3, ipotizzando che sia dovuta al minor ingombro delle corse che in Vignale impegnano la bretella. Guardando però i diagrammi di Gantt di utilizzazione dei circuiti di binario, rispettivamente degli scenari 2 e 3 in Figura 4.24 e Figura 4.26, ci accorgiamo che l'unica differenza percepibile fra questi scenari è per il tratto *Vignale - Per Novara Centrale*, sul quale nello scenario 2⁸⁹ circolano più treni rispetto allo scenario 3⁹⁰. Dunque, la differenza di capacità consumata sulle linee, altro non sono che piccoli risparmi che accumulati generano un Δ "osservabile", ma da un punto di vista concettuale poco significativo.

Si vuole inoltre rimarcare che nel prendere visione della Tabella 4.10 non bisogna farsi ingannare dai valori relativamente bassi di capacità consumata, che potrebbero sembrare un po' ambigui rispetto a quelli in Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19. Si ribadisce che sono tali perché la compressione dell'orario è stata eseguita su pochi circuiti

⁸⁹ Nello scenario 2 la bretella è collegata a due soli binari del fascio TCnA arrivi/partenze in Novara Boschetto.

⁹⁰ Nello scenario 3 la bretella è collegata a tutti i binari TCnA del fascio arrivi/partenze.

di binario trascurando i conflitti esterni, come spiegato in 4.4.4.1. Considerare solo i valori di capacità consumata, senza contestualizzare la sezione esaminata, può condurre a conclusioni sbagliate e a volte paradossali (Figura 3.16), come in questo caso in cui leggendo un consumo di capacità inferiore nella stazione di Vignale rispetto alle linee, si potrebbe pensare che la stazione sia meno utilizzata e quindi abbia più capacità disponibile. Una considerazione paradossale considerando che entrambe le linee, da Caltignaga e PM Cameri, confluiscono in Vignale. Questo paradosso è dovuto al già citato rilassamento dei vincoli esterni alla sezione di compressione (trascurare i conflitti). Sulle linee, la sezione di compressione ha un'estensione decisamente maggiore rispetto alla stazione di Vignale e quindi vi sono più vincoli da rispettare per evitare conflitti fra due diverse corse, vincoli che di fatto ne impediscono la compressione. Se si va a guardare non alla capacità consumata delle linee, ma a quella delle sole stazioni di Caltignaga e PM Cameri, i valori di capacità consumata si riducono in accordo con quanto detto.

Tabella 4.10 Capacità sulle linee Caltignaga/PM Cameri escludendo Vignale.

Capacità sulle linee esclusa Vignale		
	scenario 2	scenario 3
Linea Caltignaga	58 %	60 %
Linea PM Cameri	69 %	67 %
Stazione Vignale	61 %	55 %
Stazione Caltignaga	25 %	26 %
Stazione PM Cameri	29 %	27 %

4.6 Conclusione

I risultati dell'analisi di capacità del nodo merci di Novara ci portano a concludere che con il metodo di simulazione applicato, basato sulla saturazione di un orario d'esercizio fattibile, ma privo di buffer time, il numero di coppie merci/giorno raggiunge le quote del Modello di Esercizio al 2025. Un risultato considerevole, che rappresenta però una capacità massima poco *pratica*, che andrebbe affinata con l'introduzione di buffer time e con uno studio dei ritardi per comprovare la stabilità dell'orario. Questo ulteriore passaggio è rimandato ad uno sviluppo futuro del lavoro, data la sua laboriosità (all' Appendice A si riportano i primi risultati di un approfondimento dello studio, effettuato introducendo i buffer time).

Ciò nonostante, gli obiettivi degli interventi pianificati da RFI sono tutti confermati:

- con la realizzazione della bretella si ha una significativa riduzione del traffico merci sul tratto Vignale - Novara Centrale. La bretella, di capacità massima pari a 71 coppie treni/giorno nello scenario 4, riesce a garantire senza problemi l'obiettivo del Modello d'Esercizio al 2020 di 16 treni aggiuntivi. Obiettivo raggiungibile non solo considerando la capacità massima quasi teorica ottenuta dalle simulazioni, ma anche da un punto di vista *pratico*: con il 50% della capacità massima, la bretella riuscirebbe a garantire circa 35 coppie treni/giorno, 85% dell'attuale traffico merci di Novara Boschetto;
- il collegamento alla bretella di anche solo due dei sette binari del fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto (in aggiunta a quelli del terminal dell'autostrada viaggiante), ha un impatto significativo sul trasferimento di treni merci dal tratto Vignale - Novara Centrale sulla bretella (50 coppie treni/giorno), contestualmente alla capacità garantita dalla bretella;
- la precedenza in Vignale lato Borgomanero è effettivamente utilizzata e contribuisce alla regolarizzazione del traffico nell'ipotesi di un incremento di capacità sulla rete. Allo stesso modo quella lato Oleggio nello scenario 4.

Infine, il pacchetto SASTRE impiegato nella modellizzazione, simulazione e risoluzione del problema si è dimostrato efficace e sufficientemente efficiente ad un'analisi di questo tipo, convalidando la sua architettura anche nel caso di nodi più complessi come si è dimostrato essere quello di Novara.

Conclusione

La tesi ha avuto come principale obiettivo l'applicazione di un metodo integrato di simulazione e saturazione dell'orario ferroviario allo studio della capacità ferroviaria del nodo merci di Novara in diverse configurazioni infrastrutturali previste dal progetto RFI "Nodo di Novara 1a fase".

Lo studio è iniziato con un inquadramento generale dei contenuti che ha svelato alcune delle motivazioni primarie della tesi. È stato affrontato il tema del trasporto merci in relazione alle catene di approvvigionamento mondiali, del suo impatto economico ed ambientale. Si è compreso che il settore dei trasporti merci ricopre un ruolo fondamentale nelle economie mondiali, sia in termini monetari che logistici. Tuttavia, a causa dei consumi energetici insostenibili e delle emissioni di gas a effetto serra, occorre tener conto anche dell'impatto ambientale del settore. Si hanno quindi politiche a sostegno di una crescita economica *green*, che impongono obiettivi e vincoli sulle emissioni di gas serra ed incentivano diverse soluzioni in ambito trasportistico. Una di queste è il trasferimento modale da strada a ferrovia, istituendo tra l'altro i *Rail Freight Corridors* (RFC) - corridoi merci ferroviari - allineati alla rete TEN-T. Un trasferimento che può avvenire parzialmente con l'*intermodalità* dei trasporti ai diversi livelli della *supply chain*. Ulteriori soluzioni sono da ricercarsi nello sviluppo tecnologico e nella ottimizzazione dell'uso dell'infrastruttura esistente. Queste risultano elementi intrinseci della tesi: il nodo merci di Novara è un nodo intermodale strada-ferrovia, situato all'intersezione dei corridoi RFC n.1 Reno Alpi e n.6 Mediterraneo; gli interventi progettati incentivano il trasporto merci ferroviario; l'analisi di capacità, effettuata con metodi e strumenti innovativi (tuttora oggetto di ricerca), offre soluzioni ottimizzate dell'uso di capacità dell'infrastruttura ferroviaria.

Al Capitolo 2 è stato introdotto il nodo merci di Novara, fulcro del lavoro di tesi. In questa prima parte, si è contestualizzato il nodo rispetto ai traffici commerciali internazionali e locali, in termini qualitativi e quantitativi con studi O/D dell'offerta e della domanda attuale. Lo scopo è stato quello di comprendere gli obiettivi e le dinamiche del contesto in cui si inserisce il progetto RFI "Nodo di Novara 1a fase". Si è constatato che Novara compete come importante nodo di collegamento tra i corridoi RFC n.1 Reno Alpi e n.6 Mediterraneo, corridoi inseriti a loro volta in reti di approvvigionamento intercontinentali, e.g. rotte marittime con il *Far East*. In questo contesto, Novara risulta hinterland

sia dei porti del centro-nord Europa sia di quelli italiani liguri. A causa della corsa al gigantismo navale però, al momento viene meno la funzione di hinterland dei porti liguri, non essendo dotati di un'infrastruttura adeguata ad accogliere navi di grandi dimensioni - profondità del fondale e lunghezza delle banchine - ed essendo caratterizzati da una logistica dei terminal piuttosto invecchiata non sempre adatta al traffico containerizzato. Dagli studi O/D dell'offerta e della domanda del nodo prevalgono infatti i rapporti con il centro-nord Europa ed in particolare con i porti di Rotterdam, Brugge ed Anversa attuando un modello di rete hub and spoke in cui tali porti (hub) sono connessi all'hinterland di Novara con efficaci collegamenti ferroviari (corridoi RFC). Questa direzionalità dei traffici potrebbe rappresentare una condizione transitoria, poiché con il Terzo Vallico e la realizzazione del nuovo terminal semiautomatizzato per container di Vado Ligure si prospettano nuovi scenari per il Mediterraneo ed il basso Piemonte in relazione anche ai corridoi europei RFC.

Tuttavia, la tesi si concentra solo sui traffici con il nord verso Domodossola, su indicazione dei referenti RFI e per semplificare il modello di simulazione. Questa semplificazione è funzionale alle analisi di capacità del nodo in quanto l'area di interesse del progetto RFI comprende solo lo scalo merci di Novara Boschetto e le linee affluenti da nord Caltignaga/PM Cameri-Vignale-Novara Boschetto. Considerato che il 70% dell'attuale traffico merci ferroviario di Novara passa per i valichi del Gottardo e del Sempione, via Domodossola; e che lo scalo non è dotato di un terminal gateway per lo smistamento efficiente dei treni fra i corridoi Reno-Alpi e Mediterraneo, la semplificazione è verosimile. Nasce così il progetto "Nodo di Novara 1a fase" nell'ambito di un programma di interventi sugli assi del Sempione e del Gottardo, definito dai gestori dell'infrastruttura ferroviaria italiana e svizzera. Interventi volti a garantire un maggior livello di capacità e regolarità sugli assi e sulle linee affluenti, in conformità ai *modelli di esercizio* futuri che prevedono un incremento delle tracce merci sulle tratte che da Domodossola e Luino arrivano a Novara Boschetto. Gli obiettivi principali del progetto sono:

- l'attivazione di un collegamento diretto tra le linee in direzione nord verso Domodossola e Arona e la radice nord-est dei binari di Novara Boschetto. Questo collegamento ha lo scopo di incrementare la capacità fornendo ai treni merci un percorso alternativo a quello attuale che attraversa la stazione passeggeri di Novara Centrale. Al contempo, il collegamento migliorerebbe il comfort

acustico urbano, deviando il traffico dalle linee in prossimità del centro abitato di Novara e della stazione passeggeri di Novara Centrale;

- l'attivazione di due precedenze nella stazione di Vignale, uno per ogni linea in direzione nord. Questi binari hanno lo scopo di fornire una riserva di capacità per i treni merci da e per Novara Boschetto.

Con la tesi si è valutato quindi l'efficacia del progetto, modellando gli interventi in 4 scenari infrastrutturali progressivi (che simulano le diverse fasi realizzative) e analizzando di conseguenza la risposta del sistema. Un'analisi svolta con una metodologia di microsimulazione e saturazione dell'orario ferroviario, basata sui concetti teorici presentati al Capitolo 3. In questo capitolo è stato inoltre condotto uno studio letterario sullo stato dell'arte delle ricerche nell'ambito dei metodi di valutazione della capacità ferroviaria. Sono stati menzionati i metodi analitici, di ottimizzazione e di simulazione e lo studio di capacità dei nodi ferroviari. I principali insegnamenti tratti da questa letteratura sono i benefici legati all'uso di metodi integrati di ottimizzazione e simulazione. Il più importante di questi vantaggi sembra essere il modo economicamente vantaggioso in cui i diversi scenari possono essere analizzati e sperimentati.

Nel Capitolo 4, il metodo di microsimulazione e saturazione degli orari ferroviari - che fa parte della classe dei metodi integrati - è stato applicato alle analisi di capacità del caso studio di Novara. Il metodo si compone principalmente della modellizzazione del problema e sua risoluzione per mezzo di performanti algoritmi propri della *Ricerca Operativa*, in grado di generare orari ferroviari fattibili (rispetta vincoli tecnici e operativi), ottimizzati e saturi. Sulla base di questi dati, la valutazione della capacità è stata realizzata per mezzo dei KPIs: numero di tracce nell'unità di tempo; tempo di occupazione dell'infrastruttura rispetto ad una data finestra temporale. Il primo indice, ottenuto direttamente dall'orario saturo, restituisce un'informazione puramente deterministica. Il secondo invece, calcolato con il metodo della compressione UIC 406R, permette un inquadramento degli effetti della eterogeneità del traffico, della bi-direzionalità dei flussi, dei colli di bottiglia, ecc. Si è riscontrato però che a questo secondo indice è associata una maggiore difficoltà di interpretazione dei risultati numerici, data dalla molteplicità di fattori incidenti, non pesati o normalizzati. Tutto ciò è stato eseguito all'interno di un ambiente di analisi integrato (SASTRE) sviluppato al Politecnico di Torino. Utilizzare questo strumento, in comparazione a programmi di microsimulazione commerciali (come ad esempio OpenTrack), ha permesso:

- una modellizzazione microscopica molto accurata del problema, e allo stesso tempo di facile inserimento e/o modifica;
- la generazione automatica di un orario fattibile e saturo in tempi relativamente brevi;
- la personalizzazione degli input e degli output (dati, funzioni, vincoli, ecc.) in modo da adattarli al meglio alle necessità del caso.

I risultati delle analisi di capacità del nodo di Novara, nei diversi scenari simulati, ci hanno portato a concludere che con il metodo di simulazione applicato, non considerando *buffer time*, si raggiunge il *numero di treni/giorno* del modello di esercizio al 2025. Un risultato considerevole, che rappresenta però una capacità massima poco pratica, che andrebbe affinata con l'introduzione di *buffer time* e con uno studio dei ritardi per comprovare la stabilità dell'orario. Questo ulteriore passaggio è stato rimandato ad uno sviluppo futuro del lavoro, data la sua laboriosità (l'Appendice A riporta i primi risultati di un approfondimento dello studio, che calcola la capacità pratica introducendo i *buffer time*).

Ciò nonostante, gli obiettivi degli interventi pianificati da RFI sono tutti confermati:

- con la realizzazione della bretella si ha una significativa riduzione del traffico merci in prossimità del centro abitato e della stazione passeggeri di Novara;
- l'area di studio riesce a garantire il principale obiettivo di capacità di RFI: modello d'esercizio al 2020 con 16 treni aggiuntivi. Obiettivo raggiungibile non solo considerando la capacità simulata "quasi teorica" ottenuta senza *buffer time*, ma anche da un punto di vista pratico: con il 50% della capacità simulata, la sola bretella riuscirebbe a garantire circa 35 coppie treni/giorno, 85% dell'attuale traffico merci di Novara Boschetto;
- l'introduzione della precedenza in Vignale lato Borgomanero è effettivamente utilizzata e contribuisce alla regolarizzazione del traffico nell'ipotesi di un incremento di capacità sulla rete. Allo stesso modo quella lato Oleggio nello scenario4.

Infine, i risultati finali si sono dimostrati molto coerenti con la realtà dell'esercizio ferroviario, convalidando di fatto il metodo utilizzato. La metodologia seguita, che appartiene al filone dei metodi di simulazione, è stata in parte personalizzata applicando degli approcci originali nell'impostazione della saturazione dell'orario e della valutazione della capacità e dei colli di bottiglia. Ad opera del correlatore (creatore di SASTRE) è stata poi ottimizzata la parte algoritmica del programma, per rispondere adeguatamente alle esigenze del caso. L'ambiente di analisi SASTRE si è così dimostrato efficace e

sufficientemente efficiente ad un'analisi di questo tipo, convalidando la sua architettura anche nel caso di nodi più complessi come si è dimostrato essere quello di Novara. Lo studio si distingue infatti per aver applicato una metodologia di simulazione e saturazione all'analisi di capacità di un nodo ferroviario complesso. Se questi metodi sono piuttosto frequenti nelle applicazioni alle linee ferroviarie, lo sono decisamente meno per i nodi che presentano un grado di complessità maggiore a causa della reciproca interdipendenza di diversi fattori inerenti alle caratteristiche degli impianti (e.g. la selezione dei percorsi ottimali in un'area deviatoi molto articolata). L'area di studio della tesi può essere classificata infatti come nodo ferroviario di una complessità piuttosto elevata, essendo composta da: 3 stazioni di linea di cui una posta ad uno svincolo, un fascio a/p (8 binari), un terminal dell'autostrada viaggiante (4 binari) e un terminal intermodale (7 binari).

Prospettive future

La tesi può essere uno spunto per sviluppi futuri sia di natura pratica, estendendo ed applicando i metodi e gli strumenti illustrati ad altri casi di studio, sia di natura teorica, migliorando la metodologia applicata.

In merito agli **sviluppi pratici** non vi è alcun limite. Il metodo è applicabile a numerose tipologie di studio: analisi di capacità, determinazione di orari di esercizio fattibili ed ottimizzati, analisi di robustezza dell'orario, ecc. Inoltre, come comprovato esso è valido sia per la trattazione di linee che di nodi complessi. Poiché l'ambiente di analisi utilizzato (SASTRE) non è commerciale, si ha inoltre la possibilità di personalizzare il modello e le funzioni in base alle esigenze di ogni caso studio. Un simile metodo simulativo ha infatti la grande potenzialità di considerare tutti i parametri significativi che caratterizzano l'esercizio ferroviario, riproducendo i fenomeni legati alla circolazione ferroviaria in modo molto più affine alla realtà di quanto non lo si faccia con i metodi analitici, con il vantaggio di avere sia in input che in output dati consistenti, a maggiore livelli di dettaglio e affidabili. Questo richiede una grande quantità di dati, molto dettagliati e un impegnativo e lungo lavoro per la costruzione del modello. Dunque, è bene che all'avviamento di uno studio di questo tipo i committenti prendano atto della disponibilità che devono garantire nei confronti dei ricercatori/prestatori d'opera.

In merito alle applicazioni pratiche spicca una di particolare interesse strategico. Per le ragioni sopracitate (o al Capitolo 2), la tesi ha analizzato la capacità ferroviaria del nodo merci di Novara esclusivamente in funzione della domanda sulle direttrici verso nord, che collegano il nodo con i valichi svizzeri del Sempione e del Gottardo. Tuttavia,

si assiste in tempi recenti ad una riconfigurazione del traffico merci ferroviario rispetto ai maggiori assi europei che investono quest'area. La realizzazione del terminal container semiautomatizzato di Vado Ligure, l'incessante crescita del porto di Trieste e del traffico ferroviario ad esso correlato (stretta relazione commerciale tra Novara e Trieste, Capitolo 2), la realizzazione ed il potenziamento di collegamenti con il mercato interno europeo (tunnel del Gottardo, terzo Valico, tunnel delle Ceneri, TAV, tunnel del Brennero), fanno presagire un incremento generale dei traffici merci su rotaia ed un estensione del bacino di domanda del nodo di Novara. Gran parte dei traffici che oggi arrivano dai porti del nord Europa in un futuro prossimo sbarcheranno nel porto di Vado Ligure (Capitolo 2). In questo scenario, i centri interportuali di Novara e Torino - i principali dell'*hinterland* del porto ligure - acquisirebbero notevole importanza per lo smistamento e la distribuzione delle merci sia sul mercato locale che quello europeo, in relazione non solo al corridoio Reno-Alpi, ma anche a quello del Mediterraneo su cui si collocano, tra l'altro, Torino e Trieste. In quest'ottica sarebbe senz'altro interessante, se non necessario, verificare "se ed in che misura" le prestazioni infrastrutturali dello scalo merci di Novara sono in grado di accogliere la domanda così estesa.

In merito agli sviluppi teorici invece, con il lavoro di tesi si è potuto sperimentare come i metodi di simulazione, molto indicati nelle analisi di capacità e della circolazione ferroviaria, siano però lungi dall'essere applicati su larga scala da gestori dell'infrastruttura, operatori ferroviari o studi di consulenza del settore. Un collegamento, quello fra mondo accademico e aziendale, che in questo ambito andrebbe sicuramente rafforzato in virtù dei vantaggi derivanti dall'applicazione di questi metodi a casi reali. Vantaggi in termini di efficacia, efficienza e sostenibilità, che a partire dalla logistica di circolazione, interessano tutto il sistema ferroviario. Questi includono la riduzione dei rischi, dei costi operativi e dei tempi di consegna, nonché una maggiore comprensione del problema. In questo scenario, per raggiungere una maggiore *applicabilità* dei metodi di simulazione, due sono i principali fronti di lavoro: uno più vicino alla Ricerca Operativa e consiste nell'ottimizzazione degli algoritmi di programmazione per ridurre i tempi e la complessità computazionale mantenendo un alto livello di qualità dei risultati; l'altro interessa prettamente l'ambito dei Trasporti e consiste nella standardizzazione di tutti gli aspetti (processi e parametri) inerenti alla pratica ferroviaria, che devono essere modellizzati in sede di simulazione e analisi, allo scopo di avere un'interpretazione univoca sia dei fenomeni che dei risultati. A causa della mancanza di pratiche standard i risultati possono differire in funzione del caso in esame, del modello utilizzato e della persona incaricata dello studio.

Fattori che mettono in discussione l'univocità e l'oggettività delle analisi finali, ostacolando l'interoperabilità, intesa come scambio di informazioni, fra sistemi e modelli diversi. Dunque, uno sviluppo futuro, attinente al percorso di studi in ambito trasportistico, potrebbe essere quello di definire degli standard per la modellizzazione dei processi e dei parametri nelle analisi di capacità e nelle simulazioni del traffico ferroviario.

Appendice A – Capacità pratica del nodo

Saturazione dell'orario con buffer time di 120 s

La *capacità pratica* può essere definita come limite pratico del volume di traffico rappresentativo che può essere spostato su una linea, in relazione ad una specifica combinazione di infrastruttura, traffico e operazioni, rispettando allo stesso tempo un livello di servizio prefissato⁹¹ (Abril, et al., 2008). Calcolata su presupposti realistici, correlati al livello di qualità operativa previsto e all'affidabilità del sistema, la capacità pratica risulta essere il numero di treni che possono circolare in condizioni operative normali, senza conflitti, su un determinato segmento dell'infrastruttura in un determinato periodo di tempo. Di solito è circa il 60-75% della capacità teorica. Come per quest'ultima, la capacità pratica può essere calcolata con diversi metodi: analitici o di simulazione-ottimizzazione dell'orario. In genere, i primi restituiscono un'indicazione deterministica del numero di treni che la rete è in grado di accogliere o dell'utilizzazione dell'infrastruttura. I secondi invece, simulando la circolazione dei treni compatibilmente con tutti i vincoli previsti dal sistema, contestualizzano la capacità ad un orario d'esercizio fattibile, privo di conflitti e saturo. In questo caso quindi si offre un'informazione completa delle dinamiche e delle caratteristiche della circolazione sulla rete.

Nel caso in esame, la metodologia seguita per il calcolo della capacità pratica è la stessa del Capitolo 4 - in cui si era calcolata la capacità teorica della rete - basata su un approccio integrato di simulazione e saturazione dell'orario ferroviario, con modellizzazione microscopica dell'infrastruttura. In questo caso però, per tener conto di un livello di servizio pratico che garantisca l'operatività e l'affidabilità del sistema e dell'orario, si impone un tempo cuscinetto (*buffer time*) di 120 secondi in modo uniforme fra tutte le corse dei treni - saturanti e non - per ciascuna sezione di blocco dell'area di studio. Così facendo, i blocchi di occupazione delle sezioni (Figura 3.8) non solo non si sovrappongono mai fra di loro, ma sono sempre separati almeno da detto tempo cuscinetto. Tale distanza è assegnata in modo deterministico, come tempi fissi da aggiungere alle diverse combinazioni di treni, in conformità alle "Specifiche tecniche di circolazione" (RFI,

⁹¹ Il livello di servizio di una rete ferroviaria si esplica principalmente con il livello di puntualità dei treni o viceversa i ritardi medi registrati.

2014/2015) sulle tratte Borgomanero/Oleggio - Vignale - Novara nelle quali il tempo di distanziamento è nominalmente di 2 minuti + sblocco⁹².

La qualità operativa e l'affidabilità di un sistema ferroviario (o di un orario d'esercizio) consistono principalmente nell'abilità di garantire la puntualità dei treni e la stabilità della circolazione, evitando che le perturbazioni del traffico si propaghino creando un effetto a catena o a frusta (aumento di intensità della perturbazione più ci si discosta dalla fonte). Pertanto, il livello di servizio offerto correlato è indice di robustezza del sistema. Impo-
nendo un *buffer time* in modo deterministico, di fatto non si esegue un'analisi della robustezza per verificare se il sistema sia effettivamente capace di limitare l'effetto di disturbi/difetti casuali nelle operazioni dei treni e quindi l'entità della propagazione dei ritardi, ma si assume a priori che con tale tempo cuscinetto il sistema sia robusto. Dato che il valore del *buffer time* assunto deriva da quello realmente applicato dal gestore dell'infrastruttura ferroviaria italiana, si assume che questo renda il risultato della simulazione realistico e ipoteticamente fattibile. Inoltre, dallo studio (Coviello, Pellegrini, Sobieraj, & Rodriguez, 2017), seppur applicato su un caso di studio significativamente differente da quello in qui considerato, emerge che un *buffer time* di 120 s risulta effettivamente efficace per rendere robusto un orario saturo – con una propagazione nulla (o quasi) dei ritardi. Gli autori studiano la robustezza degli orari saturati di una linea ferroviaria francese imponendo in modo uniforme valori incrementali di buffer time nell'intervallo 0 - 240s. Dai risultati si nota che da 120s in poi (*buffer time*) la propagazione dei ritardi è poco significativa e si mantiene pressoché costante, rendendo il sistema effettivamente robusto.

Quindi, seguendo i passi operativi di: modellizzazione del sistema, generazione automatica di un orario fattibile, ottimizzazione e saturazione dell'orario con un tempo cuscinetto pari a 120 s, il risultato è questa volta un orario fattibile saturato e presumibilmente stabile, che rappresenta la capacità pratica del sistema. A seguire si riporteranno gli esiti dell'analisi di capacità eseguita sulla base di questo orario. I KPIs utilizzati nella valutazione sono gli stessi del Capitolo 4:

- numero di *coppie di treni/giorno*, indice di una capacità assoluta o deterministica;
- *capacità consumata %* (chiamata anche occupazione o utilizzazione dell'infrastruttura), utilizzata per la determinazione dei colli di bottiglia e della valutazione della stabilità del sistema.

⁹² Il tempo di sblocco è riferito al tempo di rilascio dei segnali ed è intrinsecamente considerato nel programma di simulazione, posto pari a 30 s.

Tale studio è eseguito per gli stessi scenari di progetto del Capitolo 4 (sc1, sc2, sc3 e sc4). Scenari che simulano diverse fasi realizzative del progetto RFI sul nodo di Novara con interventi di maggiore entità sullo scalo merci di Novara Boschetto e sull'impianto di Vignale (Capitolo 4, 4.3).

Risultati

Capacità assoluta: coppie di treni/giorno

In Tabella A.1 si riporta una panoramica delle *coppie treni/giorno*, classificati per località e tipologia di trasporto (TCA, TCnA). La prima voce in tabella indica il totale di coppie treni/giorno, comprendendo sia il traffico passeggeri che quello merci. Si ricorda che nella saturazione sono stati presi in considerazione soltanto questi ultimi, lasciando invariato il numero di treni passeggeri rispetto allo scenario attuale (sc0, non simulato): 9 coppie di treni passeggeri da/per Caltignaga; 7 coppie di treni passeggeri da/per PM Cameri.

Tabella A.1 Coppie treni/giorno, per località e tipologia di traffico merci, con buffer time 120s

		Scenari bt120 (coppie di treni/giorno)				
		sc0	sc1	sc2	sc3	sc4
Caltignaga	Totale coppie treni	29	38	32	36	35
	TCA	9	11	11	11	11
	TCnA	11	18	12	16	15
PM Cameri	Totale coppie treni	18	33	30	29	32
	TCA	0	8	8	8	8
	TCnA	11	18	15	14	17
Vignale	Totale coppie treni	47	70	62	65	67
	TCA	9	19	19	19	19
	TCnA	22	35	27	30	32
Nov. Bosc.	Totale coppie treni	41	54	46	49	51
	TCA	9	19	19	19	19
	TCnA	32	35	27	30	32

Al Capitolo 4 simulando e saturando i quattro scenari di progetto, al fine di determinarne la capacità teorica, avevamo ottenuto una tabella simile dalla quale si poteva notare una grande differenza fra lo scenario attuale non simulato (sc0) e quelli di progetto simulati (sc1, sc2, sc3 e sc4). Avevamo allora ipotizzato che tale incremento del numero di tracce fosse causato principalmente dall'assenza di buffer time (bt0) nelle simulazioni dell'orario. Gli interventi infrastrutturali non generavano invece un incremento sensibile della

capacità assoluta, ma agivano sull'utilizzo dell'infrastruttura mediante una redistribuzione dei treni sulle varie sezioni infrastrutturali. Introducendo un buffer time costante e uniforme di 120 s (bt120) si osserva in questo caso che si ha comunque un incremento significativo del numero di tracce, in parte comparabile con gli scenari bt0 del Capitolo 4 (Figura A.1.1). Il fattore più incisivo in questo senso, non è dunque il buffer time, ma il fatto stesso di simulare l'orario di esercizio e quindi di avere un'indicazione accurata della potenzialità della rete. La matrice in Figura A. A.1.2 riporta più in dettaglio la relazione fra l'offerta attuale e la capacità pratica simulata. Si nota che vi è una capacità residua potenzialmente disponibile dal momento che l'orario simulato è *fattibile*: simula la realtà dell'esercizio ferroviario considerando tutti i vincoli - infrastruttura, materiale rotabile ed esercizio - del sistema (Capitolo 4); è privo di conflitti fra le corse dei treni e prevede un buffer time che assicura un certo livello di servizio. Le capacità a cui si fa riferimento nelle tabelle di Figura A.1 sono da intendersi come numero di coppie di treni/giorno.

(1) **capacità pratica simulata (bt120)**
capacità teorica simulata (bt0)

	sc1	sc2	sc3	sc4	media	σ
Caltignaga	97%	78%	84%	78%	84%	9%
PM Cameri	75%	70%	67%	73%	71%	4%
Vignale	86%	74%	76%	75%	78%	6%
Nov. Bosc.	82%	68%	70%	70%	73%	6%
media	85%	73%	74%	74%	76%	
σ	9%	4%	8%	3%		8%

(2) **offerta attuale (sc0)**
capacità pratica simulata (bt120)

	sc1	sc2	sc3	sc4	media	σ
Caltignaga	76%	91%	81%	83%	83%	6%
PM Cameri	55%	60%	62%	56%	58%	3%
Vignale	66%	76%	72%	70%	71%	4%
Nov. Bosc.	75%	89%	84%	80%	82%	6%
media	68%	79%	75%	72%	73%	
σ	9%	12%	8%	10%		11%

(3) <u>offerta attuale (sc0)</u> <u>capacità teorica simulata (bt0)</u>						
	sc1	sc2	sc3	sc4	media	σ
Caltignaga	74%	71%	67%	64%	69%	4%
PM Cameri	41%	42%	42%	41%	41%	1%
Vignale	57%	56%	55%	53%	55%	2%
Nov. Bosc.	61%	60%	59%	56%	59%	2%
media	58%	57%	56%	54%	56%	
σ	12%	10%	9%	8%		11%

Figura A.1 Matrici che raffigurano il rapporto percentuale fra (1) capacità pratica/capacità teorica simulata; (2) offerta attuale/capacità pratica simulata; (3) offerta attuale/capacità teorica simulata.

In Tabella A. si nota una singolarità fra lo scenario 1 ed i successivi scenari simulati: poiché l'entità degli interventi infrastrutturali aumenta progressivamente con gli scenari, la capacità dovrebbe aumentare conseguentemente. Questo è rispettato nelle simulazioni senza *buffer time*; mentre in questo caso (con i *buffer time*) è rispettato solo nel caso degli scenari 2,3 e 4. L'anomalia è riconducibile all'impostazione dell'esecuzione dell'algoritmo di saturazione: è stato imposto un limite di tempo per la risoluzione dell'algoritmo, accettando una soluzione sub-ottima, per assicurarci una soluzione in tempi ragionevoli. L'introduzione del *buffer time* complica il problema e allunga dunque il tempo di risoluzione. Nello scenario 1 con *buffer time*, i risultati non sono stati affetti da questo prolungamento dei tempi di risoluzione perché l'impostazione della saturazione per questo scenario è più semplice rispetto agli altri scenari, prevedendo il transito sulla bretella Vignale-Novara Boschetto dei soli treni adibiti all'autostrada viaggiante (Capitolo 4). Ne risentono invece gli scenari 2, 3 e 4 che presentano una soluzione sub-ottima. È prevista la ripetizione delle simulazioni con tempi di risoluzione maggiori, i cui risultati saranno riportati prossimamente in un ulteriore lavoro.

Occupazione dell'infrastruttura: colli di bottiglia

Ai fini della valutazione dell'occupazione infrastrutturale e quindi dell'identificazione dei colli di bottiglia, si segue una metodologia basata sul metodo della compressione UIC 406R (UIC, 2013) con una suddivisione dell'area di studio in macro, meso e micro-sezioni. Metodologia descritta ampiamente al Capitolo 4, paragrafo 4.4.4.1.

I risultati di questa valutazione sono riportati in maniera sintetica in Figura , che rappresenta l'andamento dell'occupazione delle sezioni infrastrutturali più rilevanti. In Figura A.3, Figura A.4, Figura A.5 e Figura A.6, si riportano invece le analisi dettagliate secondo diagrammi ad albero, da leggere come spiegato al Capitolo 4 paragrafo 4.5.2.

Con riferimento a queste figure, si rileva che il terminal intermodale CIM rappresenta il principale collo di bottiglia del nodo ferroviario di Novara, raggiungendo occupazioni prossime al 100% in tutti gli scenari. Dai grafi ad albero si osserva inoltre che nello scenario 1 l'occupazione delle linee esterne supera di poco quella dello scalo di Novara Boschetto, rendendo le macroaree - linee esterne e Novara Boschetto - confrontabili fra loro. All'interno di Novara Boschetto, in generale, la causa dell'elevata occupazione è riconducibile alla parte del terminal che accoglie treni adibiti al trasporto combinato non accompagnato, dunque al CIM seguito dal fascio arrivi/partenze (TCnA/storage yard). Per le linee, invece, l'occupazione piuttosto elevata è causata dall'alta capacità assoluta (numero di tracce) utilizzata. In particolare, conseguentemente agli interventi infrastrutturali previsti dal progetto RFI sul nodo (Capitolo 4, 4.3) si osservano i seguenti andamenti:

- l'occupazione del tratto Vignale - Novara Centrale diminuisce in modo considerevole, man mano che alla bretella Vignale-Novara Boschetto vengono collegati un numero crescente di binari del fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto; conseguentemente l'occupazione della bretella cresce.

La saturazione dell'orario, per come è stata impostato l'algoritmo, è asincrona (Capitolo 4, paragrafo 4.4.3): le corse con la priorità più alta sono inserite per prime nell'orario saturato. In questo caso le tracce merci passanti dalla bretella hanno la priorità su quelle che transiterebbero via Novara Centrale da/per Novara Boschetto. Quindi solo una volta saturata la bretella vengono inserite nell'orario le corse merci che accedono a Novara Boschetto via Novara Centrale, con la possibilità di inserire un numero illimitato di corse in Novara Boschetto che utilizzano questa via di accesso alternativa. Lo scalo TCnA (fascio a/p collegato al CIM) di Novara Boschetto non risulta mai saturato però (capacità prossima al 100%), ad indicare che la rete raggiunge il suo massimo di potenzialità non necessariamente a causa di un elemento infrastrutturale specifico, ma per un'interazione generale delle differenti parti costituenti il nodo. Spiccano comunque con una potenzialità critica Figura : il CIM, la stazione di Vignale, il fascio arrivi/partenze di Novara Boschetto (binari dedicati al TCnA) e la bretella.

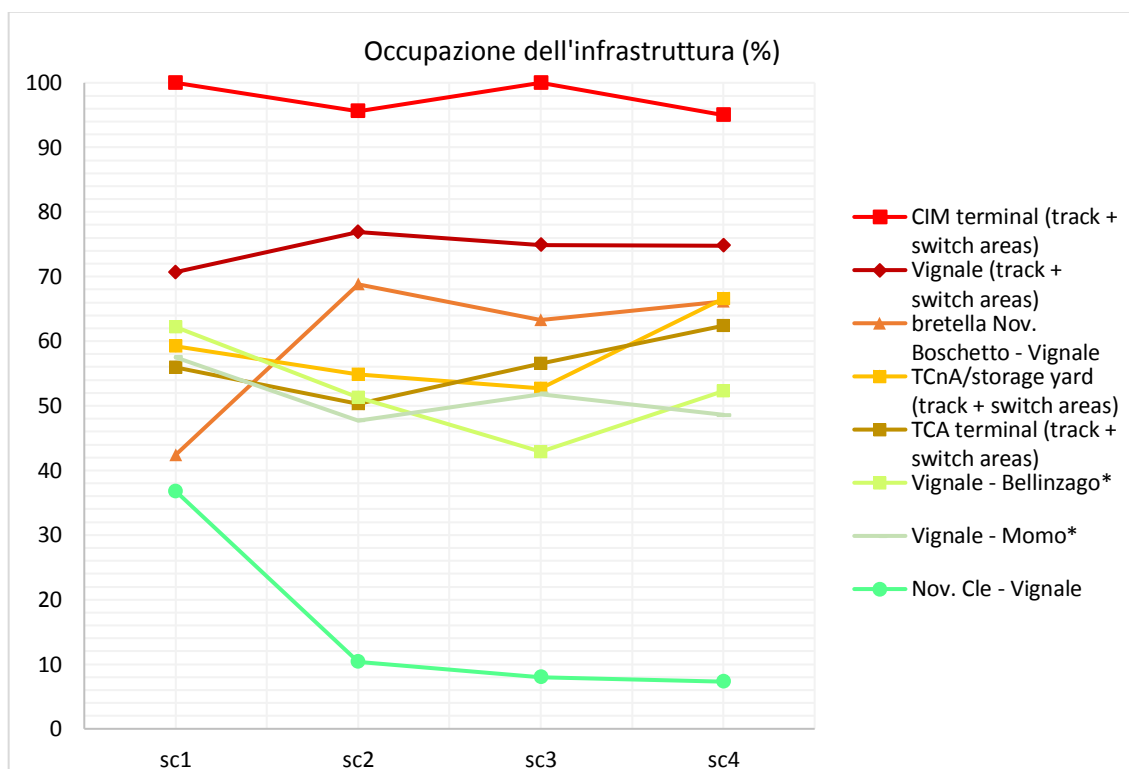


Figura A.2 Andamento dell'occupazione infrastrutturale in percentuale. Per il significato degli asterischi in legenda, si faccia riferimento alle tabelle seguenti.

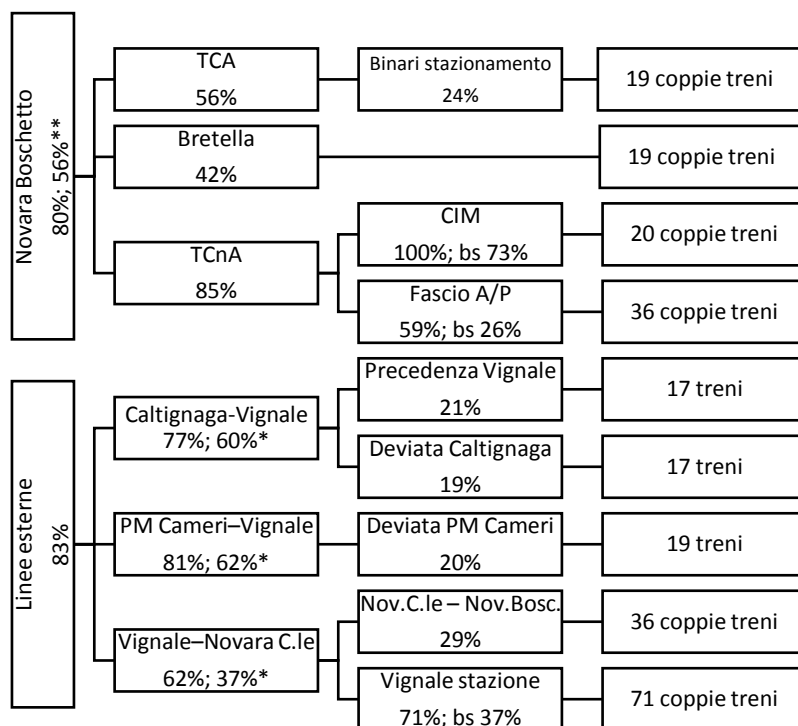


Figura A.3 Scenario 1 bt120, occupazione infrastruttura (*escluso Vignale; **escluso la bretella; bs: binari di stazionamento).

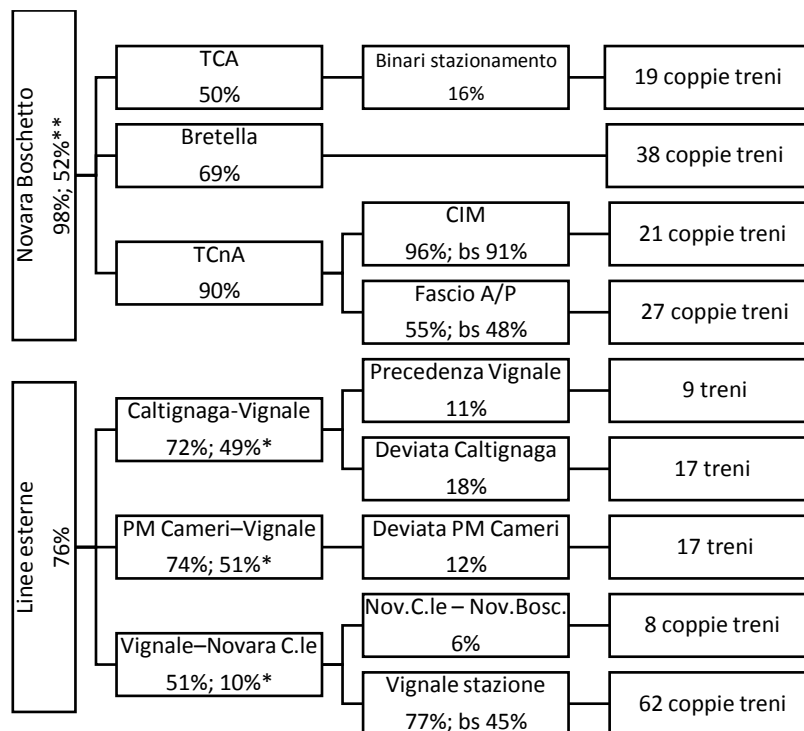


Figura A.4 Scenario 2 bt120, occupazione infrastruttura (*escluso Vignale; **escluso la bretella; bs: binari di stazionamento).

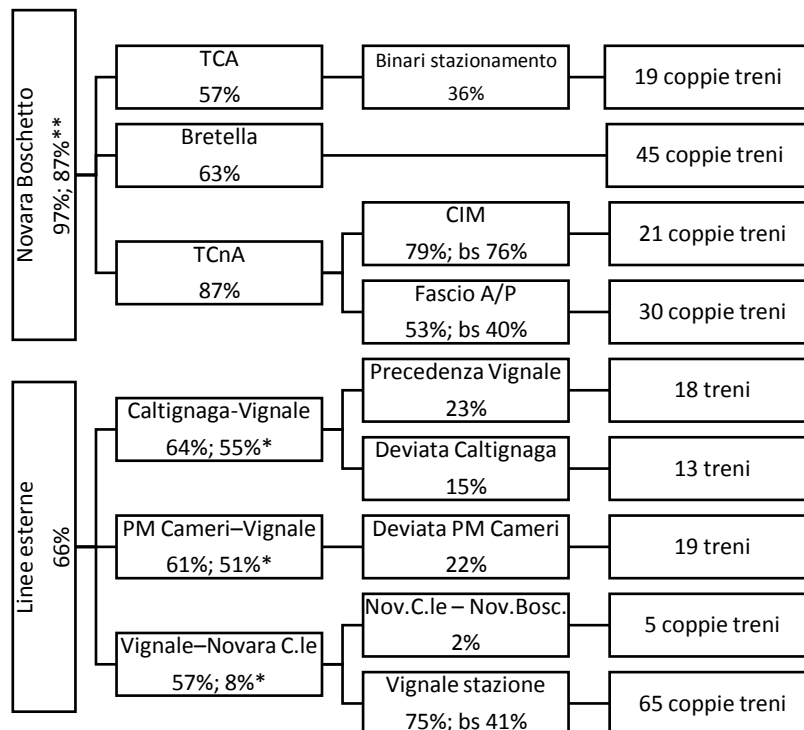


Figura A.5 Scenario 3 bt120, occupazione infrastruttura (*escluso Vignale; **escluso la bretella; bs: binari di stazionamento).

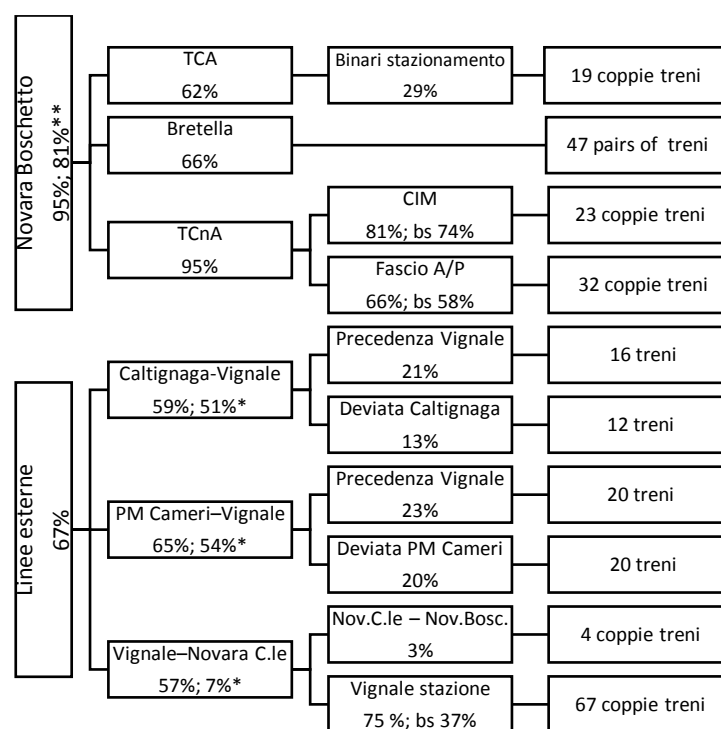


Figura A.6 Scenario 4 bt120, occupazione infrastruttura (*escluso Vignale; **escluso la bretella; bs: binari di stazionamento).

Stabilità dell'orario: UIC 406R

Per il calcolo della capacità consumata in relazione alla valutazione della stabilità dell'orario ferroviario, UIC 406R distingue le tratte semplici - con una lunghezza piuttosto limitata e che non contengono elementi particolarmente complessi - dai corridoi. I corridoi possono comprendere tratte di maggiore estensione, con un maggior numero di stazioni/incroci/precedenze, nonché nodi più complessi - stazioni con multiple piattaforme e aree deviatoi complessi, fasci di presa/consegna, ecc.

Il metodo UIC 406R (UIC, 2013) propone per i corridoi di valutare la capacità consumata dalle linee escludendo le operazioni nelle stazioni e separatamente calcolare la capacità consumata dalle stazioni. Per il calcolo e la valutazione della capacità consumata da queste ultime si scompone ulteriormente l'area deviatoi (*switch area*) da quella delle piattaforme/binari di stazionamento (*track area*). Dunque, per ognuna di queste sotto-classi - sezioni di linea escluse le operazioni nelle stazioni; aree deviatoi, piattaforme/binari di stazionamento dei nodi - l'UIC raccomanda dei valori massimi per la stabilità della circolazione ferroviaria. Per le linee questi valori possono essere assunti come "regola", essendo comprovati da un numero rilevante di studi (Tabella A.2). Per quanto riguarda

invece i nodi essi sono ancora allo stato sperimentale, nel senso che vi sono pochi dati empirici. In questo caso quindi è indicato che la capacità venga calcolata e valutata caso per caso - tenendo conto della fattibilità dell'orario e usabilità dell'infrastruttura - indipendentemente dai valori raccomandati dall'UIC (Tabella 3.2).

Tabella A.2 Tassi di occupazione proposti dall'UIC406R per le linee

Tipo di linea	Ora di punta	Periodo giornaliero
Linea a traffico passeggero suburbano	85%	70%
Linee ad alta velocità	75%	60%
Linee a traffico misto	75%	60%

Tabella A.3 Tassi di occupazione proposti dall'UIC406R per i nodi

Occupazione Nodi	
Aree deviatori (switch area)	60%...80%
Area di stazione (track area)	40%...50%

Nel caso in esame, i valori di *capacità consumata %* raccomandati dall'UIC - sia per linee che per nodi - non sono stati imposti come vincoli da rispettare durante la saturazione dell'orario (per approfondire le modalità impiegate si rimanda al Capitolo 4). La valutazione della capacità consumata % è stata invece fatta a posteriori. Dunque, il confronto con i valori proposti dall'UIC ha la funzione di mutua verifica:

- la rete è stabile perché presenta valori di capacità consumata conformi all'UIC;
- i valori proposti dall'UIC rispecchiano effettivamente sistemi ferroviari stabili (un orario ottenuto con metodi di saturazione/simulazione è in prima analisi fattibile e stabile⁹³, entro i limiti del metodo).

In Figura A.2 si riportano i consumi di capacità di tutti gli scenari simulati, con un buffer time di 120s (bt120) e uno nullo (bt0, risultati Capitolo 4), confrontati con i valori raccomandati dall'UIC 406R. Come si può notare in Tabella A.2, l'UIC non propone una serie graduale “capacità consumata - stabilità dell'orario di esercizio”, ma riporta un valore massimo di capacità consumata discriminante della stabilità (valore soglia). In Figura A.7

⁹³ Si ammette che l'orario possa essere fattibile e stabile (entro i limiti del metodo) perché simula la circolazione dei treni considerando tutti i vincoli del sistema - infrastruttura, materiale rotabile, esercizio - e un tempo cuscinetto conforme al livello di servizio richiesto dalle specifiche RFI (RFI, 2014/2015).

invece, sono stati considerati positivi - conformi all'UIC - tutti i valori al di sotto della soglia, mentre per i valori superiori si è dato un ordine di importanza in base al discostamento essa. Questo sottolinea che nonostante la capacità consumata dagli orari bt120 superano in alcuni casi i valori UIC, questi valori rientrano comunque in una fascia meno grave dei casi bt0. Ragionamento valido soprattutto per le sezioni di linea, sulle quali vi è maggiore chiarezza da parte dell'UIC sia sulle modalità di calcolo che di valutazione della capacità consumata. Per le stazioni, nel caso bt120, la stabilità generale risulta sempre soddisfatta stando alle indicazioni UIC anche se non è stata applicata la separazione dell'area deviatoi. Questo non incide sulla validità del risultato poiché considerando tutto il complesso formato da area deviatoi più i binari di stationamento, la capacità consumata risulta comunque maggiore rispetto alla sola area deviatoi.

Capacità consumata %	bt120				bt0			
Corridors	sc1	sc2	sc3	sc4	sc1	sc2	sc3	sc4
Nov. C. le - Vignale	36,8	10,4	8	7,3	44	19	5,7	6,1
Vignale - Momo*	57,5	47,7	51,8	48,6	62,8	58,1	60,3	64,7
Vignale - Bellinzago*	62,2	51,3	42,9	52,3	72,8	68,7	57,2	54,5
link Nov. Boschetto - Vignale	42,4	68,8	63,3	66,2	42,8	74,5	77	78,2
Stations								
Vignale (track + switch areas)	70,7	76,9	74,9	74,8	80,8	85,9	91,6	77
Vignale (track area)	37,1	44,6	40,5	37,3	39,4	49,3	56,6	45
Caltignaga (track + switch areas)	18,6	18,4	17,3	16,3	22,8	25	26,4	25,5
PM Cameri (track +switch areas)	19,6	12,2	21,8	20,2	22,3	29,4	27	15,2

Legenda		
Corridors UIC max 60%		
< 60%	60% - 70%	> 70%
Stations		
track + switch areas: max 80%		track area: max 50%
< 80%	80%	> 80%
< 50%	50%	>50 %

Figura A.7 Capacità consumata % confrontata con i valori UIC406R

Bibliografia

Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M. A., Tormos, P., & Lova, A. (2008). An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*.

Barber, F., Abril, M., Salido, M., Ingolotti, L., Tormos, P., & Lova, A. (2007). Survey of automated Systems for Railway Management, Technical Report DSIC-II/01/07, Department of Computer Systems and Computation, Technical University of Valencia.

Bendfeldt, J., Moh, U., & Muller, L. (2000). RailSys, a system to plan future railway needs. *WIT Transactions on The Built Environment*, (p. 50).

Bianchi, M. (1964). Potenzialità di linee ferroviarie . *Ingegneria Ferroviaria*.

Burdett, R., & Kozan, E. (2006). Techniques for absolute capacity determination in railways. *Transportation Research Part B* 40, 616-632.

Canciani, G. (1991). Criteri progettuali di rinnovo e potenziamento delle linee ferroviarie: modello di calcolo e di verifica della potenzialita'di circolazione. Istituto di Strade e Trasporti.

Cascetta, E. (2011). *Lectio Magistralis: L'era del container: shipping, logistica e globalizzazione*.

Cascetta, E., & Nuzzolo, A. (1980). Un modello analitico per il calcolo della capacità di circolazione delle linee ferroviarie. *Ingegneria Ferroviaria*.

Chapman, L. (2007). Transport and climate change: a review. *Journal of transport geography*, 15(5), 354-367.

Commissione Europea. (2009). TEN-T: riesame della politica. Verso una migliore integrazione della rete transeuropea di trasporto al servizio di una migliore politica comune dei trasporti. Libro verde dei TRasporti.

Commissione Europea. (2011). Libro bianco dei Trasporti: Tabella di marcia verso uno spazio europeo unico dei trasporti – per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile.

Commissione Europea. (2014). Le politiche dell'Unione europea: Trasporti.

Commissione Europea. (2019, 03 04). Infrastructure - TEN-T - Connecting Europe. Tratto da Mobility and Transport:
https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure_en

Commissione europea, Confederazione svizzera. (2018). Observation et analyse des flux de transports de marchandise transalpins. Rapport annuel 2016.

Confederazione svizzera. (2017). Rapporto sul trasferimento del traffico. Periodo in esame: luglio 2015 – giugno 2017.

Confederazione Svizzera. (2018). Traffico merci transalpino in Svizzera. Indicatori 2017 e interpretazione dell'evoluzione.

Consiglio federale svizzero; Governo della Repubblica Italiana. (2014). Accordo tra il Consiglio federale svizzero e il Governo della Repubblica Italiana per lo sviluppo delle infrastrutture della rete ferroviaria di collegamento tra la Svizzera e l'Italia.

Corazza, G., & Musso, A. (1991). La circolazione e gli impianti ferroviari. La verifica a lungo termine. *Ingegneria Ferroviaria*, Ottobre, 607-618.

Corridor Rhine Alpine. (2018). Rail Freight Corridor RHINE-ALPINE. Tratto da Corridor Rhine Alpine: <https://www.corridor-rhine-alpine.eu>

Corriere, F. (1982). Potenzialità e regolarità di esercizio nelle linee ferroviarie. *Ingegneria Ferroviaria*.

Coviello, N. (2018). Timetable-based capacity evaluations: Analysis of a sub-urban single-track railway. Coviello, Nicola. (2018). Timetable-based capacity evaluations: Analysis of a sub-urban single-track railway. *Ingegneria Ferroviaria*, 73, 287-319.

Coviello, N., Pellegrini, P., Sobieraj, S., & Rodriguez, J. (2017). Stability of saturated timetables: the influence of buffer times. In 7th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis-Rail Lille, 17.

Dalla Chiara, B. (2015). Sistemi di trasporto intermodali: progettazione ed esercizio. Egaf Edizioni srl.

De Kort, A., Heidergott, B., & Ayhan, H. (2003). A probabilistic (max, +) approach for determining railway infrastructure capacity. *European Journal of Operational Research*, 148(3), 644-661.

De Oña Lopez, J. (2017). Transporte Intermodal, Dispense del corso Transportes presso Universidad de Granada Transportes ETSI Caminos, Canales y Puertos.

Delfino, A., & Galaverna, M. (2003). Blocco fisso e blocco mobile: analisi di potenzialità. *Ingegneria Ferroviaria*, Giugno.

Deutsche Bundesbahn. (1979). Deutsche Bundesbahn: Richtlinien für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Fahrstraßenknoten, 405, Abschnitt 10.

European Commission. (2013, 06 30). TEN-T Projects. Tratto da Innovation and Networks Executive Agency: <https://ec.europa.eu/inea/en/ten-t/ten-t-projects>

European Commission. (2016). Measuring and upgrading the clearance gauge of railway lines.

Eurostat. (2018, 04). Freight transport statistics - modal split. Tratto da Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained>

Genovesi, P., & Ronzino, C. (2006). Flussi e capacità delle line ferroviarie a doppio binario. *Ingegneria Ferroviaria*, 7-8.

Goverde, R. M., & Hansen, I. A. (2013, August). Performance indicators for railway timetables. In 2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings, p. 301-306.

Goverde, R., Corman, F., & D'Ariano, A. (2013). Railway line capacity consumption of different railway signalling systems under scheduled and disturbed conditions. *Journal of rail transport planning & management*, 3(3), 78-94.

Han, S., Yue, Y., & Zhou, L. (2014). Carrying capacity of railway station by microscopic simulation method. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE 17th International Conference*, 2725-2731.

Hansen, I. (2000). Station capacity and stability of train operations. *WIT Transactions on The Built Environment*, 50.

Hansen, I. A., & Pachl, J. (2014). *Railway timetabling & operations*. Hamburg: Eurailpress.

Hansen, S., Landex, A., & Kaas, A. H. (2006). The network effects of railway investments. In *Proceedings of the 10th International conference on Computers* , 45.

Hillman, J. E. (2018, 03 6). The Rise of China-Europe Railways. Tratto da CSIS: Centre for Strategic & International Studies: <https://www.csis.org/analysis/rise-china-europe-railways>

ITMMA. (2009). Economic analysis of the European seaport system, Report serving as input for the discussion on the TEN-T policy. Antwerp.

Jensen, L., Landex, A., Nielsen, O., Kroon, L., & Schmidt, M. (2017). Strategic assessment of capacity consumption in railway networks: Framework and model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 74, 126-149.

Kaas, A. (1991). Strategic capacity analysis of networks: developing and practical use of capacity model for railway networks. ScanRail Consult, Technical University of Denmark.

Kaas, A. H. (2000). Punctuality model for railways. *Proc. of the 7th International*.

KFH Group. (2013). Transit capacity and quality of service manual. Washington, DC.

- Kontaxi, E., & Ricci, S. (2009). Techniques and methodologies for carrying capacity evaluation: comparative analysis and integration perspectives. *Ingegneria Ferroviaria*, 64(12), 1051-1080.
- Lai, Y., Liu, Y., & Lin, Y. (2015). Standardization of capacity unit for headway-based rail capacity analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 57, 68-84.
- Landex, A. (2011). Capacity at Railway Stations. In 9th World Congress on Railway Research.
- Landex, A., & Jensen, L. (2013). Measures for track complexity and robustness of operation at stations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 3(1-2), 22-35.
- Landex, A., Kaas, A. H., & Nielsen, O. A. (2008). Methods to estimate railway capacity and passenger delays. Technical University of Denmark (DTU).
- Landex, A., Kaas, A., Schittenhelm, B., & Schneider-Tilli, J. (2006). Practical use of the UIC 406 capacity leaflet by including timetable tools in the investigations. *WIT Transactions on The Built Environment*, 88.
- Macharis, C., & Bontekoning, Y. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. *European Journal of operational research*, 153(2), 400-416.
- Malavasi, G., & Ricci, S. (2000). Carrying capacity of railway networks: interaction of line and node models. *WIT Transactions on The Built Environment*, 50.
- Malavasi, G., Molková, T., Ricci, S., & Rotoli, F. (2014). A synthetic approach to the evaluation of the carrying capacity of complex railway nodes. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 4(1-2), 28-42.
- Marangon, M. (2015). Analysis of the impact of speed variation dynamics on the optimization of the real-time railway management problem.
- Muratori, M., Smith, S., Kyle, P., Link, R., & Mignone, B. (2017). Role of the freight sector in future climate change mitigation scenarios. *Environmental science & technology*, 51(6), 3526-3533.
- Mussone, L., & Calvo, R. (2013). An analytical approach to calculate the capacity of a railway system. *European Journal of Operational Research*, 228(1), 11-23.
- Nash, A., & Huerlimann, D. (2004). Railroad simulation using OpenTrack. *WIT Transactions on The Built Environment*, 74, (p. 45{54}).
- Penner, J., Lister, D., Griggs, D., Dokken, D., & McFarland, M. (1999). IPCC Special Report: Aviation and the Global Atmosphere. Cambridge University Press, UK, pp. 373.

- Petersen, E. (1974). Over the road transit time for a single track railway. *Transportation Science*, 8, 65-74.
- Petersen, E., & Taylor, A. (1982). A structured model for rail line simulation and optimization. *Transportation Science*, 16(2), 192-206.
- Potthoff, G. (1960). *Verkehrsstnomungslehre 1*. Transpress VEB Verlag für.
- Pouryousef, H., Lautala, P., & White, T. (2015). Railroad capacity tools and methodologies in the US and Europe. *Journal of Modern Transportation*, 23(1), 30-42.
- Rail Net Europe. (2018). Rail Freight Corridors. Tratto da Rail Net Europe.
- Reitani, G., & Malaspina, R. (1995). La potenzialità di circolazione ferroviaria su linee a singolo binario - un modello di calcolo. *Ingegneria Ferroviaria*, Agosto.
- Rodrigue, J., & Notteboom, T. (2017). Re-assessing port-hinterland relationships in the context of global commodity chains. *Ports, cities, and global supply chains*, 67-82.
- Rotoli, F., Ricci, S., Navajas Cawood, E., & Malavasi, G. (2015). Capacity versus punctuality assessment procedures and accessibility. *Ingegneria Ferroviaria*.
- Sacco, L., Coltro, N., & Dalla Chiara, B. (2011). Calculations of the carrying capacity and energy consumption on the Turin-Modane railway connection: application of models and simulations. *Ingegneria ferroviaria*, 66, 831-858.
- Sameni, M., Dingler, M., Preston, J., & Barkan, C. (2011). Profit-generating capacity for a freight railroad. In *Transportation Research Board 90th Annual Meeting*.
- Schramm, H., & Zhang, S. (2018). Eurasian Rail Freight in the One Belt One Road Era. In *The 30th NOFOMA Conference 2018*. NOFOMA, (p. 769-798).
- Shangquan, G. (2000). Economic globalization: trends, risks and risk prevention., *Economic & Social Affairs*, CDP Backround Paper, 1.
- Sito Web intermodale24-rail. (2018). Le linee merci del corridoio Reno-Alpino in Italia. Tratto da Sito Web intermodale24-rail: <http://intermodale24-rail.net/>
- Sito Web RAlpin. (2018). RAlpin. Tratto da Sito Web RAlpin: <http://www.ralpin.ch>
- Sito Web TrasportoEuropa. (2018). Automazione spinta al nuovo terminal container di Vado Ligure . Tratto da TrasportoEuropa: <http://www.trasportoeuropa.it>
- Sogin, S., Dick, C., Lai, Y., & Barkan, C. (2013). Analyzing the incremental transition from single to double track railway lines. In *Proceedings of the International Association of Railway Operations Research (IAROR) 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, (p. 1-20).

- Theeg, G. (2009). Railway Signalling & Interlocking: International Compendium. Eurailpress.
- Today. (2017). Tratto da TODAY, Singapore newspaper: www.todayonline.com
- UIC. (1979). UIC Leaflet 405-1 R, Methode Destinee a determiner la capacite de lignes.
- UIC. (2004). Code 406: Capacity. Paris.
- UIC. (2013). Code 406 R: Capacity. Paris.
- UIC, Roland Berger. (2017). Study: Eurasian rail corridors. Parigi.
- UN/ECE. (2001). Terminology on Combined Transport. New York and Geneva, United Nations (UN) & Economic Commission for Europe.
- Unione Europea. (2014). Le politiche dell'Unione Europea: i Trasporti.
- Vicuna, G. (1993). Organizzazione e tecnica ferroviaria. CIFI.
- World Development Indicators. (2018, Novembre 14). <https://data.worldbank.org>.
Tratto il giorno Gennaio 2019
- World Trade Organisation. (2018). World Trade Statistical Review.
- Yuan, J., & Hansen, I. (2004). Analysis of scheduled and real capacity utilisation at a major Dutch railway station. WIT Transactions on The Built Environment, 74.