

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio di tracciato e simulazione di esercizio di  
una ferrovia a singolo binario: il progetto di un  
tunnel transandino in Perù.**



Relatori:

Prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA  
Dott. Ing. Nicola COVIELLO

Candidato:

Rodrigo Maximiliano,  
PATRESE PRIETO

Relatore esterno:

Ing. Simone EANDI (Geodata SpA)

Luglio 2018



# Ringraziamenti

Quisiera agradecer principalmente los que fueron, son y serán mis pilares infalibles en esta vida:

A Dios por guiar siempre mis pasos en el buen camino;

A mi mamá Beatriz, mi único ídolo en esta tierra, por el más grande ejemplo de trabajo, constancia y convicción, mostrándome que todo es posible con esfuerzo y dedicación. Por darme las alas, la inspiración y los consejos necesarios siempre y en todo momento;

A mi hermano Facundo por cuidarme desde pequeño y saber mostrarme el mundo, por ser un ejemplo de pasión en su vocación como tenista.

A Lisandro, un hermano de la vida que me dio la facultad, por su ejemplo de bondad, alegría y enorme corazón.

También a mis tíos Elsa y Quito que desde pequeño me han sido cercanos mostrándome lo lindo que es la vida.

Por último a todas y cada una de las grandes y lindas personas, en Córdoba y Torino, con las que me tocó recorrer parte de este extenso y arduo camino, en el cual se debió pelear más de una vez la misma batalla, sobre todo con uno mismo, para aprender la lección y poder triunfar.

# Indice

<b>Premesse</b>	<b>6</b>
Obiettivi . . . . .	6
Stato dell'arte . . . . .	6
<b>1 Introduzione</b>	<b>9</b>
1.1 Ubicazione . . . . .	9
1.2 Contesto sudamericano . . . . .	9
1.3 Contesto nazionale . . . . .	11
1.4 Contesto ferroviario in Lima . . . . .	12
1.5 Contesto politico . . . . .	14
<b>2 La Linea Transandina</b>	<b>15</b>
2.1 Il percorso . . . . .	16
2.1.1 Pendenza longitudinale . . . . .	17
2.1.2 Raggi di curvatura . . . . .	18
2.1.3 Anse a "zig-zag" . . . . .	18
2.1.4 Materiale rotabile . . . . .	23
2.2 Il progetto "Tunel Transandino" . . . . .	27
2.2.1 Progetto di Pre-Fattibilità . . . . .	27
2.2.2 Progetto di Fattibilità . . . . .	32
<b>3 Metodologia di modellizzazione</b>	<b>33</b>
3.1 Cenni sul simulatore ferroviario Opentrack . . . . .	33
3.2 Dati di ingresso . . . . .	34
3.2.1 Infrastruttura . . . . .	34
3.2.2 Materiale rotabile . . . . .	36
3.2.3 Orario di servizio . . . . .	40
3.3 Simulazione . . . . .	42
3.4 Dati in uscita . . . . .	43
3.4.1 Altri dati di uscita . . . . .	44
<b>4 Approccio di modellizzazione</b>	<b>48</b>
4.1 Infrastruttura . . . . .	48
4.1.1 Planimetria . . . . .	49
4.1.2 Altimetria . . . . .	51
4.1.3 Segnalamento . . . . .	52
4.1.4 Tunnel e velocità massima . . . . .	53
4.1.5 Stazioni e zig-zag . . . . .	53
4.2 Materiale rotabile . . . . .	54

4.3	Orario grafico . . . . .	54
4.4	Limitazioni della modellizzazione . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Effetti della modellizzazione e simulazione</b>	<b>55</b>
5.1	Situazione 0: . . . . .	57
5.2	Situazione 1.0: . . . . .	59
5.3	Situazione 1.1: . . . . .	61
5.4	Situazione 1.2: . . . . .	63
5.5	Situazione 1.3: . . . . .	65
5.6	Situazione 2.0: . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Analisi dei risultati</b>	<b>69</b>
6.1	Capacità . . . . .	69
6.2	Costi e tempi di percorrenza . . . . .	70
6.3	Domanda vs. Capacità . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>72</b>
	<b>Appendice A</b>	<b>74</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>76</b>

# Elenco delle figure

1.1	Repubblica del Perú. . . . .	10
1.2	Ferrocarril Central. . . . .	10
1.3	Assi COSIPLAN. . . . .	11
1.4	Rete del metro di Lima e Callao. . . . .	13
1.5	Rete ferroviaria di Lima. . . . .	13
1.6	Sistema ferroviario di Lima. . . . .	14
2.1	Tracciato Lima-La Oroya. . . . .	16
2.2	Profilo Longitudinale. . . . .	17
2.3	Pendenza Longitudinale. . . . .	17
2.4	Raggi di curvatura minori ai consentiti. . . . .	18
2.5	Zig-Zags lungo il percorso. . . . .	19
2.6	Locomotiva essendo girata a san Bartolomé. . . . .	20
2.7	Schema del Zig-Zag/Stazione San Bartolomé. . . . .	20
2.8	Foto aerea del Zig-Zag/Stazione San Bartolomé. . . . .	21
2.9	Zig-Zag 7 e 8. . . . .	21
2.10	Zig-Zag 3 P.K. 109+800. . . . .	21
2.11	Zig-Zag 8 P.K. 137+700. . . . .	22
2.12	Vista aerea del ZZ8. . . . .	22
2.13	Diagrama Trazione-Velocità C30-7. . . . .	23
2.14	Diagrama Trazione-Velocità C40-8. . . . .	24
2.15	Locomotiva N°1012 FCCA. . . . .	25
2.16	Locomotive sotto modifica a Chosica. . . . .	25
2.17	Carico massimo:42,000kg–Tara:12,500kg. Totale: 54.5t(14t/asse). . . . .	25
2.18	Carico massimo:65,000kg–Tara:24,400kg. Totale: 89.4t(22.5t/asse). . . . .	26
2.19	Carico massimo:94,000kg–Tara:25,300kg. Totale:119.3t(30t/asse). . . . .	26
2.20	Progetto "Tunnel Transandino". . . . .	28
2.21	Sezione scavate con TBM. . . . .	29
2.22	Sezione scavata con esplosivi. . . . .	29
2.23	Tunnel San Bartolomé. . . . .	30
2.24	Tunnel San Miguel del Viso. . . . .	31
2.25	Tunnel Transandino. . . . .	31
2.26	Estremi del Tunnel Transandino. . . . .	31
3.1	Schema dei dati di input (rosso) e output (verde). . . . .	34
3.2	Esempio di incrocio. . . . .	34
3.3	Manovre consentite all'incrocio. . . . .	34
3.4	Finestre di editing vertici (sinistra) e archi (destra). . . . .	35
3.5	Esempio della rappresentazione di una stazione. . . . .	36

3.6	Esempi di treni (in rosso le motrici). . . . .	36
3.7	Tendina input motrice (sinistra) e diagramma di trazione (destra). . .	37
3.8	Tendina dei treni nella database. . . . .	38
3.9	Tendina di input di un treno. . . . .	38
3.10	Tendina inerente all'ingresso del orario di servizio. . . . .	41
3.11	Orario grafico evidenziando quello programmato e quello simulato. . .	41
3.12	Schema dei percorsi. . . . .	42
3.13	Esempio di istante di simulazione. . . . .	43
3.14	Esempio di interfaccia di simulazione. . . . .	43
3.15	Diagramma spazio-tempo di diverse corse. . . . .	44
3.16	Diagramma velocità-spazio. . . . .	45
3.17	Diagramma di occupazione dei binari di una stazione. . . . .	45
3.18	Statistiche sull'occupazione dell'infrastruttura. . . . .	46
3.19	Statistiche dei ritardi. . . . .	46
3.20	Esempio dei dati di output. . . . .	47
3.21	Esempio di analisi dei dati di output. . . . .	47
4.1	Scenari modellizzati. . . . .	49
4.2	Polilinea spaziale progettata su Google maps. . . . .	49
4.3	Polilinea spaziale in un sistema di coordinate locale. . . . .	50
4.4	Ricavo delle coordinate del centro del cerchio. . . . .	50
4.5	Processo di ricavo dei raggi di curvatura. . . . .	51
4.6	Parte del risultato. . . . .	51
4.7	Modellizzazione dell'altimetria della linea. . . . .	52
4.8	Dati di altimetria (blu), dati della modellizzazione (rosso). . . . .	52
4.9	Modelizzazione del segnalamento. . . . .	53
4.10	Stazioni e Zig-Zags dove non si possono fare incrociare i treni. . . . .	53
4.11	Stazioni e Zig-Zags dove si possono fare incrociare i treni. . . . .	53
5.1	Schema Infrastrutturale Situazione 0. . . . .	57
5.2	Schema Infrastrutturale Situazione 1.0. . . . .	59
5.3	Schema Infrastrutturale Situazione 1.1. . . . .	61
5.4	Schema Infrastrutturale Situazione 1.2. . . . .	63
5.5	Schema Infrastrutturale Situazione 1.3. . . . .	65
5.6	Schema Infrastrutturale Situazione 2.0. . . . .	67
6.1	Valori di Capacità delle diverse situazione con segnalamento fitto (dietro) e segnalamento tra le stazioni (avanti). . . . .	69
6.2	Costi preliminari delle situazioni e tempi di percorrenza. . . . .	70

# Elenco delle tabelle

2.1	Stazioni in uso. . . . .	16
2.2	Zig-Zags esistenti. . . . .	19
2.3	Caratteristiche di inizio e fine delle gallerie. . . . .	29
5.1	Descrizione del tracciato. . . . .	57
5.2	Descrizione Materiale rotabile. . . . .	57
5.3	Riassunto Risultati Situazione 0 . . . . .	57
5.4	Descrizione del tracciato. . . . .	59
5.5	Descrizione Materiale rotabile. . . . .	59
5.6	Riassunto Risultati Situazione 1.0 . . . . .	59
5.7	Analisi Costi Situazione 1.0. . . . .	59
5.8	Descrizione del tracciato. . . . .	61
5.9	Descrizione Materiale rotabile. . . . .	61
5.10	Riassunto Risultati Situazione 1.1 . . . . .	61
5.11	Analisi Costi Situazione 1.1. . . . .	61
5.12	Descrizione del tracciato. . . . .	63
5.13	Descrizione Materiale rotabile. . . . .	63
5.14	Riassunto Risultati Situazione 1.2 . . . . .	63
5.15	Analisi Costi Situazione 1.2. . . . .	63
5.16	Descrizione del tracciato. . . . .	65
5.17	Descrizione Materiale rotabile - Situazione 1.3 . . . . .	65
5.18	Riassunto Risultati Situazione 1.3 . . . . .	65
5.19	Analisi Costi Situazione 1.3. . . . .	65
5.20	Descrizione del tracciato. . . . .	67
5.21	Materiale rotabile - Situazione 2.0 . . . . .	67
5.22	Riassunto Risultati Situazione 2.0 . . . . .	67
5.23	Analisi Costi Situazione 2.0. . . . .	67
6.1	Domanda attuale e progettata [ton/annue]. . . . .	71

# Premesse

## Obiettivi

L'obiettivo principale di questa Tesi di Laurea Magistrale è di effettuare degli analisi, tramite utilizzo del simulatore ferroviario OpenTrack, sugli effetti che gli interventi infrastrutturali e la modalità di esercizio, nonché impianti, segnalamento e quant'altro possono generare sulla produttività/capacità della linea; come ultimo con considerazioni di carattere economico.

Come secondo obiettivo s'intende individuare l'ordine cronologico delle opere guardando i benefici degli interventi infrastrutturali e tenendo in considerazione un calcolo preliminare dei costi basato sul progetto in attuale elaborazione.

Questa tesi viene realizzata in collaborazione con l'azienda Geodata S.p.A., che ha fornito molti dati necessari per le simulazioni del tracciato e la stima dei costi; in quanto essa gestisce il rinnovo della linea con coinvolgimento di Italferr; due delle aziende costituenti del consorzio vincitore per la elaborazione del progetto di fattibilità.

## Stato dell'arte

Nella ricerca iniziata con motivo di definire un punto di partenza per questa tesi si sono ritrovati nelle diverse database accademiche, come ad esempio *Google Scholar*[3], *Scopus*[4], *Pico*[5], ecc, non molte citazione su questa linea oltre ad ambiti di congestione sulle diverse strade del paese intorno alla città di Lima, oppure racconti storici di come è stata costruita.

Nel primo gruppo, dove la Linea Transandina viene cenata per essere una possibilità per riorganizzare la mobilità del traffico, si pensa che essa possa attrarre domanda, specialmente merce la quale attualmente viaggia su strada principalmente, e poter così alleggerirla di mezzi pesanti i quali sono partecipi di tanti incidenti stradali avendo provocato uno sbalzo dei morti per incidenti negli ultimi anni. Vedasi[6].

Dal punto di vista storico, questa linea è molto apprezzabile, perché ha permesso dopo la sua costruzione di velocizzare il trasporto in ambito montagnoso lasciando di lato il mulo per distanze specialmente lunghe.[7].

Per questioni tecniche generali attuali, è possibile di trovare informazione sul tracciato e sul materiale rotabile in un blog[8] che fa vedere in diverse pubblicazioni la percorrenza di un treno su gran parte della linea.

In oltre, nella ricerca menzionata precedentemente, si sono ritrovati diversi analisi su linee ferroviarie, ma di solito questi vengono fatti con diversi motivi: come ad esempio generare gli orari grafici in modo automatico con motivo di studiare la capacità della linea e le perturbazioni su di essa[9], oppure valutare la influenza del sistema di segnalamento sulla potenzialità della linea trans-mongolica a singolo binario[10]. Si può dire anche che la maggioranza delle pubblicazioni accademiche riguardante a le ferrovie sono di carattere strutturale, ovvero si centrano in ricavare, mediante analisi FEM, le vibrazioni, forze, accelerazioni, tensioni, ecc, dell'interazione convoglio-sovrastuttura-terreno[11]; possono anche ritrovarsi articoli sugli impatti acustici di una linea ferroviaria[12], in questo caso su una valle alpina; ma ci sono tanti altri simili a esso.

La tesi che si presenta, motivata dal sottoscritto, viene sviluppata in quattro parti: La prima di quelle, in una prima fase si racconta dove e come è questa linea ferroviaria che attualmente occupa il secondo posto delle più alte al mondo arrivando oltre 4800 m slm nei suoi primi 170 km di percorso, con il suo origine nella città di Lima, capitale del Perù, percorre un totale di 222 km in direzione nord-ovest fino alla città di La Oroya piazzata sulle Ande Peruviane a 3750 m slm circa. Possiede caratteristiche rare da trovare nelle ferrovie odierne, come ben 13 anse a "zig-zag", una pendenza longitudinale per gran parte del suo sviluppo del 33‰, ma anche un tratto di poche centinaia di metri dove essa arriva al 44‰ prima di arrivare in cima. In una seconda fase si prevede raccontare il motivo del progetto, ovvero la riorganizzazione del traffico intorno alla capitale e la ristrutturazione del traffico merce dell'industria mineraria localizzata sulla cordigliera che bisogna arrivare in tempo al porto limegno del Callao. Nell'ultima fase di questa prima parte si tiene a raccontare e illustrare il progetto in sé, che si prevede per ammodernare questa linea ferroviaria in modo di abbassare il tempo di percorrenza dei treni e aumentare in modo considerevole la capacità. Ciò significa di dettagliare le caratteristiche dei tre tunnel, con una lunghezza complessiva di 46 km circa, che si prevedono per eliminare il tratto di maggior pendenza, accorciare il percorso e lasciare da parte l'utilizzo delle anse. La seconda parte, dove si spiega di maniera introduttiva l'utilizzo del simulatore ferroviario OpenTrack. Il suo utilizzo a preferenze degli altri sono anche ampiamente diffusi, come ad esempio AdmiRail o VISUM, è stato perché esso si tiene a disposizione nel dipartimento accademico dell'Università inerente al tema.

La terza parte comprende la applicazione del software al caso di studio e la sua modellizzazione. Ovvero spiegare sei fasi che rappresenterebbero i diversi tempi dell'opera, dall'attualità fino ad avere una linea completamente ristrutturata. Si cercherà di quantificare l'influenza del sistema di segnalamento, del distanziamento degli incroci e dei raggi di curvatura sulla produttività di questa linea. Come fattore aggiunto a ogni situazione si affiancherà una prima stima dei costi degli interventi infrastrutturali.

L'ultima parte raccoglie i risultati delle simulazioni per concludere come primo, che i tre tunnel servono funzionanti al più presto possibile, ma anche una rettificazione nei raggi di curvatura di certe curve più un apposito armamento ferroviario con la sopraelevazione indicata per ogni caso in modo di poter far viaggiare treni più pesanti sulla linea tal di aumentare la velocità massima ammessa, ovvero di avere un rango di circolazione più conveniente. Come seconda gran conclusione, secondo la potenziale domanda che il modo di trasporto su ferro potrebbe acquisire non ba-

sterrebbe che l'intera tratta sia a singolo binario, bensì dovrà essere completamente raddoppiata, caso che rimane aperto per l'ambito economico-finanziario in modo di determinare se è o no conveniente dovuto ai forti costi che implicherebbe raddoppiare una linea ferroviaria in alta montagna.

# Capitolo 1

## Introduzione

In questo primo capitolo, si descrive la localizzazione e si cercherà di inquadrare i diversi contesti di questa ferrovia Transandina.

### 1.1 Ubicazione

La linea transandina si trova nel centro-ovest del Perù, attraversa le regioni di Lima e Junín, passando dalla provincia del Callao ed i dipartimenti di Lima e Junín. Figura1.1

Più precisamente la linea ferroviaria parte dal porto del Callao nella città di Lima e percorre 222km in direzione Nord-Est arrivando a La Oroya che si trova dall'altro lato dei picchi più alti della cordillera degli Andes.

Il porto del Callao è ubicato al Nord-Ovest della città di Lima, ma la sua giurisdizione corrisponde alla provincia costituzionale del Callao, la quale accoglie anche una certa parte della capitale Peruviana.

Dall'altra parte la città di La Oroya, ubicata in pieno ambito montagnoso, è un punto di convergenza di tre vie di comunicazione del centro del paese; da lì si può andare verso Nord alla città di Pasco, verso Sud alla città di Huancavelica, oppure verso la costa alla capitale. Figura1.2.

### 1.2 Contesto sudamericano

La linea ferroviaria compone il corridoio multimodale bioceanico che fa parte dell'asse Del Amazonas Ramo Centro, uno dei dieci assi definiti dal Consiglio Sudamericano per l'Infrastruttura e la Pianificazione (COSIPLAN dato il suo acronimo in spagnolo) Figura1.3, il quale è uno dei consigli dell'Unione di Nazioni Sudamericane (UNASUR), trattato firmato nel anno 2008 dai rispettivi presidenti dei dodici paesi che appartengono alla parte Sud del continente Americano.

Il COSIPLAN viene definito come l'istanza di discussione politica e strategica per l'implementazione e l'integrazione dell'infrastruttura dell'America del Sud, con compromesso di sviluppo sociale, economico ed ambientale. Esso è composto dai ministri dell'infrastruttura e pianificazione e i suoi equivalenti designati per gli stati membri dell'UNASUR.

Il suo compito è pianificare l'infrastruttura per l'integrazione regionale, incoraggiare la cooperazione regionale in pianificazione ed infrastruttura mediante alleanze strate-



Figura 1.1: Repubblica del Perú.

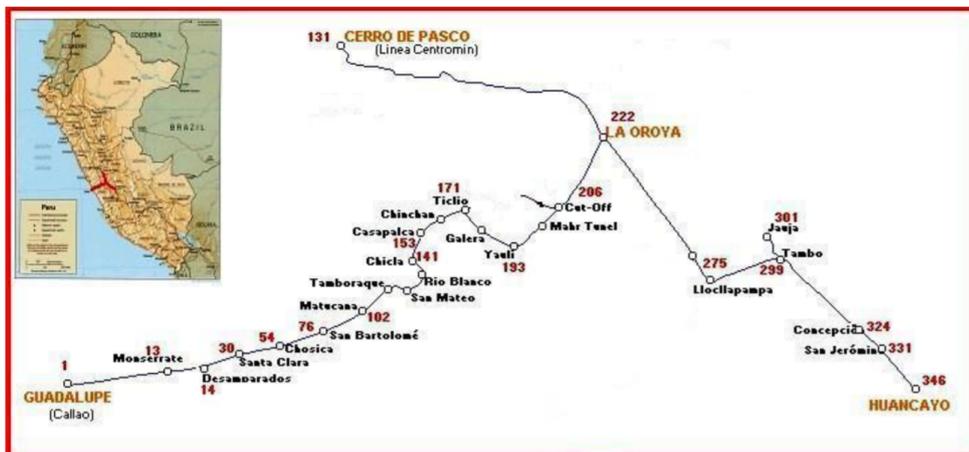


Figura 1.2: Ferrocarril Central.

giche tra i vari paesi, promuovere la contabilizzazione dei marchi normativi esistenti che regolano lo sviluppo e l'operazione dell'infrastruttura nella regione e identificare e spingere l'esecuzione dei progetti prioritari per l'integrazione e valutare alternative per il suo finanziamento.

In relazione al suo compito e con l'aiuto dell'Iniziativa per l'Integrazione dell'Infrastruttura Regionale Sudamericana (IIRSA[1]), meccanismo istituzionale di coordinamento tra i vari governi, è stato elaborato un Piano di Azione Strategico (PAE) 2012-2022 e un rispettivo Portfolio di Progetti Prioritari (APP dato il suo acronimo in spagnolo) per essere portati avanti con immediatezza.

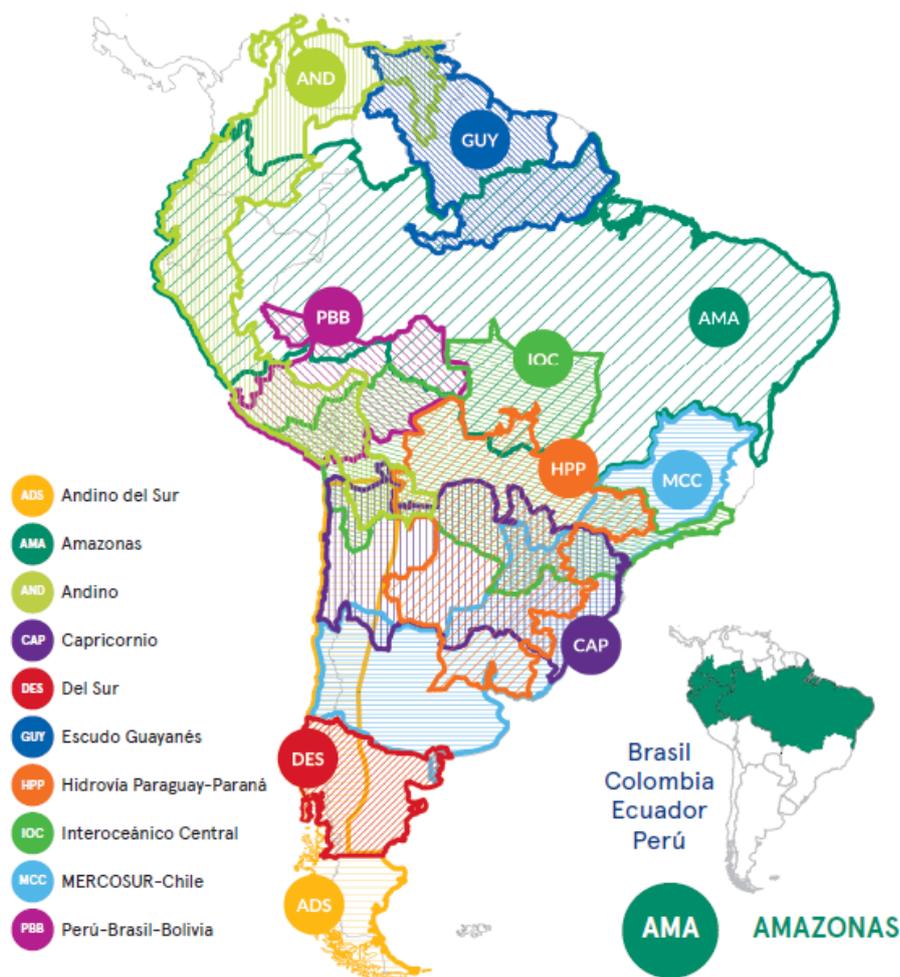


Figura 1.3: Assi COSIPLAN.

### 1.3 Contesto nazionale

Su forze della localizzazione geografica della linea, essa viene utilizzata in parte come mezzo di trasporto della notevole industria mineraria che presenta la cordigliera delle Ande, e alla principale raffineria di metalli piazzata a La Oroya[2]. Ma essa non solo serve all'industria mineraria, vi sono altri settori supportati dalla presenza di questo percorso ferroviario, come ad esempio la produzione metallurgica, agricola, ecc. Si può dire che il suo utilizzo è analogo a tutte le altre vie ferroviarie del Paese, dove

questo modo di trasporto non è il più utilizzato per il trasporto merci.

Il Ministero di Trasporto e Comunicazioni sta lavorando molto intensamente in questa zona, nei diversi modi di trasporto del corridoio menzionato precedentemente. Sta investendo molto ad esempio per migliorare la capacità dell'autostrada parallela a questa linea ferroviaria, con la realizzazione di ponti e viadotti, allargamenti dei raggi delle curve, ecc. Insieme a progetti di mobilità delle persone che includerebbero un treno regionale per collegare la capitale con le località al di fuori del contesto urbano.

## 1.4 Contesto ferroviario in Lima

La capitale Peruviana contiene il 30% della popolazione del Paese, circa 9.8 milioni di abitanti secondo il censimento del 2015, che la fanno posizionare tra le cinque città più popolate dell'America Meridionale. Questo fa sì che negli ultimi anni si sia disegnata una rete ferroviaria in parte sotterranea ed in parte sopraelevata per gestire la domanda di mobilità dei limegni.

Per quello il governo del Perù ha approvato la "Rete Basica del Metro di Lima", creando un marco legale che le permetterebbe di avviare gli studi necessari per poter progettare i tracciati definitivi delle rispettive linee con le stazioni associate. La suddetta rete metropolitana è composta da sei linee che si dispongono secondo la Figura 1.4 coprendo tutta l'area urbana e suburbana inclusi le diverse valli che si formano intorno alla città capitale.

Attualmente s'incontra operante soltanto la L1 che percorre 34.6 km da Villa el Salvador nel sud a Bayóvar nel nord collegando 26 stazioni, mentre la L2 che ha direzione Est-Ovest; più la ramificazione nord della L4, - che va dall'Aeroporto Internazionale Jorge Chávez all'incrocio con la L2 con uno sviluppo complessivo di 35 km e 35 stazioni - sono in piena fase di costruzione con previsione di apertura in 2020, sebbene potrebbe accadere che sia rimandata la data di apertura al pubblico per ritardi già annunciati da parte del Ministero di Trasporto e Comunicazioni (Figura 1.6). Le L3 e L4 sono già progettate e approvate a livello di profilo, ovvero a livello di "preinvestimento", invece le L5 e L6 sono state aggiunte recentemente alla rete.

Il sistema ferroviario cittadino si completa con la sovrapposizione alla Figura 1.4 delle linee di Treni Leggeri chiamati "Trenes de Cercanías", che si collegano alla rete di metro formando un'estensione di quest'ultima mediante le stazioni adeguate per gestire entrambi i servizi; come si vede nella Figura 1.5. Attualmente queste linee di treni leggeri insieme ad altri progetti ferroviari regionali sono in fase di elaborazione degli studi di preinvestimento da marzo 2018 e per sei mesi, secondo una gara d'appalto assegnata dal Ministero di Trasporto e Comunicazioni.

Tra questi progetti si distinguono due servizi: uno che va dal porto del Callao sulla costa e attraversa tutta la città in direzione Est fino alla stazione Santa Clara nel municipio di ATE, fino al capolinea dell'altro servizio che va nella medesima direzione, con un contesto urbanistico molto meno denso, fino alla località di Choica ubicata a 41 km dal Callao. Entrambi i servizi sono allineati sulla stessa infrastruttura come si può vedere nella Figura 1.5 e coinvolgono la linea Callao - La Oroya, perché percorrono sui primi chilometri di questa: ciò significa che esisterà un regime eterotatico durante quei 41km, cioè tra Callao e Choica.



Figura 1.4: Rete del metro di Lima e Callao.



Figura 1.5: Rete ferroviaria di Lima.

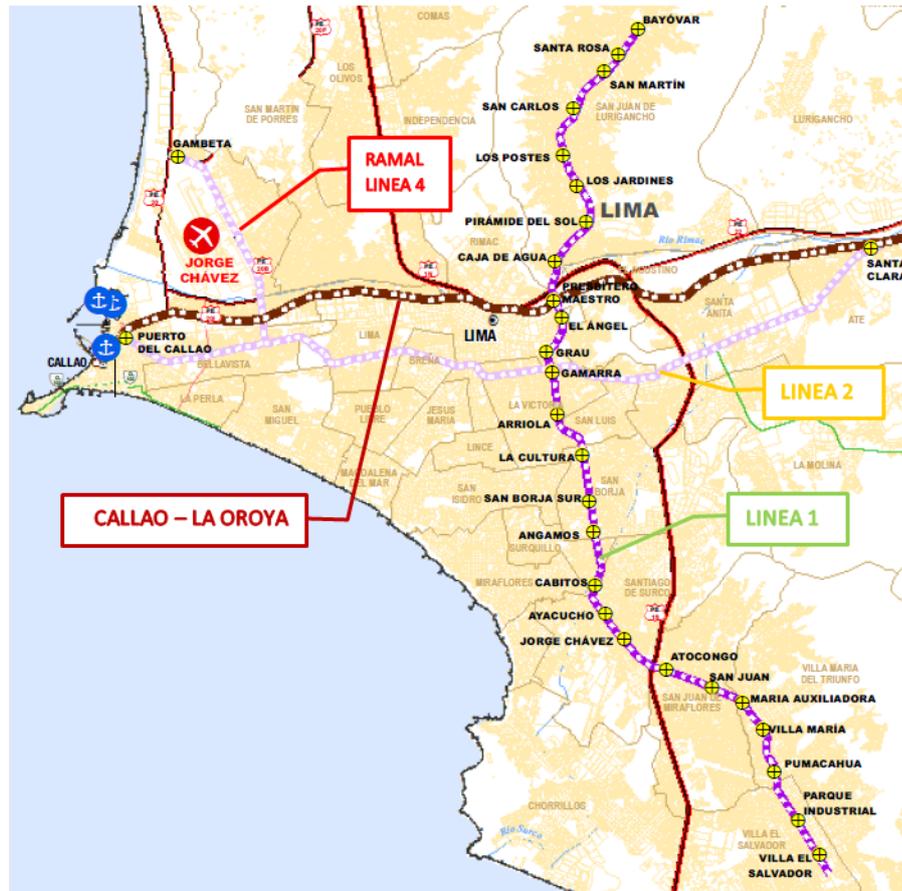


Figura 1.6: Sistema ferroviario di Lima.

## 1.5 Contesto politico

Il Perù attraversa una situazione politicamente delicata a causa della recente dimissione dall'incarico presidenziale di Pedro Pablo Kuczynsky il 23 marzo 2018, per accuse di corruzione. Dato il metodo di governo Peruviano, come di quasi tutte le nazione Sudamericane, gli succede automaticamente il vicepresidente, Martín Alberto Vizcarra Cornejo il medesimo giorno. Quest'ultimo, l'attuale presidente, è un laureato in ingegneria civile preso la Università Nacional de Ingeniería (UNI) del Perù e occupa un carico politico dal 2011. È stato ministro dei Trasporto e Comunicazioni nel primo anno del mandato presidenziale del suo predecessore Pedro Pablo Kuczynsky.

Per queste ragioni non si prevedono rallentamenti o diminuzioni dello sviluppo infrastrutturale del Paese; anzi, ci si aspetta un'agevolazione in termini democratici per una rapida esecuzione delle opere pubbliche.

## Capitolo 2

# La Linea Transandina

La Linea Transandina, che va dal porto del Callao a La Oroya, attraversa 58 ponti, 69 gallerie e più di 10 anse (a "zig-zag"), essendo l'unico treno del Sudamerica con scartamento standard (1435 mm), capace di arrivare a 4873 m slm; possiede la particolarità di essere a singolo binario lungo tutta la tratta, con raddoppi soltanto nelle stazioni, la sede non è elettrificata, per cui la trazione in tutto il percorso è diesel. Il sistema di segnalamento compete solo alle stazioni, per cui l'intera marcia dei treni è governata dalla visuale dei macchinisti.

Attualmente in concessione[13] insieme ad altri tratti, come La Oroya - Huancayo e La Oroya - Cerro de Pasco, al consorzio "Ferrocarril Central Andino (FCCA[14])" dal 1999 e per 30 anni. Chi ha ricevuto la concessione ha solo l'obbligo della manutenzione della linea ma non è tenuto ai miglioramenti strutturali né infrastrutturali. La sua costruzione è cominciata nel 1870, collegando le città del Callao con Lima, e dopo è stata estesa fino a La Oroya raggiungendola nel 1878. Partendo dal porto del Callao, attraversa la città capitale parallela al fiume Rimac in un contesto pianeggiante e di alta densità di popolazione nei primi chilometri del suo percorso. Man mano che si allontana dalla metropoli, percorre un tratto di transizione dove l'orografia cambia e comincia a salire finché raggiunge un contesto tipico di montagna, con un percorso molto tortuoso che passa dai pochi metri sul livello del mare fino ai 4781 m di altitudine nella stazione di Galera, per dopo ridiscendere a La Oroya, che si trova a 3726 m slm. Questo fa sì che questa linea sia stata per molti anni la più alta al mondo, finché è stata inaugurata la "Qingzang" nell'area Cinese del Tibet, oltrepassando 5000 m slm.

Nel suo inizio dal lato marino per il contesto di pianura la linea ha raggi di curvatura ampi e pendenza longitudinale molto contenuta; mentre dal lato opposto dovuto al suo percorso montagnoso e molto tortuoso, sia i raggi che le pendenze sono ampiamente fuori dalle norme internazionali, ma soprattutto sono ancora oggi in uso una serie di anse a "zig-zag" che permettono di continuare la scalata da parte del convoglio invertendo la marcia delle locomotive.

Il suddetto porto è il principale a livello nazionale, concentrando intorno al 70%-80% del flusso import-export del Paese, e si colloca al primo posto nella Regione del Pacifico Sud e settimo in Latinoamerica. L'intero nodo fluviale ha avuto miglioramenti infrastrutturali negli ultimi anni dovuto al rilascio di concessioni a cambio del sfruttamento delle darsene.

La città di La Oroya, chiamata la capitale metallurgica del Perù, con una popolazione di circa 33.000 abitanti, si trova in un punto strategico non solo di comu-

nicazione ma anche per le miniere degli Ande Peruviane nel centro del Perù, ed è un grande centro metallurgico e siderurgico, che contiene industrie di considerevoli dimensioni come fonderie e raffinerie. Questa città è stata conosciuta nel 2007 quando è stata inclusa nella classifica "TOP-TEN" dei luoghi più inquinati del mondo, secondo uno studio del Blacksmith Institute[15].

## 2.1 Il percorso

Tra i due estremi della linea sono state costruite molte stazioni che non si utilizzano più per il loro scopo oppure sono state abbandonate per diversi motivi. Oggigiorno si utilizzano solo quelle situate nella tabella 2.1 ed illustrate nella Figura 2.1.

Una sua peculiarità è che dalla stazione Matucana in poi, il gabarit della linea viene ristretto dalle gallerie che sono state scavate nel secolo scorso per treni con dimensioni minori.

Tabella 2.1: Stazioni in uso.

N°	Stazione	P.K. [km]	Quota slm [m]
1	El Callao	1+000	3,60
2	Monserate	13+000	150,00
3	Santa Clara	30+000	403,00
4	Chosica	54+000	860,00
5	San Bartolomé	76+000	1.513,00
6	Matucana	102+000	2.390,00
7	San Mateo	122+000	3.212,00
8	Rio Blanco	130+000	3.506,00
9	Chinchan	156+000	4.360,00
10	Ticlio	167+000	4.758,00
11	Galera	173+000	4.781,00
12	Yauli	193+000	4.192,00
13	Arpa-Mahr tunel	198+000	4.025,00
14	La Ororya	222+000	3.726,00

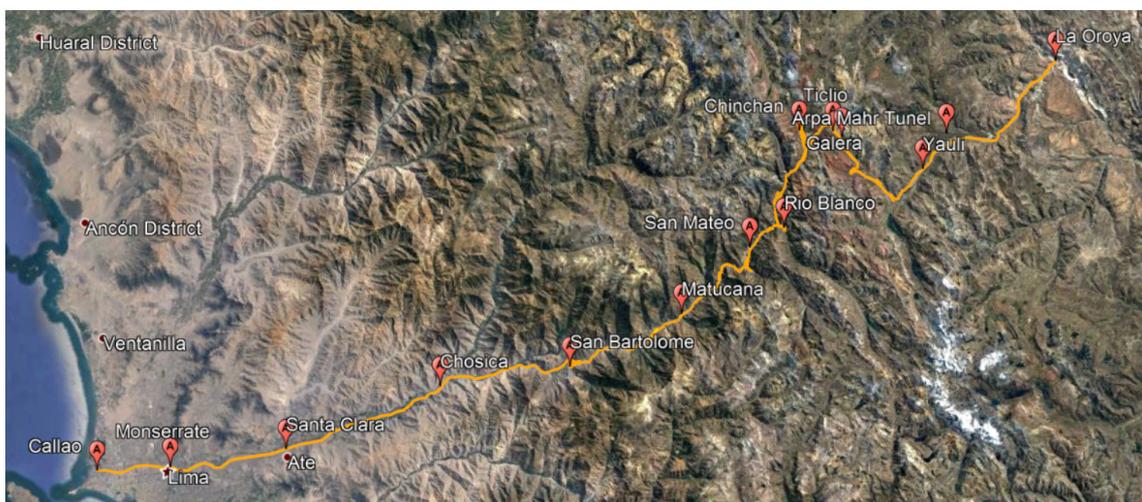


Figura 2.1: Tracciato Lima-La Oroya.

La linea ferroviaria è fortemente caratterizzata da alcuni parametri dell'infrastruttura quali la pendenza longitudinale, i raggi delle curve e la sopraelevazione; ma in questo caso i primi due sono fortemente condizionanti.

### 2.1.1 Pendenza longitudinale

Il percorso della linea parte dalla pianura limegna con un incremento graduale della pendenza praticamente fino a Chosica (P.K.:54), dove raggiunge il 20‰. Da lì in poi, nei prossimi 10 km si raggiunge il 33‰, che si mantiene costante fino a Chinchanda dove la livelletta viene alzata ancora una volta, per raggiungere il 44‰ prima dell'arrivo alla cima del percorso, dove c'è la stazione di Galera a 4871 m slm. Da quest'ultima comincia la discesa, che è suddivisa in tratti dove si raggiunge il -40‰, come si può constatare nelle Figure 2.2 e 2.3.

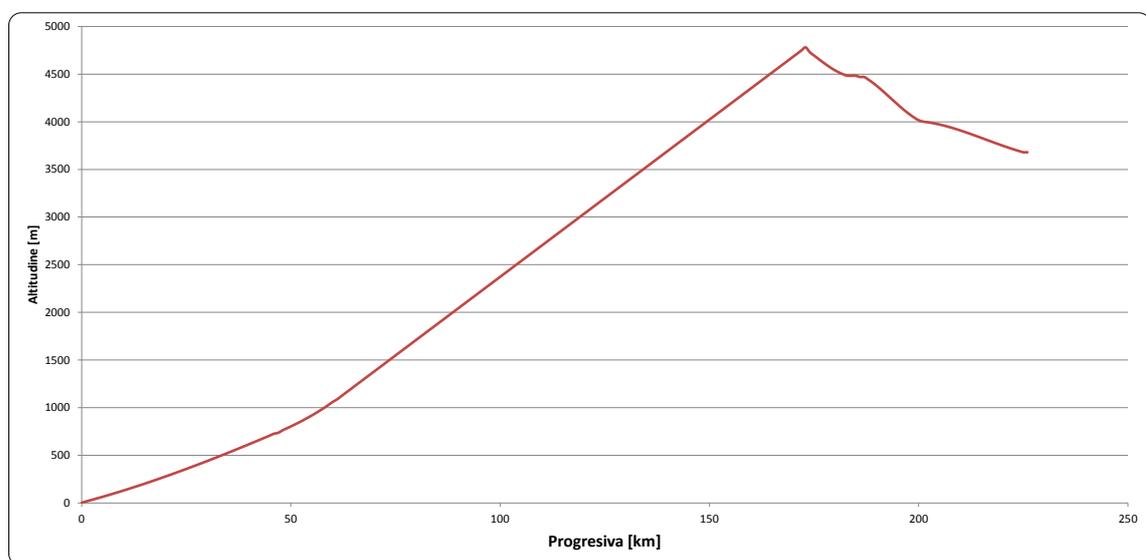


Figura 2.2: Profilo Longitudinale.

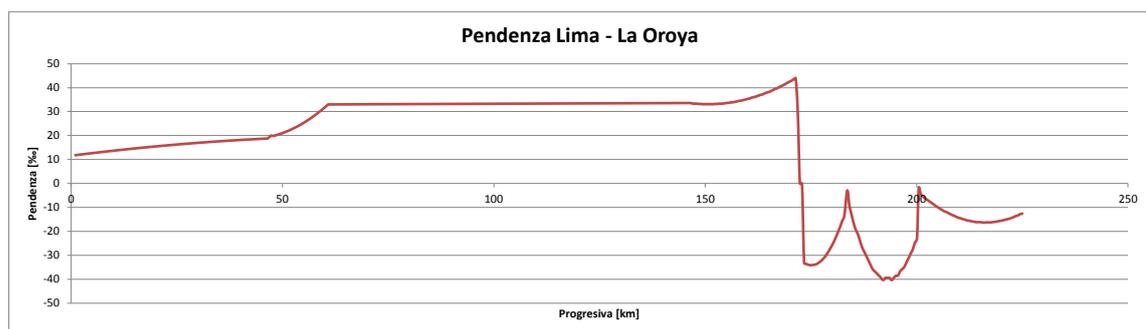


Figura 2.3: Pendenza Longitudinale.

Nella Figura 2.3 si può osservare molto bene come la pendenza dopo la progressiva 60+000 acquisisce un valore di 33‰, che è già fuori dei limiti internazionali del 30‰; ma questo peggiora ancora di più quando dopo la progressiva 160+000 comincia a incrementarsi fino al 44‰, che sebbene ricordiamo da quando data la costruzione della linea sono comprensibile questi valori ma inaccettabili per gli odierni standard internazionali, pur che persistano per tratti corti.

## 2.1.2 Raggi di curvatura

Su questa linea nel tratto montagnoso, cioè da Chosica in su, esistono raggi di curvatura dell'ordine di 120m, 100m e anche 75m. Figura 2.4.

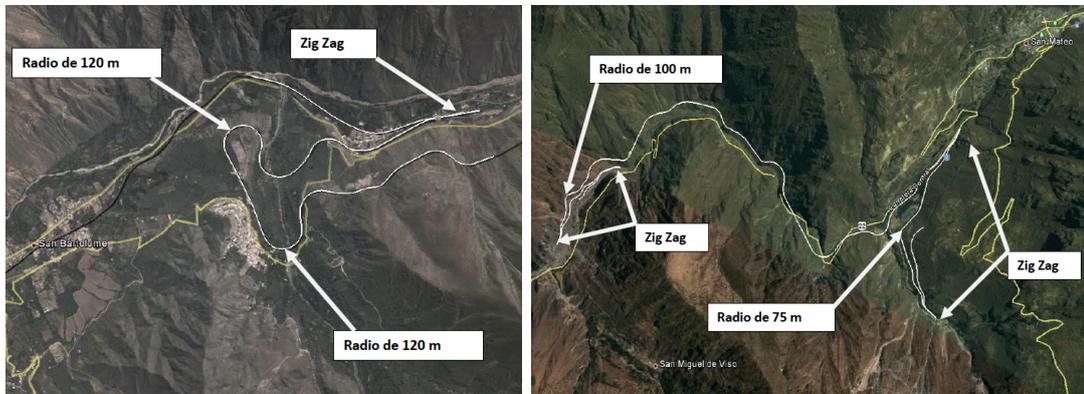


Figura 2.4: Raggi di curvatura minori ai consentiti.

A questi si aggiungono lo stato dell'armamento ferroviario e la mancanza di sopraelevazione necessaria sulle curve che rendono ancora più elevato il pericolo di svio facendo sì che la velocità di percorrenza dei treni sulla linea sia notevolmente bassa: nella direzione Lima-Chosica è di 30 chilometri orari, mentre che al contrario è di 20 chilometri orari. Questo comporta che la percorrenza di una distanza di 222 km i treni impegnino tra sette e nove ore per il tragitto d'andata o ritorno da Lima.

## 2.1.3 Anse a "zig-zag"

In modo caratteristico, su questa linea sono stati costruite diverse anse a zig-zag, che in concreto sono binari di sosta con uno scambio nell'unione di due binari paralleli dove entra convoglio, che il quale dopo aver invertito la marcia e azionato lo scambio, può ripartire. Esse servono per continuare a salire in una linea di elevata pendenza longitudinale e soprattutto quando non c'è spazio per fare un "loop", cioè un giro di 180° per continuare l'avanzamento nella stessa direzione. Di questo modo si formano delle specie di gradini della linea. Figura 2.10.

Di solito la linea ha un numero pari di zig-zag in modo che messi in coppia e relativamente vicini si possa ottenere il guadagno di altitudine avendo la locomotiva sempre davanti. Perché quando un convoglio entra al primo anse, la locomotiva è in testa al treno di modo che quando il treno riparte, una volta invertita la marcia della locomotiva, essa sarà dietro fino al prossimo zig-zag dove si realizza il medesimo procedimento d'inversione della marcia che fa uscire il convoglio con la locomotiva in testa.

Avere la coppia di zig-zag vicini è molto importante in queste tipi di linee montagne, perché quando il treno trascorre tra due anse, lo fa con locomotiva dietro in modo che la visuale del percorso non è sempre possibile.

Su tutta la linea esistono ben tredici zig-zag, dove tutti s'incontrano appaiati, tranne il primo che è diverso in quanto coincide con una stazione e deve compiere la funzione di una coppia, come si spiegherà sotto.

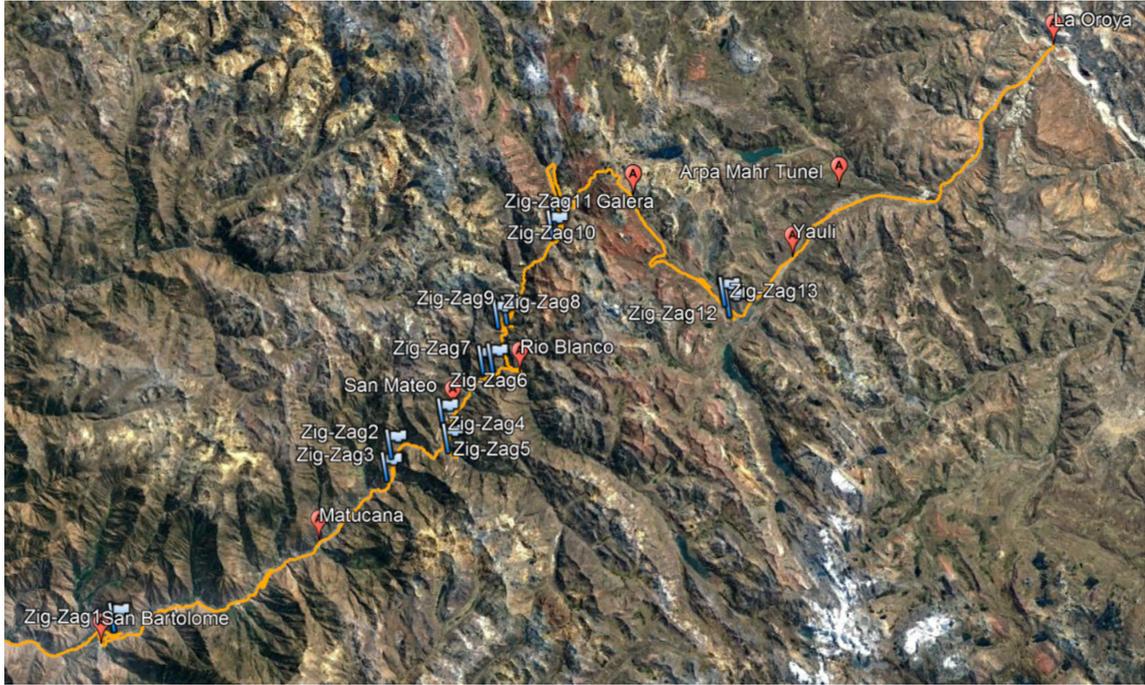


Figura 2.5: Zig-Zags lungo il percorso.

Tabella 2.2: Zig-Zags esistenti.

Zig-Zag	P.K. [km]	Sosta [min]
ZZ1	76+000	12
ZZ2	108+800	5
ZZ3	109+800	5
ZZ4	115+700	5
ZZ5	120+400	5
ZZ6	126+900	5
ZZ7	128+900	5
ZZ8	137+700	5
ZZ9	143+000	5
ZZ10	151+400	5
ZZ11	153+300	5
ZZ12	186+500	5
ZZ13	187+500	5

Il primo degli zig-zag corrisponde con la stazione di San Bartolomé ed è a un'altitudine di 1513 m slm nella progressiva 76+000. Poiché questo zig-zag è l'unico di tutta la linea ad essere spaiato, cioè a non averne ha un altro vicino questo deve compiere con le funzione di due anse, e far proseguire il treno con la locomotiva in testa facendo il processo più complicato. Si deve sganciare la locomotiva del carico una volta arrestato il treno nel binario di sosta, farla scorrere per un binario parallelo fino a un dispositivo che consiste in una piattaforma girevole con diametro poco maggiore alla lunghezza della locomotiva, chiamato "torna mesa" oppure "turntable" (i suoi nomi in spagnolo ed inglese), dove si la fa girare 180° (Figura 2.6); e dopo si deve agganciarla all'estremo opposto del convoglio per fare ripartire il treno. Tutta

questa manovra ha una durata di almeno 12 minuti.



Figura 2.6: Locomotiva essendo girata a san Bartolomé.

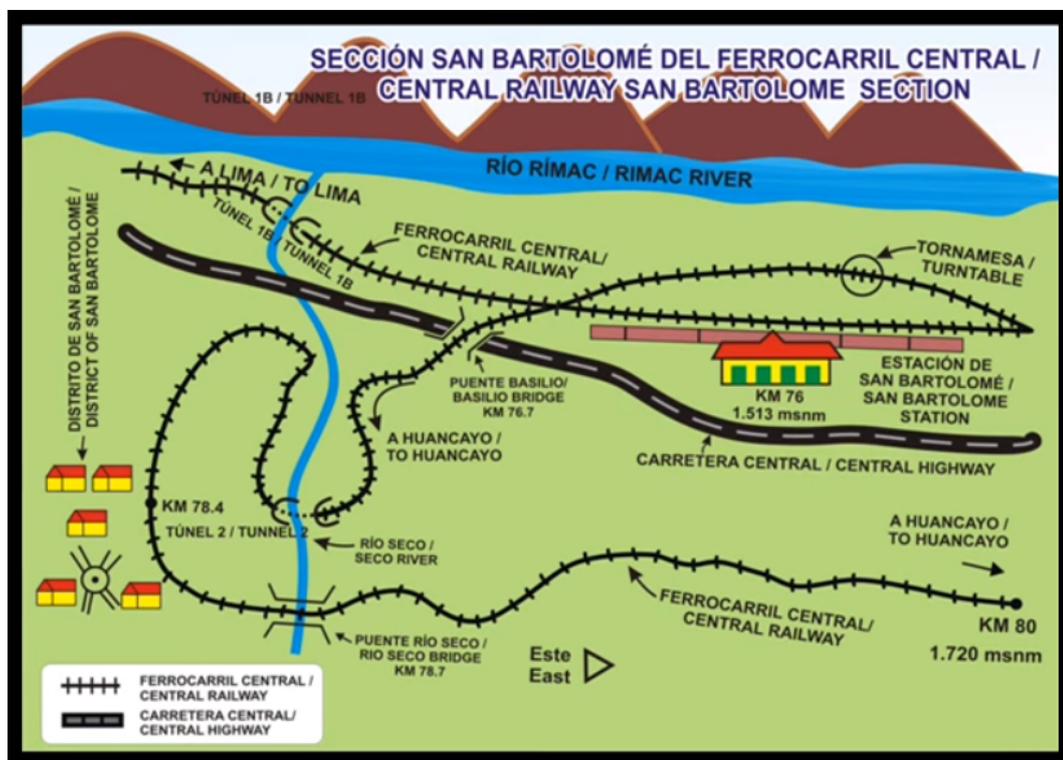


Figura 2.7: Schema del Zig-Zag/Stazione San Bartolomé.

Oltre al zig-zag di San Bartolomé ne esistono altre sei coppie, cioè dire dodici singoli anse come la Figura 2.9. Il convoglio tra due zig-zag che compongono una coppia viaggia necessariamente con la locomotiva dietro e senza visuale; per questo è l'assistente del convoglio a guidare il macchinista, comunicando con con lui via radio e collocandosi in modo da poter vedere il percorso. Ciò comporta che talvolta l'assistente prenda una posizione molto rischiosa, fino ad arrampicarsi o a volte sedersi nell'ultimo carro del convoglio, come si può osservare nella Figura 2.10.

I treni, per superare ogni singolo zig-zag, impegnano almeno 5 minuti per fare le manovre necessarie a entrare nel binario di sosta, invertire la marcia e ripartire; nonché l'azionamento dello scambio.

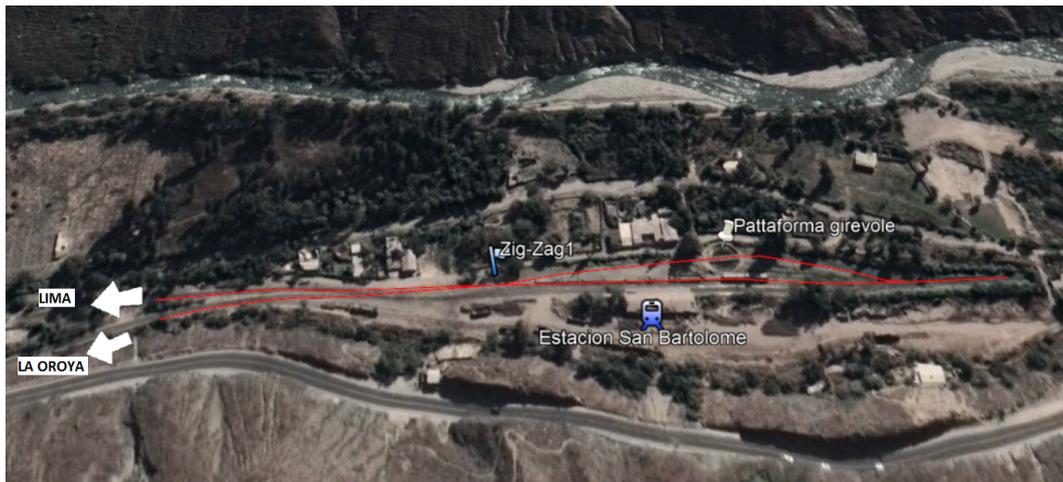


Figura 2.8: Foto aerea del Zig-Zag/Stazione San Bartolomé.



Figura 2.9: Zig-Zag 7 e 8.



Figura 2.10: Zig-Zag 3 P.K. 109+800.

Esistono anche dei zig-zag un po' particolari, come il ZZ8 della Figura 2.12 con il binario di sosta che si divide in due per poter in un certo modo fare incrociare i treni, dove uno dei binari in mancanza di spazio, si immette in una galleria senza

uscita. Talvolta la manovra può essere pericolosa quando accade che la locomotiva è al fondo della galleria, ed essendo a trazione diesel, i fumi della combustione potrebbero intossicare gli operatori del treno mentre si inverte la marcia.



Figura 2.11: Zig-Zag 8 P.K. 137+700.



Figura 2.12: Vista aerea del ZZ8.

Come è stato detto, questi zig-zag sono stati costruiti nel passato, quando i treni non erano molto lunghi a causa della bassa potenza delle locomotive (possibilmente a vapore), e avevano minor forza di trazione di quelle attuali. Questo fa sì che anche se si utilizzino locomotive più potenti *non si possa comporre treni con più di 14 carri* con una lunghezza complessiva di 260 metri. E questa rappresenta *una grande limitazione della capacità della linea*.

## 2.1.4 Materiale rotabile

Su questa linea ferroviaria transandina sono passati diversi tipi di locomotive, ma sempre a trazione diesel. Gli ultimi acquistati di seconda mano e ricondizionati sono stati costruiti tra 1984 e 1987 da General Electric per le compagnie ferroviarie Conrail (CR) e Norfolk Southern (NS) degli Stati Uniti. I convogli che attualmente la percorrono sono composti da locomotive General Electric Series 7 e Series 8 (GE Dash 7 & Dash 8), che possiedono una potenza da 3000hp a 4000hp, per cui prendendo gli estremi si potrà coprire tutto l'intervallo.

Dalla prima serie 7, ci sono i modelli C30, e della seconda i modelli C40; che si dettagliano a continuazione:

### 1. GE Dash 7 Series C30. Denominato **C30-7**.

- Caratteristiche tecniche:

Potenza: 3000hp = 2237kW = 2.2MW

Velocità massima: 70mph = 112.7 kph

Massima trazione allo spunto: 91 600 lbs a 25% adhesion = 407.5kN a 25% di aderenza

Massima trazione continua: 91 500 lbs a 9.5mph = 407kN a 15.3kph

Peso: 366000lbs = 166 014 kg = 166 t

- Dimensioni:

Gauge: 4ft 8.5in = 1435mm

Length: 67ft 3in = 20.5m

Height: 15ft 4.5in = 4.67m

Width: 10ft 2.5in = 3.68m

- Carrelli:

AAR: C-C

Wheel diameter: 40in = 1.02m

Track wheel base: 13ft 7in = 4.14m

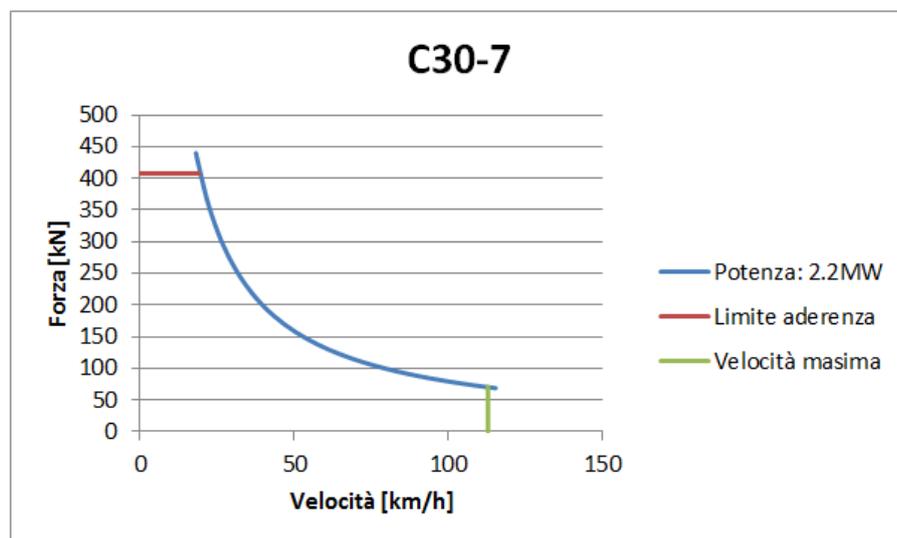


Figura 2.13: Diagramma Trazione-Velocità C30-7.

## 2. GE Dash 8 Series C40. Denominato **C40-8**.

- Caratteristiche tecniche:  
Potenza: 4000hp = 2983kW = 3MW  
Velocità massima: 70mph = 112.7kph  
Massima trazione allo spunto: 106 790 lbs a 25% di aderenza = 475kN a 25% di aderenza  
Massima trazione continua: 92 750 lbs a 10.9mph = 412.6kN a 17.5kph  
Pesso: 391600lbs = 177 627 kg = 178 t
- Dimensioni:  
Gauge: 4ft 8.5in = 1435mm  
Length: 70ft 8in = 21.5m  
Height: 15ft 4.5in = 4.67m  
Width: 10ft 3.5in = 3.71m
- Carrelli:  
AAR: C-C  
Wheel diameter: 40in = 1.02m  
Track wheel base: 13ft 7in = 4.14m

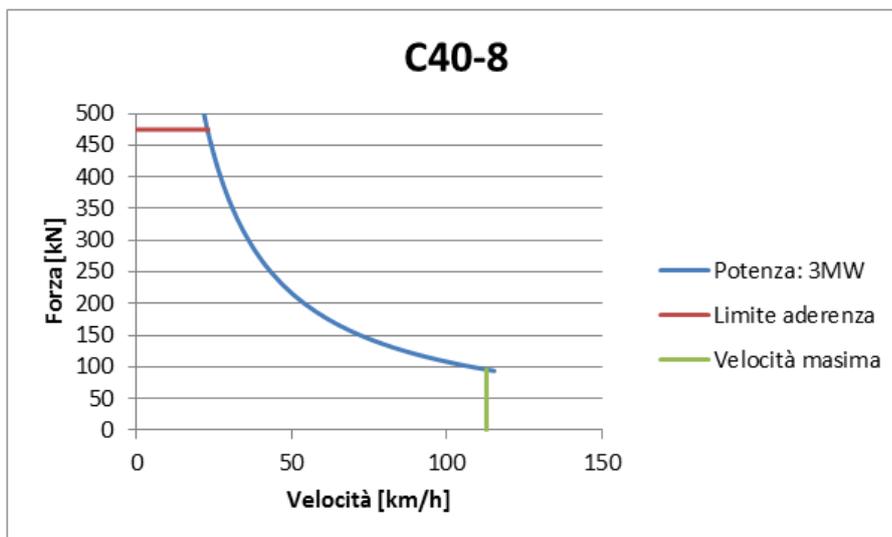


Figura 2.14: Diagramma Trazione-Velocità C40-8.

Tutte le locomotive hanno dovuto essere ricondizionate non solo esteticamente, ma anche nelle dimensioni esteriori, perché come è menzionato precedentemente, il gabarit viene ristretto dopo la stazione Matucana (nella P.K. 102+000), e tale vincolo va tenuto in debita considerazione.



Figura 2.15: Locomotiva N°1012 FCCA.



Figura 2.16: Locomotive sotto modifica a Chosica.

I carri che percorrono la linea e che sono trainati dalle locomotive menzionate, hanno diversi utilizzi. Questo vuol dire che il loro peso a vuoto varia in funzione dall'utilizzo; di seguito se ne possono osservare alcuni:



Figura 2.17: Carico massimo:42,000kg–Tara:12,500kg. Totale: 54.5t(14t/asse).



Figura 2.18: Carico massimo:65,000kg–Tara:24,400kg. Totale: 89.4t(22.5t/asse).



Figura 2.19: Carico massimo:94,000kg–Tara:25,300kg. Totale:119.3t(30t/asse).

Di solito il convoglio tipo viene composto da quattordici carri e una o due motrici a seconda del peso/riempimento dei primi nonché dalla destinazione, cioè in andata o ritorno da Lima, dove predomina la salita o la discesa rispettivamente.

Il numero di carri non è discrezionale come è già stato ricordato in precedenza, ma viene determinato dalla lunghezza accettabile nei zig-zag, ovvero dalla capacità di questi di ospitare un treno per la sua inversione nel senso di marcia.

## 2.2 Il progetto "Tunel Transandino"

L'obiettivo centrale del progetto è di cercare un'adeguata condizione di trasporto terrestre tra le regioni della Serra e Selva del Perù, con i mercati nazionali e internazionali dato il contesto di marcata e stabilizzata crescita dell'economia del Paese, che significa in termini pratici, trasferire parte della domanda sul trasporto ferroviario. Il problema consiste nell'incapacità della linea ferroviaria di far fronte alla domanda, essendo un servizio sottoutilizzato che non cresce con lo stesso ritmo del paese, provocando che la autostrada centrale rappresenta il principale modo di trasporto, provocando una caduta del suo livello di servizio al minimo possibile ma soprattutto con un aumento elevato delle morti per incidenti in essa.

### 2.2.1 Progetto di Pre-Fattibilità

E' già stato presentato il progetto di pre fattibilità, chiamato in spagnolo "*estudio a nivel perfil*" (studio a livello di profilo), portato avanti dal consorzio Trasandino ISG conformato per le aziende: Servicio de Consultores Andinos S.A. (SERCONSULT), Geoconsul España Ingenieros Consultores S.A. (GEOCONSUL), e Investigación y Control de Calidad S.A. (INCOSA), Sucursal Perú. Il progetto è stato approvato dal Ministero di Trasporto e Comunicazioni del Perù in febbraio 2015, e comprende le seguenti azioni:

1. La costruzione di 46.7 km totale di galleria in tre tappe: di 5.5km, 15.6km e 25.6km rispettivamente nella direzione Lima-Chosica come si prevede nella Figura 2.20. Ottimizzando l'esercizio ferroviario con alcuni guadagni, quali:
  - L'evitare tutti i zig-zag per togliere la limitazione alla lunghezza dei convoglio con una riduzione dei tempi di percorrenza per non doversi fermare per invertire la marcia;
  - L'accorciamento del percorso ferroviario di 40.8km;
  - Il risparmio di tempo nelle tratte ferroviarie di almeno 3 ore circa.
2. L'adeguata infrastruttura intermodale in punti strategici per attirare domanda sulla modalità di trasporto;
3. L'acquisizione di materiale rotabile moderno; locomotive, vagoni, e carrozze passeggeri;
4. L'adeguazione delle stazioni esistenti per l'avvio del servizio passeggeri nei due tratti menzionati (Callao-ATE e ATE-Chosica);
5. La protezione della sede ferroviaria nella tratta di maggior densità demografica con adeguamento dei passaggi a livelli per i pedoni e barriere di sicurezza per il transito veicolare;
6. Costruzione di un moderno sistema di segnalamento lungo tutta la linea, specialmente dove c'è l'esercizio eterotatico.
7. L'adeguamento della strada centrale del Perù per incrementare il suo livello di servizio.

Con questo si prevede di ottenere i seguenti benefici:

1. minori tempi di trasporto ferroviario;
2. riduzione dei costi globali di trasporto della modalità ferroviaria;
3. riduzione dei costi di operazione stradale e ferroviario;
4. riduzione delle esternalità negative relative al trasporto terrestre;
5. ottenere livelli di servizio accettabili sulla strada centrale,

con l'obiettivo finale di migliorare il livello di vita di tutta la popolazione del bacino d'influenza.



Figura 2.20: Progetto "Tunnel Transandiniano".

### *Le Gallerie*

Come si è detto, il progetto comprende tre gallerie che coinvolgono solo il tratto del percorso dove il regime è omotatico, con percorrenza solo di treni merci. Il tipo di galleria previste sono monotubi a via unica di diametro interno intorno ai 9 metri, la costruzione sarà con TBM ("*Tunnel Boring Machine*", il suo acronimo in inglese) e anche scavate con metodi convenzionali, ovvero con esplosivi. Si vedano le Figure 2.21 e 2.22 per le sezioni trasversali del progetto dei tunnel.

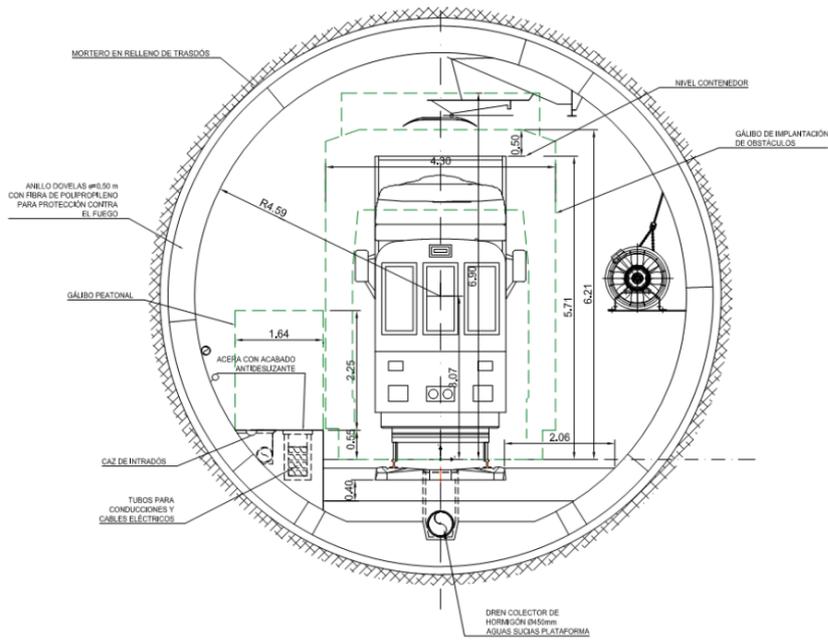


Figura 2.21: Sezione scavate con TBM.

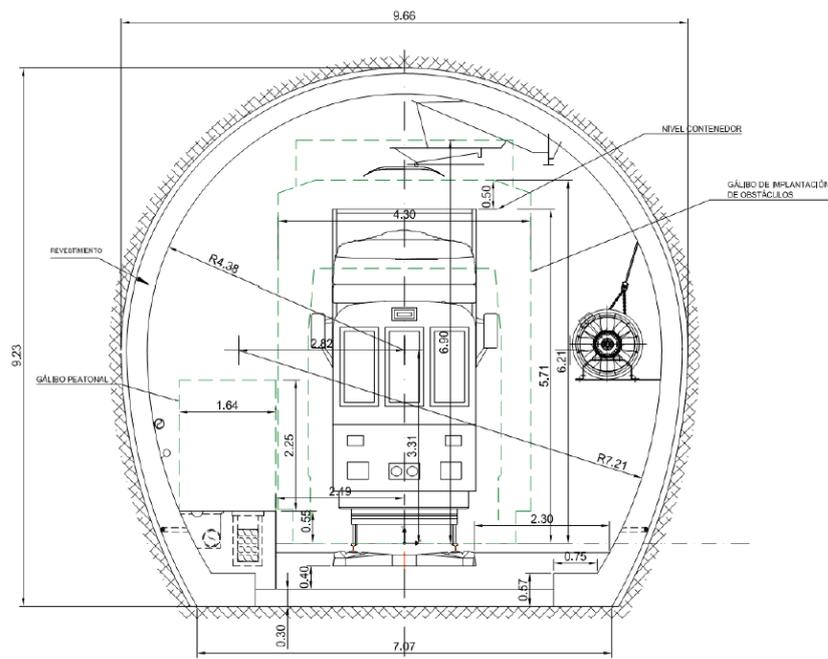


Figura 2.22: Sezione scavata con esplosivi.

Tabella 2.3: Caratteristiche di inizio e fine delle gallerie.

Descrizione	Inizio	Fine	Esistente	Galleria	Differenza
Tunnel San Bartolomé	74+100	80+550	6450	5547.38	-902.62
Tunnel San Miguel del Viso	110+000	123+500	13500	15622.04	2122.04
Tunnel Transandino	129+900	197+550	67650	25645.52	-42004.48

La sommatoria delle differenze trasmettono *40,8km in meno percorsi.*

### 1. Tunnel San Bertolomé

Ha uno sviluppo totale di 5.547 m, in galleria una longitudine di 4.745 m con curve orizzontali di raggi che variano tra i 300 m e 400 m e si collegano alle rette con curve di transizione. La pendenza è del 30‰ con quote di entrata e uscita di 1.496 m e 1.638 m rispettivamente. Figura 2.23.

### 2. Tunnel San Miguel del Viso

Il suo sviluppo complessivo è di 15.622 m, con una galleria di lunghezza di 13.270 m. L'andamento orizzontale ha curve di raggi di 500 m tutte collegate con curve di transizioni alle rette. L'andamento altimetrico è diviso in tre tratti lunghi 840 m, 1045 m e 12.007 m di 30‰, 20‰ e 29.7‰ rispettivamente, tutti raccordati con raggi di curve verticali maggiori a 400 m; questo per poter passare sotto il fiume e l'autostrada lasciando 11 m tra la parte superiore del tunnel e la superficie. Figura 2.24.

### 3. Tunnel Transandino.

Avendo una galleria lunga 25.052 m, si sviluppa ancora per 25.646 m composto planimetricamente da due curve di raggi 5.000 m e un rettilo di 22.828 m in mezzo che non necessita di curve di transizione per l'ampio valore del raggio delle curve. Altimetricamente ha un primo tratto lungo 186 m con pendenza del 30‰, e dopo un secondo tratto lungo 24.950 m con pendenza 25.75‰ raccordati con una curva verticale di 200 m. L'ingresso è a quota 3.370 m slm, e quella di uscita a 4.015 m slm. Figure 2.25 e 2.26.

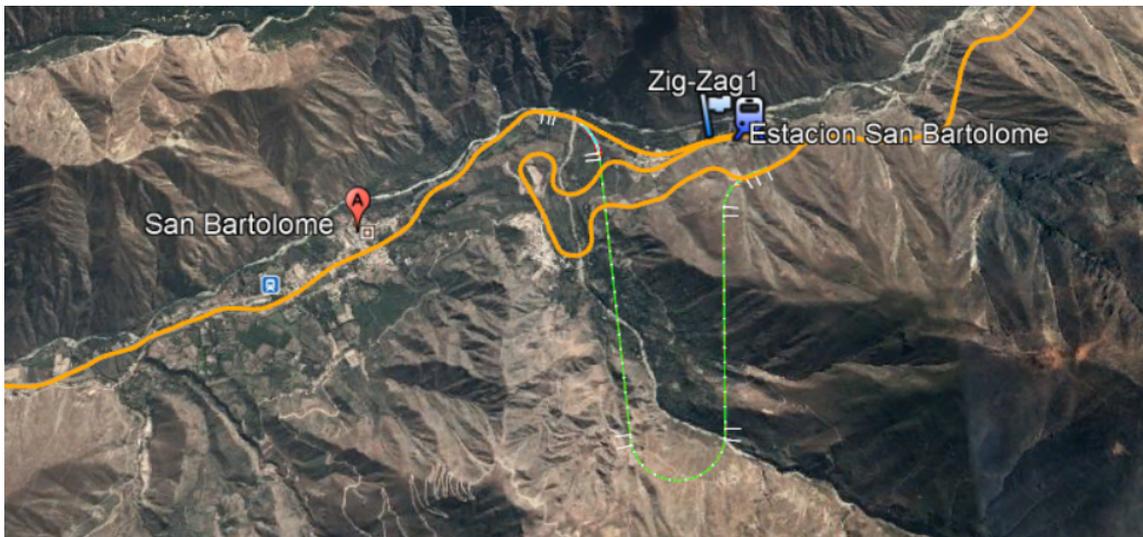


Figura 2.23: Tunnel San Bartolomé.

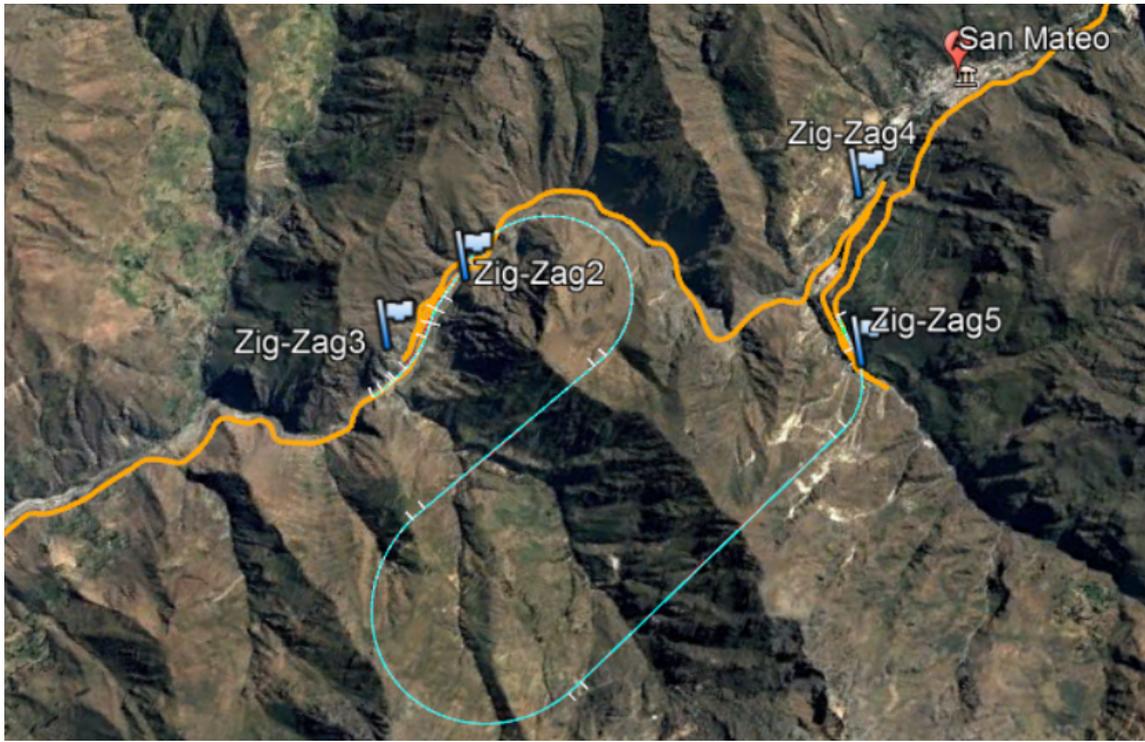


Figura 2.24: Tunnel San Miguel del Viso.



Figura 2.25: Tunnel Transandino.



Figura 2.26: Estremi del Tunnel Transandino.

## 2.2.2 Progetto di Fattibilità

Attualmente questo progetto è nella fase di fattibilità, chiamato "*a nivel de factibilidad*", che in realtà comprende una maggior elaborazione, facendo che sotto la concessione europea sia più paragonabile ad un progetto definitivo pur chiamandosi "di fattibilità". Terminato questo studio il Governo del Perù può lanciare la gara d'appalto per la costruzione dell'opera secondo quanto indicano le norme del Paese. Il progetto è portato avanti da parte del consorzio costituito per tre aziende, due di nazionalità italiana e una coreana: Geodata S.p.A., Italfer e Dohwa Engineering rispettivamente. Esse stanno approfondendo il progetto preliminare di un bando di gara vinto a maggio 2017 da parte del consorzio suddetto con scadenza a due anni per il completamento, dunque con data di conclusione entro 2019 oppure inizio 2020. All'interno di questo progetto definitivo si può dire che da parte del consorzio sia già stato consegnato il seguente elenco di relazioni che compongono il bando di gara menzionato:

- studio di domanda passeggeri e merce con i suoi rispettivi orizzonti;
- topografia della zona competente al tracciato definito nel progetto preliminare e incluso 1000m di larghezza a ciascun lato dell'asse;
- studio archeologico della zona competente al progetto;
- geologia di superficie.

Attualmente si sta portando avanti la prima tappa delle indagini indirette sul campo, che include prove geologiche e geofisiche, per poter definire i punti di maggiore interesse per la realizzazione delle prove dirette che includono intorno a 10.000m di perforazione del suolo roccioso, dove la logistica è fortemente condizionante a causa della quota media del progetto di 4000 mslm e anche oltre, nonché l'approvvigionamento dell'acqua, la pianificazione delle vie di accesso, il montaggio e spostamento delle attrezzature per le prove, ecc.

Dopodiché, i prossimi passaggi del progetto saranno:

- definire il modello geomeccanico del terreno coinvolgente all'asse del progetto;
- analizzare la vera e propria fattibilità della realizzazione del progetto;
- studiare sul tipo di sezione trasversali da utilizzare per le vie di corsa e di sicurezza dei tunnel;
- studiare il tracciato e delle sezioni trasversali mediante le simulazioni di esercizio ferroviario;
- studiare la creazione di binari di precedenza, di stazioni multimodali, interventi sull'armamento ferroviario, acquisizione di materiale rotabile, ecc.

# Capitolo 3

## Metodologia di modellizzazione

Fra i più affidabili programmi di simulazione ferroviaria presenti sul mercato si è fatto uso di OpenTrack[16] che è uno dei più apprezzati; in questo capitolo si è ritenuto opportuno illustrare le funzionalità principali del programma che hanno permesso lo svolgimento dell'elaborato in esame.

### 3.1 Cenni sul simulatore ferroviario Opentrack

OpenTrack è stato sviluppato a partire dalla seconda metà degli anni '90, come progetto di ricerca al Politecnico Federale di Zurigo in Svizzera, con lo scopo di creare uno strumento di facile utilizzo in grado di simulare la circolazione ferroviaria; l'esigenza era chiara: si voleva uno strumento che supportasse le decisioni da prendere in merito al tema della circolazione.

Il programma di simulazione OpenTrack è oggi utilizzato da società ferroviarie, industrie e università in molti Paesi, proponendosi come una vera innovazione e di supporto alle decisioni, spesso come fattore decisivo per portare a termine numerosi obiettivi quali: la pianificazione delle caratteristiche delle infrastrutture future, l'analisi della capacità di linee e nodi della rete ferroviaria, gli studi sul materiale rotabile, la costruzione e la validazione degli orari ferroviari, l'analisi diversi sistemi di segnalamento, la valutazione degli effetti di guasti (ad esempio all'infrastruttura o ai treni) e ritardi, il calcolo del consumo di energia dei treni e la simulazione delle reti sia tramviarie sia metropolitane.

OpenTrack è un programma di simulazione microscopico: tutti gli elementi vengono introdotti nel modello senza semplificazione, si utilizza un sistema di simulazione misto dove il moto dei treni è modellizzato in continuo, mentre i segnali sono modellizzati a tempo discreto (tranne per sistemi di blocco mobile)

Il funzionamento del programma è schematizzabile attraverso la figura 3.1: sono necessari alcuni dati in ingresso come quelli dell'infrastruttura, del materiale rotabile con il quale sono composti i treni, e dell'orario di servizio. Esso simula la circolazione sulla base dei precedenti dati e restituisce diagrammi, grafici dei treni, le singole occupazioni di binario ma anche statistiche importanti per restituire un'analisi a posteriori, come dati in uscita. Nelle simulazioni tutte le potenzialità del sistema vengono sfruttate al massimo e si ottiene quindi un profilo "ottimale" rispetto alle caratteristiche operative, dove ci può essere una diminuzione dal 5 al 15%.

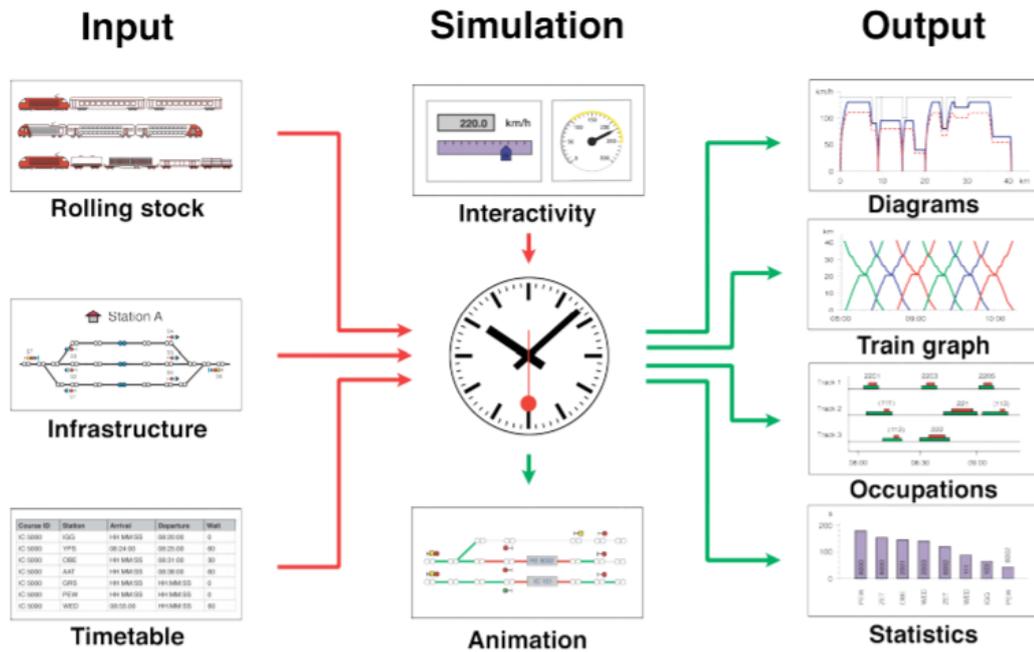


Figura 3.1: Schema dei dati di input (rosso) e output (verde).

## 3.2 Dati di ingresso

### 3.2.1 Infrastruttura

Come detto in precedenza, OpenTrack necessita di avere un'infrastruttura di riferimento sulla quale rappresentare la circolazione.

OpenTrack rappresenta le reti ferroviarie mediante un tipo di grafico che schematizza l'infrastruttura attraverso tratte di linea collegate da elementi virtuali come i vertici: pertanto la rete è composta di una serie di doppi vertici che rappresentano dei punti importanti dell'infrastruttura, collegati mediante archi in modo da costituire uno schema planimetrico dei binari, con gli incroci corrispondenti in cui non tutte le manovre sono possibili come è da apprezzare nelle Figure 3.2 e 3.3.



Figura 3.2: Esempio di incrocio.

Manovra	Consentita?
A-C/C-A	SI
B-C/C-B	SI
A-B/B-A	NO

Figura 3.3: Manovre consentite all'incrocio.

L'infrastruttura viene specificata attraverso l'assegnazione ai tratti di rete di caratteristiche importanti: infatti è possibile assegnare informazioni specifiche ai vari elementi in precedenza citati: per esempio è possibile assegnare la lunghezza, la pendenza o la velocità massima per i diversi ranghi a un tratto di linea ma è anche possibile assegnare un nome, una chilometrica rispetto a un punto di riferimento a un vertice tramite le finestre "Vertex Inspector" e "Edge Inspector" della Figura 3.4. Più informazioni vengono assegnate, tanto più il programma riuscirà a riprodurre fedelmente l'infrastruttura ferroviaria fino ai minimi dettagli.

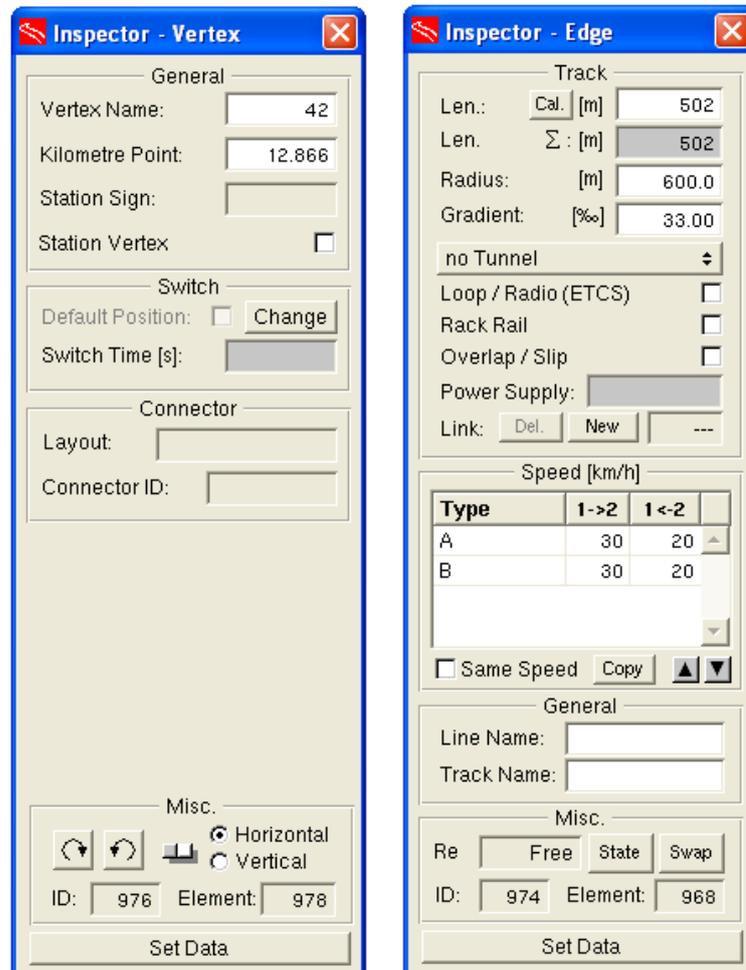


Figura 3.4: Finestre di editing vertici (sinistra) e archi (destra).

L'infrastruttura si completa attraverso la disposizione di segnali che permetteranno di definire le stazioni (Figura 3.5) localizzate lungo la linea, ma soprattutto di creare gli itinerari per i treni. Ci sono diverse tipologie: principali, di avviso, per la definizione di fermata dei treni, indicanti le zone di velocità limitata, zona di marcia inerziale, e zone non elettrificate.

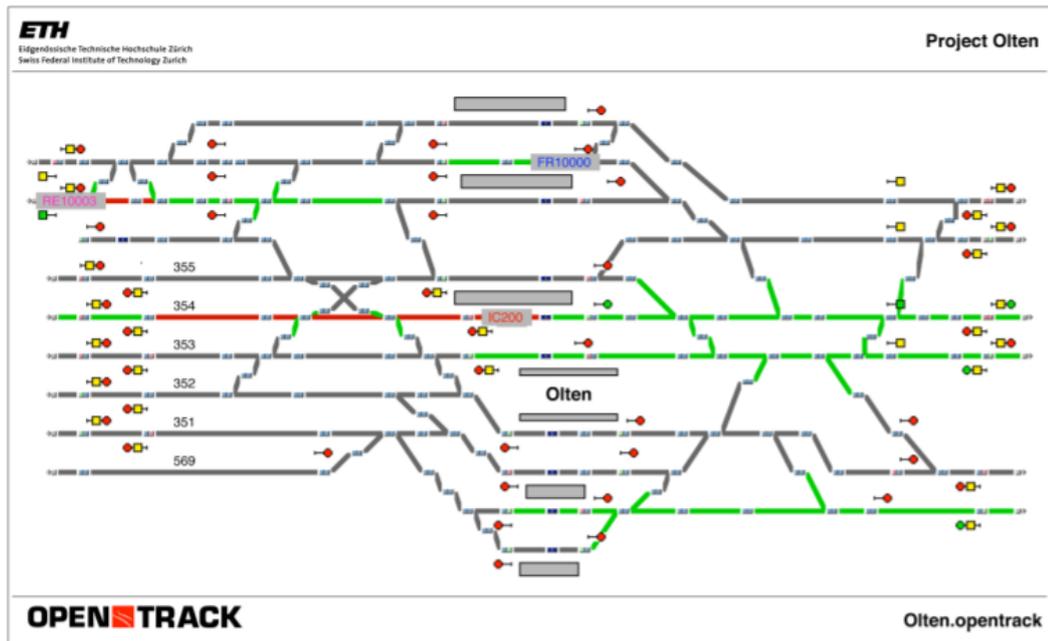


Figura 3.5: Esempio della rappresentazione di una stazione.

### 3.2.2 Materiale rotabile

Il materiale rotabile è composto di mezzi di trazione (tipicamente le motrici) e le carrozze che sono combinate fra loro per rappresentare qualsiasi tipo di treno nel suo assetto completo, sia esistente che non. Ad esempio Figura 3.6.

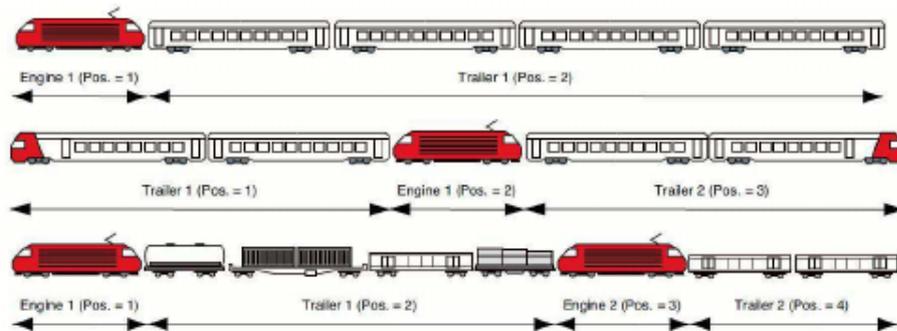


Figura 3.6: Esempi di treni (in rosso le motrici).

OpenTrack utilizza i dati tecnici di ogni locomotiva e treno prendendoli da uno specifico database, nel quale le locomotive sono descritte attraverso le proprie caratteristiche tecniche come il diagramma di sforzo di trazione/velocità, la massa, la lunghezza e il peso aderente. Le locomotive presenti di default all'interno del database possono non essere sufficienti allo scopo della simulazione e quindi l'utente può creare da nuovo le motrici con diversi parametri; le loro caratteristiche sono fondamentali perché influenzano direttamente la marcia del treno. I dati a inserire sono rappresentati nella Figura 3.7.

Per la simulazione non è necessaria una definizione dettagliata delle carrozze rimorchiate, perché è sufficiente conoscere la lunghezza del treno in composizione completa

e le caratteristiche già definite per la locomotiva trainante: il programma quindi modella i treni creati selezionando uno o più mezzi di trazione dal database-locomotive, combinandoli con i dati di lunghezza e di peso che servono a modellare le rimorchiato nella simulazione. I dati da inserire si possono osservare nelle Figure 3.8 e 3.9.

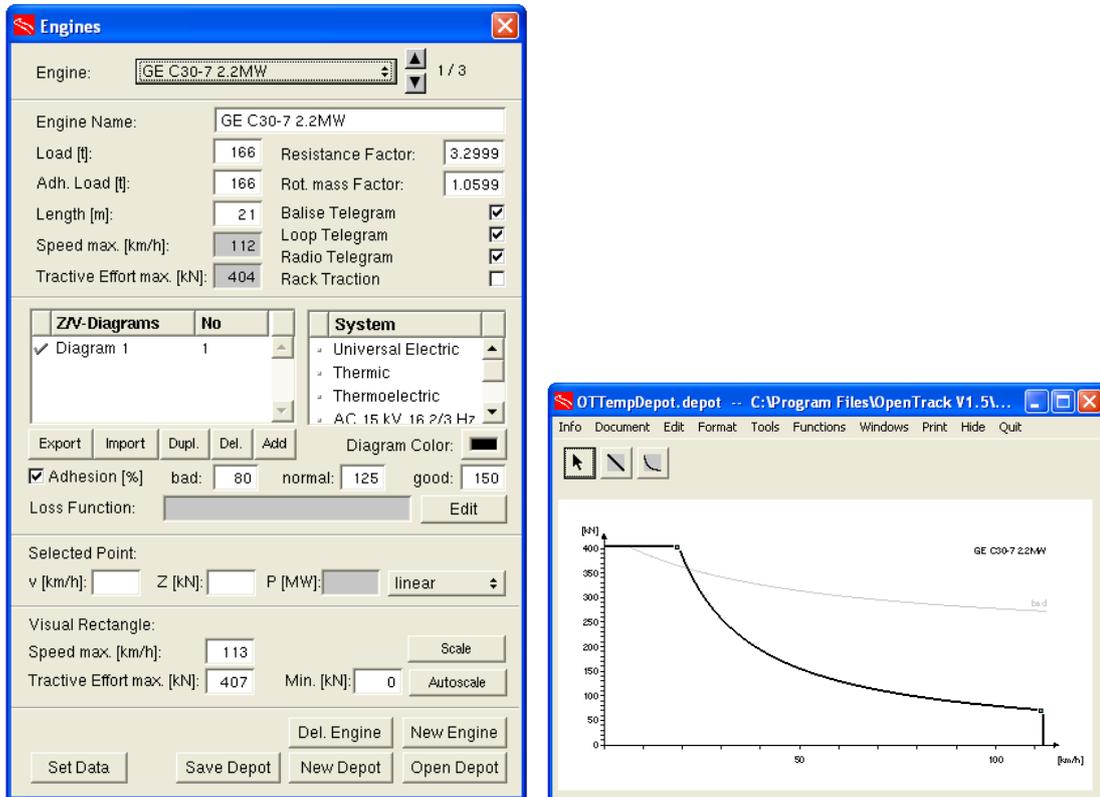


Figura 3.7: Tendina input motrice (sinistra) e diagramma di trazione (destra).

Nella finestra della Figura 3.9 sono da impostare le formule per il calcolo delle resistenze al rotolamento, alla pendenza longitudinale e in curva.

Per il rotolamento sono disponibili le seguente formule:

- formula di Strahl e di Sauthoff, dove si applicano formule diverse per diversi tipi di veicoli (locomotive, vagoni passeggeri, vagoni merci);
- formula di Davis dove si ha una formula unificata per tutto il treno;
- formula Maglev, per mezzi a levitazione magnetica.

Il calcolo della resistenza in caso di pendenza longitudinale può essere fatto considerando la massa del treno uniformemente distribuita lungo singoli vagoni o per tutta la lunghezza del treno.

Per la resistenza in caso di curva si può scegliere la formula di Roeckl per i treni, la formula per i tram o una formula alternativa che è possibile calibrare.

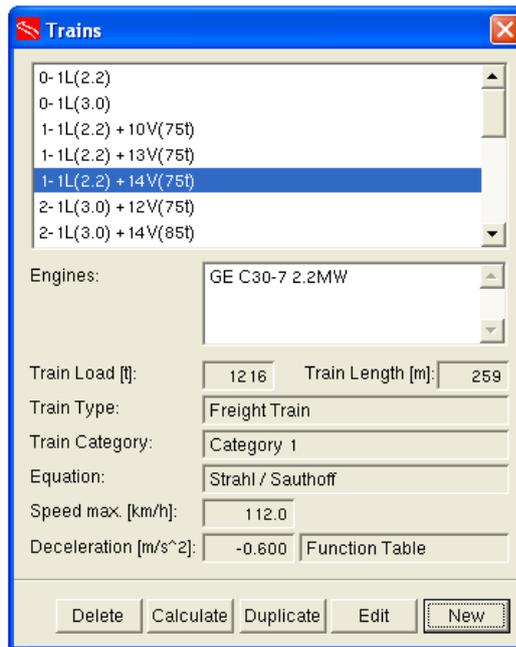


Figura 3.8: Tendina dei treni nella database.

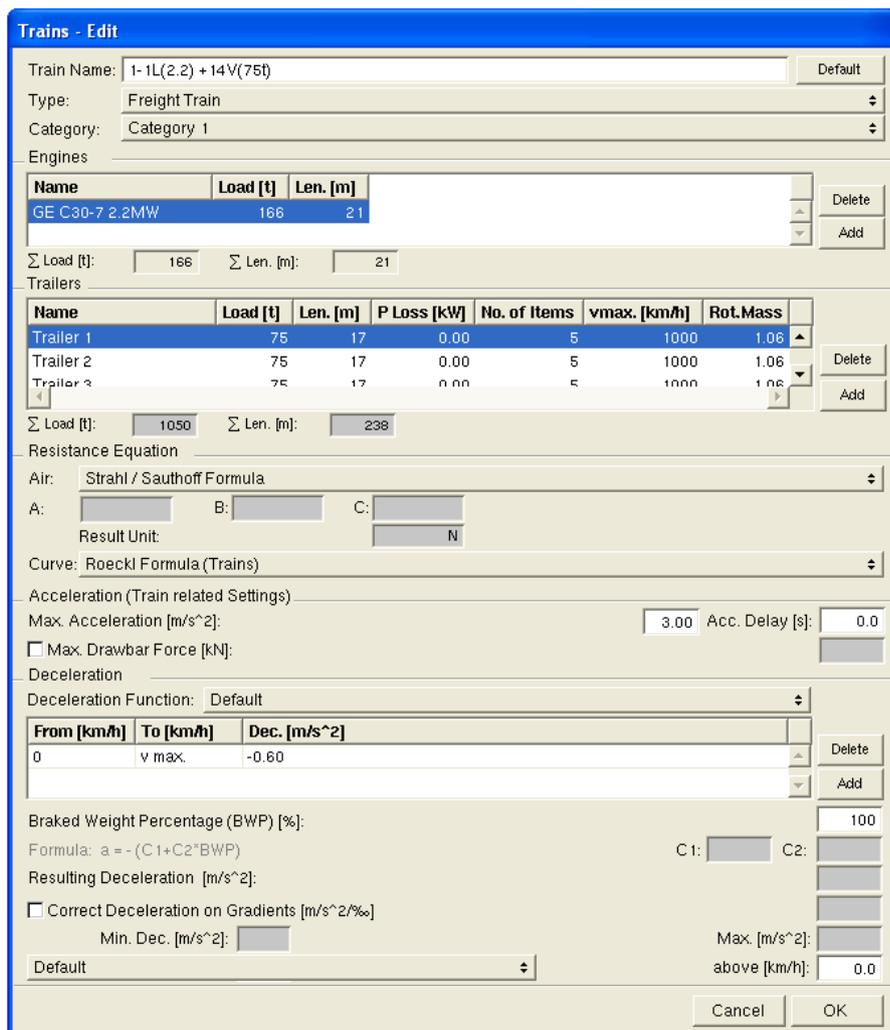


Figura 3.9: Tendina di input di un treno.

I calcoli svolti da OpenTrack per il calcolo della resistenza totale sono qui di seguito riportati:

Resistenza totale del treno:

$$R = R_f + R_a$$

R:	Total Resistance	[R] = N
R <sub>f</sub> :	Traction Resistance	[R <sub>f</sub> ] = N
R <sub>a</sub> :	Acceleration Resistance	[R <sub>a</sub> ] = N

- Resistenza di trazione:

$$R_f = R_r + R_{st}$$

R <sub>f</sub> :	Traction Resistance	[R <sub>f</sub> ] = N
R <sub>r</sub> :	Rolling Resistance	[R <sub>r</sub> ] = N
R <sub>st</sub> :	Distance Resistance	[R <sub>st</sub> ] = N

- Resistenza di rotolamento:

$$R_L = R_{Lr} + R_{Lp} + R_T \quad \text{Strahl/Sauthoff (Personenzüge / Passenger Trains)}$$

$$R_L = R_{Lr} + R_{Lg} + R_L \quad \text{Strahl/Sauthoff (Güterzüge / Freight Trains)}$$

$$R_L = R_{Lz} + R_T \quad \text{Davis, Maglev}$$

- Resistenza di distanza:

$$R_{st} = R_s + R_g + R_w$$

R <sub>st</sub> :	Distance Resistance	[R <sub>st</sub> ] = N
R <sub>s</sub> :	Gradient resistance	[R <sub>s</sub> ] = N
R <sub>g</sub> :	Curve resistance	[R <sub>g</sub> ] = N
R <sub>w</sub> :	Switch resistance	[R <sub>w</sub> ] = N

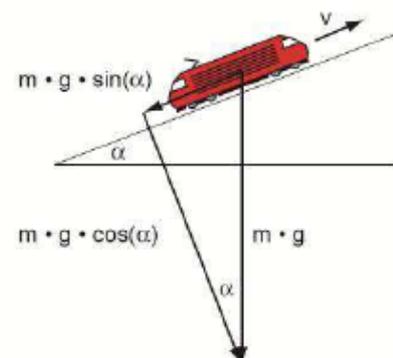
\* La resistenza dello scambio (switch) è in genere trascurabile.

\* Resistenza alla pendenza:

$$R_s = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

$$R_s = m \cdot g \cdot \tan(\alpha) = m \cdot g \cdot \frac{I}{1000} \quad \begin{array}{l} \text{für kleine } \alpha \\ \text{for small } \alpha \end{array}$$

R <sub>s</sub> :	Gradient resistance	[R <sub>s</sub> ] = N
m:	Train weight (mass)	[m] = kg
g:	Acceleration due to gravity	[g] = m/s <sup>2</sup>
α:	Angle of inclination	[α] = ° or rad
I:	Upward gradient (slope)	[I] = ‰



- \* Resistenza in curva:  
in caso di scartamento standard si utilizzano generalmente le seguenti formule.

$$R_c = \frac{6,3}{r-55} \cdot m \quad \text{for } r \geq 300 \text{ m}$$

$$R_c = \frac{4,91}{r-30} \cdot m \quad \text{for } r < 300 \text{ m}$$

$R_c$ :	Curve resistance	$[R_c] = \text{N}$
$r$ :	Curve radius	$[r] = \text{m}$
$m$ :	Train weight (mass)	$[m] = \text{kg}$

- Resistenza di accelerazione:

$$R_a = m \cdot a \cdot (1 + 0,01 \cdot \rho)$$

$R_a$ :	Acceleration resistance	$[R_a] = \text{N}$
$m$ :	Train weight (mass)	$[m] = \text{kg}$
$a$ :	Acceleration rate	$[a] = \text{m/s}^2$
$\rho$ :	Empirical mass factor	$[\rho] = 1$

Il treno subisce questo tipo di resistenza proporzionale alla sua massa mentre esso sperimenta un'accelerazione o decelerazione.

È possibile definire diversi range di accelerazione e decelerazione da utilizzare al variare della velocità del convoglio.

### 3.2.3 Orario di servizio

Una volta definito il materiale rotabile e l'infrastruttura con cui viene effettuata la corsa, essa necessita anche di un orario di servizio: per ogni corsa sul programma si specificano almeno l'orario di partenza da dove comincia la corsa. Si possono anche specificare orari di arrivo e partenza nelle località di servizio, i secondi di attesa minimi necessari per il servizio viaggiatori ed eventuali coincidenze con altri servizi come è illustrato nella Figura 3.10.

Attraverso la definizione dell'orario di servizio il programma costruisce il "traingraf" disegnando in automatico l'orario grafico attraverso una linea tratteggiata in un sistema di assi tempo-spazio; durante la simulazione, a seconda della *performance* scelta e delle caratteristiche delle locomotive assegnate, verrà disegnata la traccia reale mantenuta dal treno attraverso una linea continua; questo permette di visualizzare sia la traccia oraria pianificata (con linea tratteggiata) sia quella realmente "performata" dal treno (con linea continua) come si vede nella Figura 3.11.

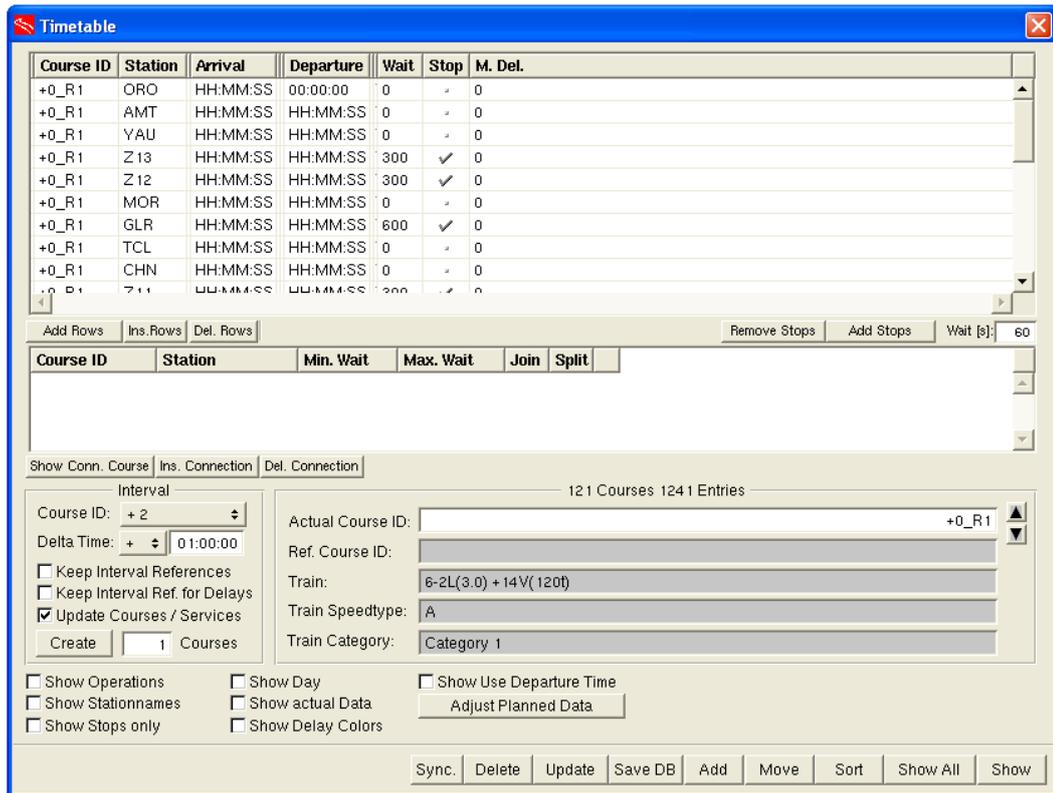


Figura 3.10: Tendina inerente all'ingresso del orario di servizio.

### Rapperswil - Zürich Oerlikon

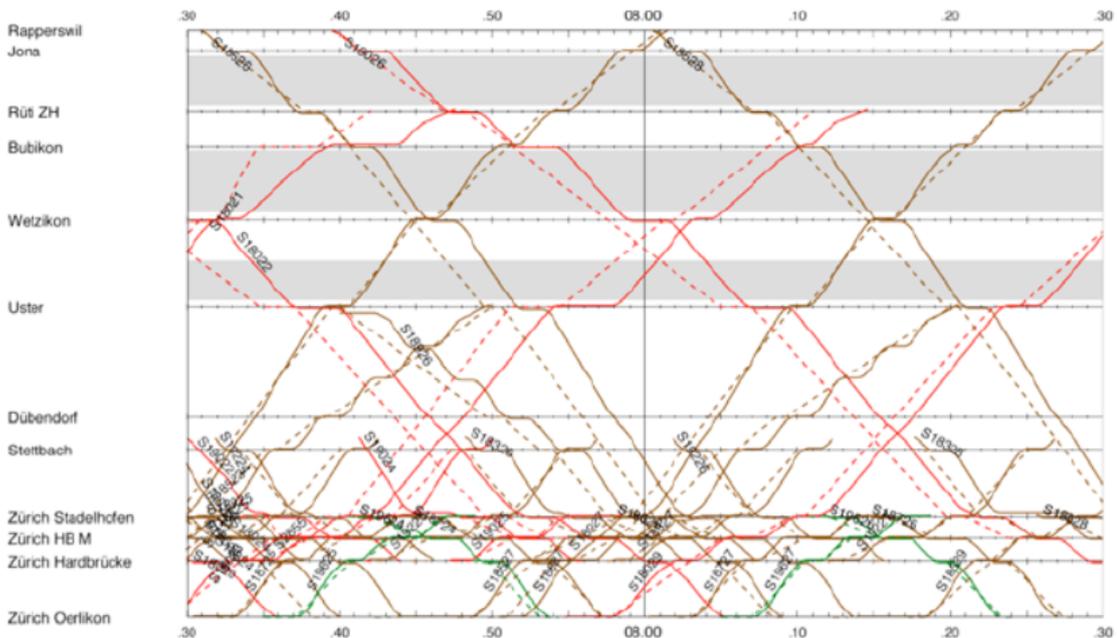


Figura 3.11: Orario grafico evidenziando quello programmato e quello simulato.

Le singole tracce sono confermate nella seguente maniera:  
tra due segnali, che solo si posano nei vertici che compongono l'infrastruttura già

menzionati, si indica una *route* (strada). Più *routes* concatenate costituiscono un *path* (percorso) e più *paths* concatenati formano un *itinerary* (itinerario), come nello schema della Figura 3.12.

Dopo aver definito i percorsi, è necessario assegnare i treni che seguiranno quei

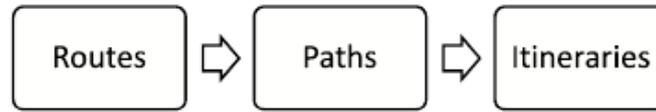


Figura 3.12: Schema dei percorsi.

percorsi, il tipo di blocco da utilizzare (mobile o fisso) e le *performance* in caso di treno puntuale. Questi aspetti vengono definiti nella creazione delle *courses* (corse).

### 3.3 Simulazione

Durante la simulazione, il movimento dei treni è ricostruito attraverso la soluzione dell'equazione differenziale di moto combinata con le informazioni provenienti dai segnali: questo realizza quindi un modello continuo-discreto come già accennato. Per la fase di accelerazione, l'equazione differenziale del moto viene integrata per ricavare la velocità del treno e con una seconda integrazione ritrovare la distanza percorsa.

$$v = v_0 + \int_{t_1}^{t_2} a dt$$

$$s = s_0 + \int_{t_1}^{t_2} v dt$$

Invece, per la fase di frenatura, è difficile definire un modello che simuli il comportamento reale di frenatura. Per questo OpenTrack fa corrispondere a ogni intervallo di velocità un livello di decelerazione diverso.

La circolazione dei treni però è governata anche dal funzionamento dei segnali dove l'aspetto di essi o le occupazioni delle sezioni definite da questi causano o potrebbero causare ritardi nel cambiamento dell'aspetto dei segnali che agiscono sulla circolazione fornendo la parte discreta del modello di simulazione. Vedasi Figure 3.13 e 3.14.

Durante la simulazione, i treni tentano di rispettare l'orario pianificato; pertanto, per rappresentare la dinamica di ciascun treno, OpenTrack ne risolve l'equazione differenziale del moto rispettando i vincoli posti dal sistema di distanziamento e dai segnali; mentre le sezioni di blocco occupate e aspetti restrittivi dei segnali rallentano o fermano i treni. La velocità, l'accelerazione, la posizione, il consumo di energia e molti altri dati di ogni treno sono memorizzati a ogni istante di simulazione su specifici file, per essere analizzati al termine della simulazione, la quale può essere eseguita in tempo reale, mediante un'animazione che mostra il movimento dei treni lungo la rete, le corrispondenti occupazioni dell'infrastruttura e gli aspetti dei segnali; qualora l'utente avesse particolari esigenze è possibile andare a velocizzare

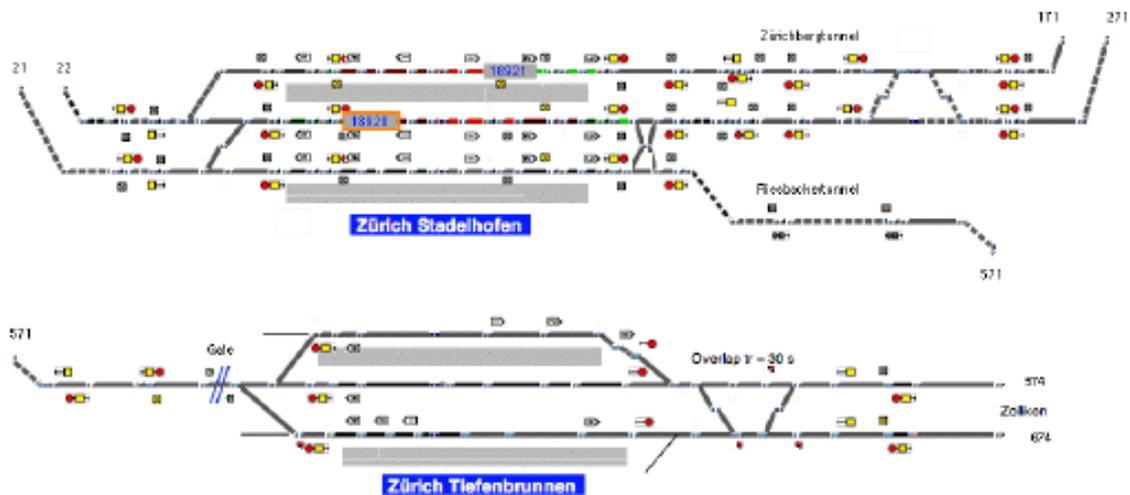


Figura 3.13: Esempio di istante di simulazione.

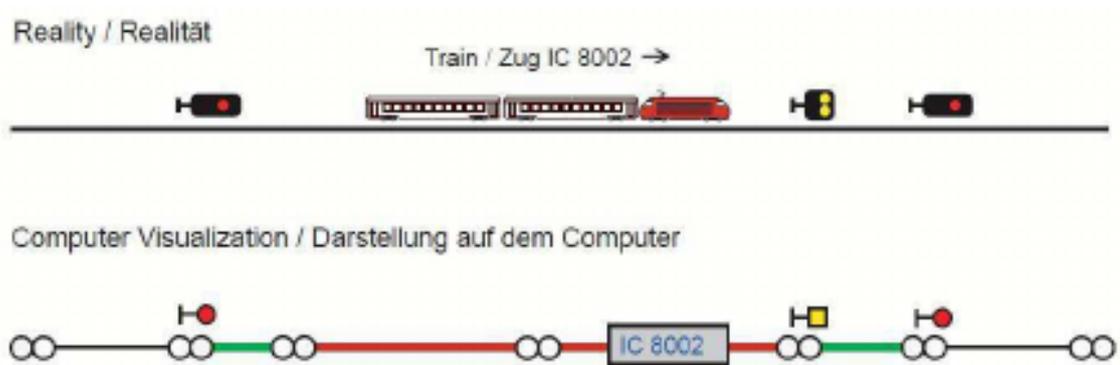


Figura 3.14: Esempio di interfaccia di simulazione.

la simulazione accelerando lo scorrimento del tempo virtuale fino a sessanta volte la velocità di scorrimento nella realtà. Durante la simulazione, il programma genera dei messaggi che aiutano l'utente a capire quali sono le principali problematiche legate alla circolazione, che si sono verificate durante la simulazione stessa.

### 3.4 Dati in uscita

Il programma, come già accennato in precedenza, permette all'utente di poter usufruire di elaborazioni di marcia del treno nella forma di orario-grafico di questo (traingraf - Figura 3.15). Una volta definito il *timetable* delle corse, esse sono riportate tratteggiate sulla pagina del *traingraf*; durante la simulazione saranno disegnate invece le tracce con un tratto continuo; questo rende evidente all'utente la differenza fra la traccia teorica da orario e quella simulata permettendo così un più agevole riconoscimento dei problemi avvenute durante la simulazione.

Il traingraf è uno strumento interessante perché permette di modificare direttamente i dati del orario di servizio dallo stesso agevolando il cambiamento.

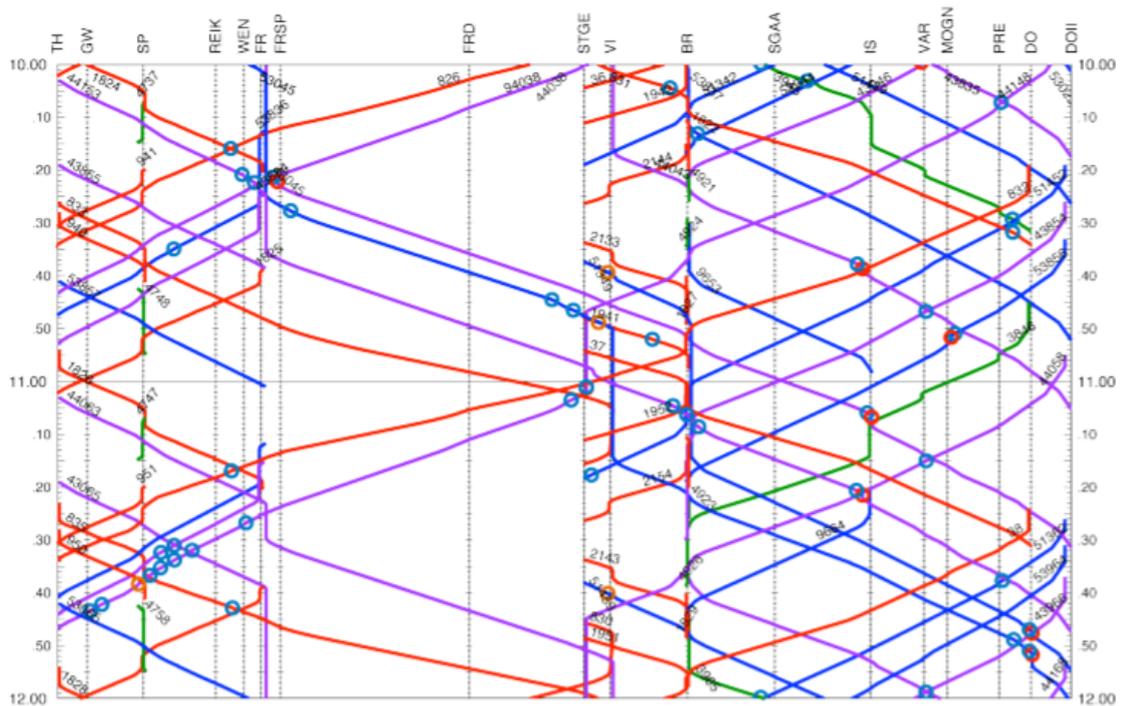


Figura 3.15: Diagramma spazio-tempo di diverse corse.

### 3.4.1 Altri dati di uscita

OpenTrack consente di analizzare e visualizzare i risultati della simulazione sotto forma di grafici o testo.

Del primo gruppo i più importanti sono il diagramma spazio-tempo (Figura 3.15), diagramma velocità-distanza (Figura 3.16), diagramma di occupazione dei binari di una stazione (Figura 3.17), orari grafici (Figura 3.11), oppure statistiche (Figure 3.18, 3.19).

I file del secondo gruppo si possono analizzare in un contesto più adatto per il trattamento dei dati di testo, di solito un software per lavorazione di file xml e simili, per risultati più chiari. (Figure 3.20 e 3.21.)

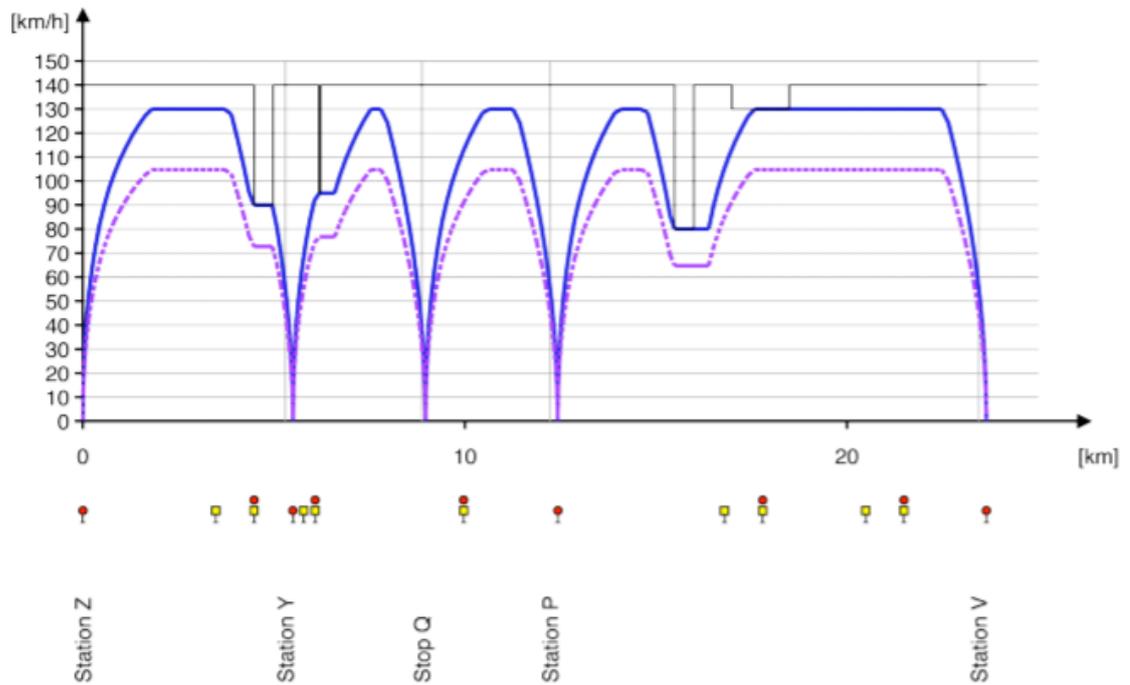


Figura 3.16: Diagramma velocità-spazio.

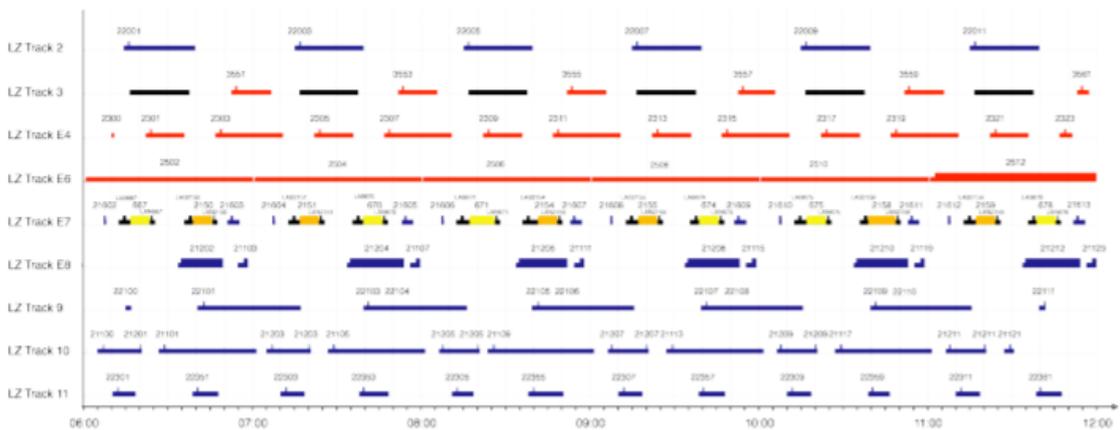


Figura 3.17: Diagramma di occupazione dei binari di una stazione.

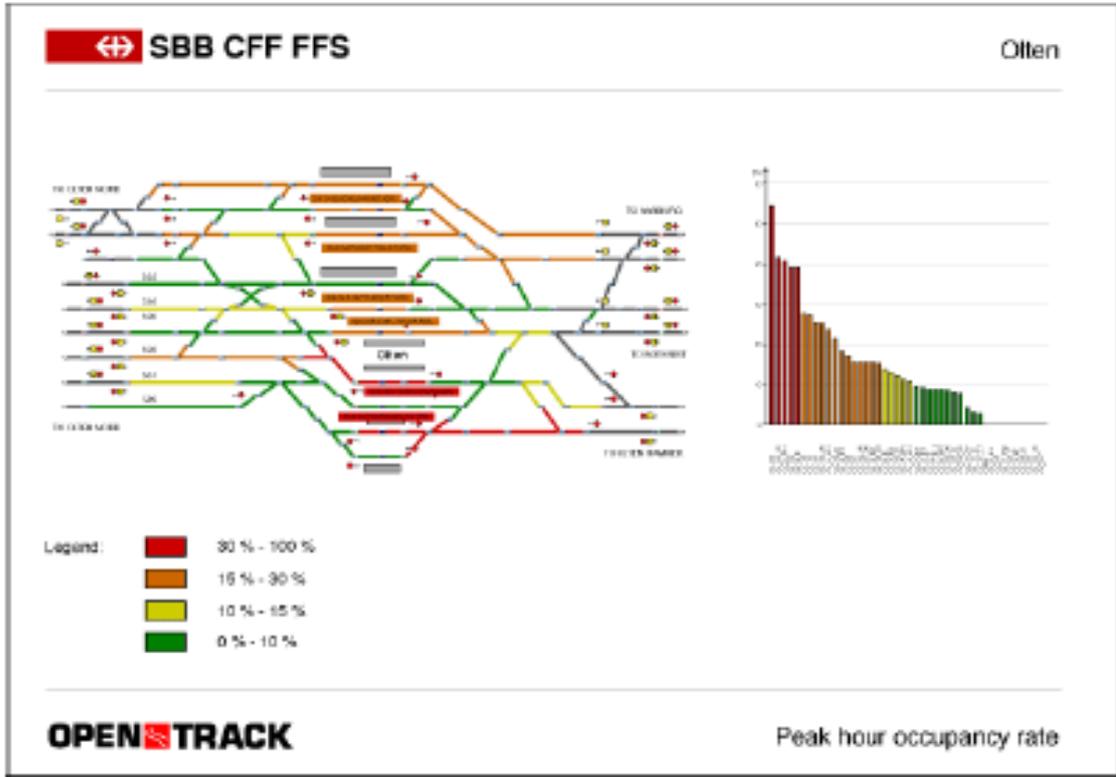


Figura 3.18: Statistiche sull'occupazione dell'infrastruttura.

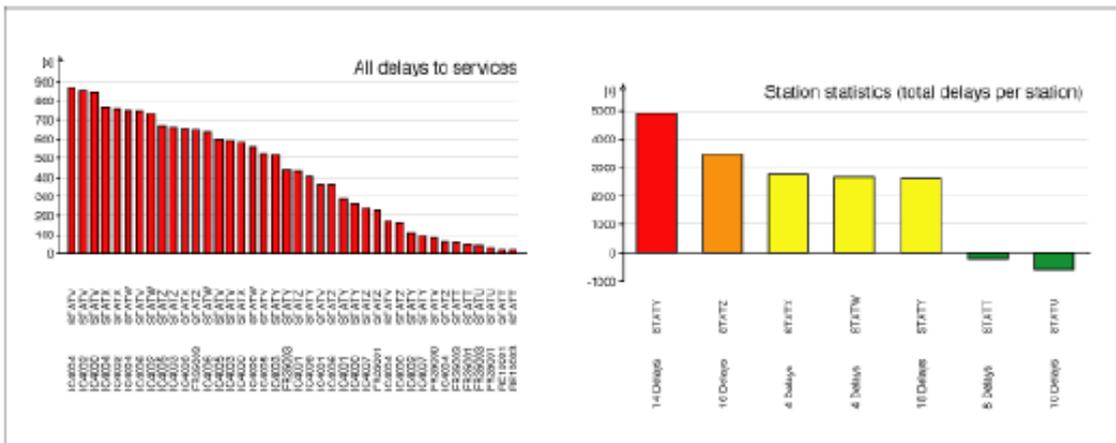


Figura 3.19: Statistiche dei ritardi.

Excel window: OT\_TimetableStatistics.xls - Excel

Course	Station	Arr. Planned [HH:MM:SS]	Dep. Planned [HH:MM:SS]	Arr. Actual [HH:MM:SS]	Dep. Actual [HH:MM:SS]	Arr. Del. [s]	Dept. Del. [s]
18021	ZMUS	07:04:00	07:05:20	HH:MM:SS	07:07:00	0	100
18021	ZMUO	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:07:26	0	0
18021	ZSTH	07:09:00	07:10:30	07:09:04	07:10:30	4	0
18021	ZHOT	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:11:40	0	0
18021	STET	07:14:00	07:14:00	HH:MM:SS	07:13:52	0	-8
18021	NGUT	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:14:20	0	0
18021	CHRI	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:14:50	0	0
18021	DUE	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:15:22	0	0
18021	SCWE	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:16:56	0	0
18021	NAEN	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:18:16	0	0
18021	UST	07:21:00	HH:MM:SS	07:20:26	HH:MM:SS	-34	0
18022	UST	HH:MM:SS	07:37:20	HH:MM:SS	07:39:00	0	100
18022	NAEN	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:40:46	0	0
18022	SCWE	HH:MM:SS	HH:MM:SS	HH:MM:SS	07:42:06	0	0

Figura 3.20: Esempio dei dati di output.

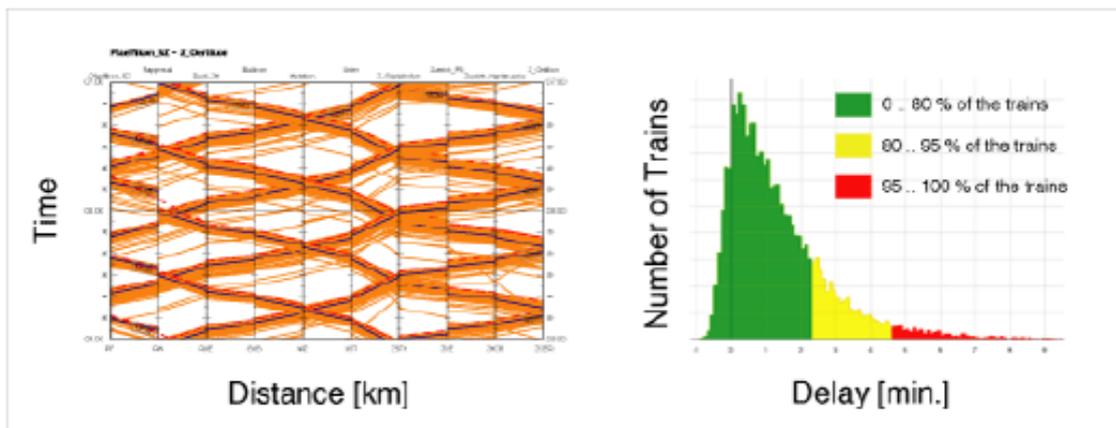


Figura 3.21: Esempio di analisi dei dati di output.

# Capitolo 4

## Approccio di modellizzazione

Dopo aver delineato la metodologia, qui di vengono esposte in dettaglio le origini e come sono stati modellati i dati utilizzati per la simulazione della linea ferroviaria, ma non soltanto come la si trova attualmente in esercizio, ma anche come si prevede che sarà una volta finiti gli interventi infrastrutturale e sul materiale rotabile per ricavare la potenzialità della linea. Si presentano anche una serie di scenari intermedi per realizzare l'analisi e determinare la cronologia degli interventi:

### 4.1 Infrastruttura

I dati importanti di questa sezione che compongono gli archi della linea ferroviaria per modellarla sono:

- longitudine dell'arco, che deve concordare con la progressiva dei vertici;
- raggio di curvatura, nel caso che fosse una curva;
- la pendenza longitudinale con il suo segno;
- tunnel, nel caso esistesse;
- segnali sui vertici se ci fossero;
- velocità massima ammessa;
- stazione, se ci fosse.

Come è stato menzionato e come si può immaginare, gli interventi infrastrutturali sono quelli che porteranno la maggior crescita della capacità sulla linea transandina. Tra questi ci sono la realizzazione dei tunnel menzionati, la disposizione di un sistema di segnalamento e la modernizzazione del materiale rotabile.

Gli scenari in cui si è suddiviso il processo di miglioramento dopo essere stati modellati, si presentano come segue:

La ricostruzione della planimetria e della altimetria si è fatta da una polilinea spaziale georeferenziata contenuta in un file "kmz" come si può vedere nella Figura 4.2 da dove si è presso latitudine, longitudine e altitudine di ciascun punto componente.

Basandosi su queste tre caratteristiche, per poco più di undicimila punti, si è proceduto nella seguente maniera:

Figura 4.1: Scenari modellizzati.

Situazione	Lunghezza linea	Pendenza media e massima in salita e discesa	Raggi di curvatura	Velocità massima [km/h]	N° di Zig-Zags e tempo di attesa	Tunnel	Segnalamento / Lunghezza blocchi
0-Attuale	170.4 km	33.4 ‰ e 43.9 ‰ in salita 25.3 ‰ e 40.3 ‰ in discesa	Minori a 100m Alcuni di 75m	30 (salita) 20 (discesa)	(6x2) = 12 ≥ 5 min 1 ≥ 12 min	---	--- (solo in stazione) 5 km
1.0	129.4 km	32.3 ‰ e 33.0 ‰ in salita 17.6 ‰ e 30.0 ‰ in discesa	Minori a 100m Alcuni di 75m	30 (salita) 20 (discesa) 70 (tunnel)	(2x2) = 4 ≥ 5 min 1 ≥ 12 min	Soltanto il Transandino	--- (solo in stazione) 5 km
1.1	128.5 km	32.4 ‰ e 33.0 ‰ in salita 17.6 ‰ e 30.0 ‰ in discesa	Minori a 100m Alcuni di 75m	30 (salita) 20 (discesa) 70 (tunnel)	(2x2) = 4 ≥ 5 min	Transandino + San Bartolomé	--- (solo in stazione) 5 km
1.2	131.6 km	31.9 ‰ e 33.0 ‰ in salita 17.6 ‰ e 30.0 ‰ in discesa	Fino a 100m	30 (salita) 20 (discesa) 70 (tunnel)	(1x2) = 4 ≥ 5 min	Transandino + San M del Viso	--- (solo in stazione) 5 km
1.3	130.8 km	31.7 ‰ e 33.0 ‰ in salita 17.6 ‰ e 30.0 ‰ in discesa	Fino a 120m	30 (salita) 20 (discesa) 70 (tunnel)	---	Transandino + San Bartolomé + San M del Viso	--- (solo in stazione) 5 km
2.0 - Finale	133 km *√*	31.7 ‰ e 33.0 ‰ in salita 17.6 ‰ e 30.0 ‰ in discesa *√*	Fino a 150m *√*	70 (tunnel) 40/50 (salita e discesa) *√*	---	Transandino + San Bartolomé + San M del Viso	--- (solo in stazione) 5 km

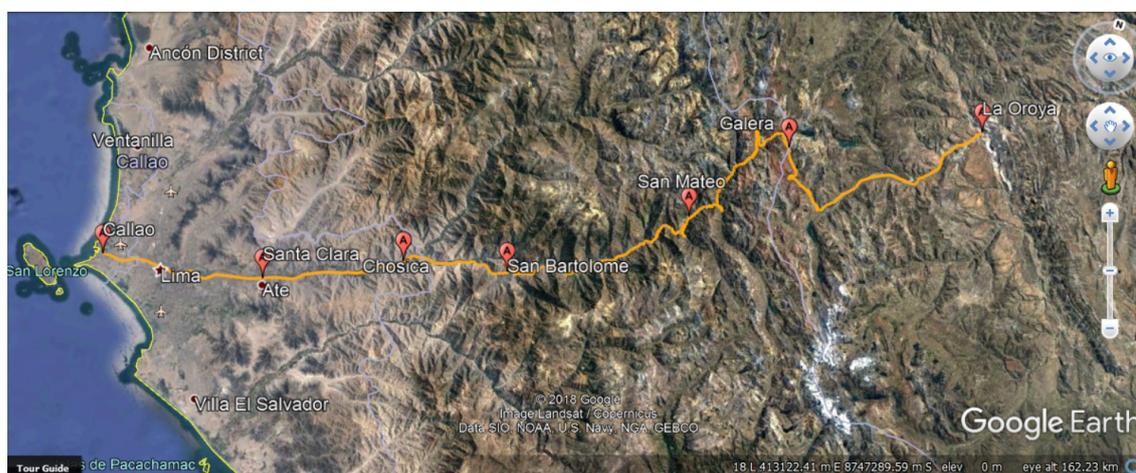


Figura 4.2: Polilinea spaziale progettata su Google maps.

### 4.1.1 Planimetria

Per trovare i primi due valori (longitudine dell'arco e raggio di curvatura), come prima cosa si è generato un sistema di coordinate locali piano, con la sua origine sul primo punto, senza tener conto la sfericità della terra per la piccola distanza della linea rispetto alla scala terrestre. (Figura 4.3)

Si sono individuate le progressive di inizio e fine delle rette e le curve, per poter dopo stimare i raggi delle curve con il metodo geometrico basato sul fatto che su tre punti qualsiasi passa un unico cerchio. Il processo viene dunque così dettagliato: Come primo passo si trovano le coordinate del centro del cerchio partendo dalle coordinate dei tre punti secondo quanto illustrato nella Figura 4.4. Con le coordinate del centro del cerchio e quelle di qualsiasi punto, tramite il teorema di Pitagora, è possibile trovare il raggio del cerchio.

Con questo processo è stato possibile ritrovare un raggio di curvatura per ciascuna tripla di punti dell'intero percorso, per cui è stato molto utile definire valori soglia dove quelli al di fuori non erano accettabili a causa del fatto che due punti della

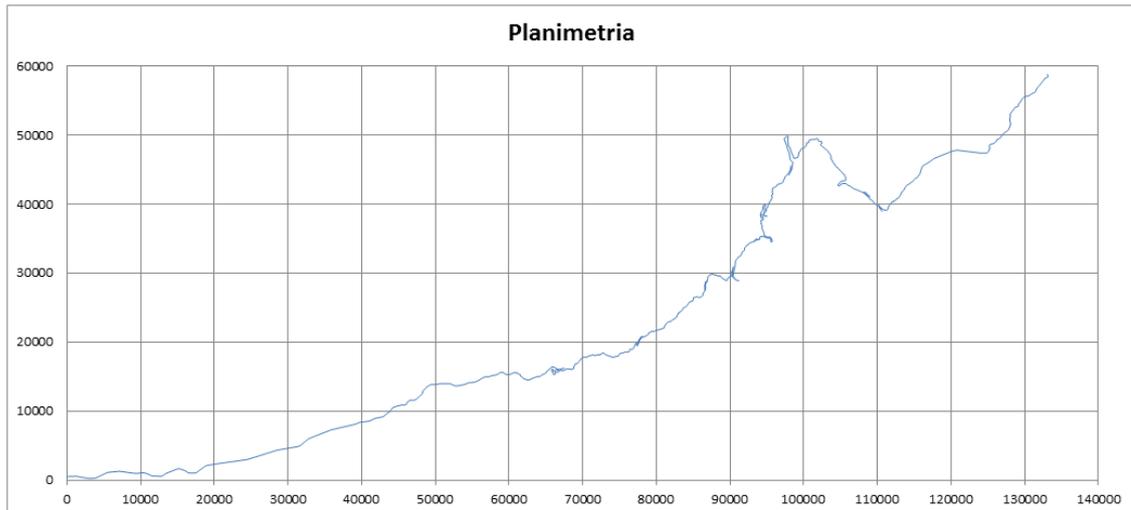
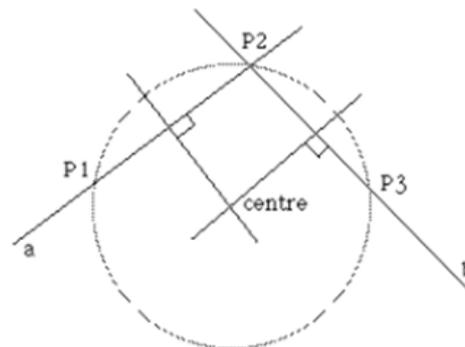


Figura 4.3: Polilinea spaziale in un sistema di coordinate locale.



$$y_a = m_a (x - x_1) + y_1 \quad \text{and} \quad y_b = m_b (x - x_2) + y_2$$

$$m_a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{and} \quad m_b = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}$$

$$y'_a = -\frac{1}{m_a} \left( x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2}$$

$$y'_b = -\frac{1}{m_b} \left( x - \frac{x_2 + x_3}{2} \right) + \frac{y_2 + y_3}{2}$$

$$x = \frac{m_a m_b (y_1 - y_3) + m_b (x_1 + x_2) - m_a (x_2 + x_3)}{2(m_b - m_a)}$$

Figura 4.4: Ricavo delle coordinate del centro del cerchio.

tripola si trovano allineati. Nella Figura 4.5 è possibile vedere parte del processo e parte dei risultati nella Figura 4.6.

X	Y	Z	AA	AB	AC	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
ma	mb	mamb(y1-y3)	mb(x1-x2)	ma(x2-x3)	2(mb-ma)	Xr	l/ma	(x1-x2)/2	(y1-y2)/2	Yr	ΔXr	ΔYr	R
0.09	0.09	-0.33	47498.80	45583.46	0.01	261807.13	11.76	267748.70	8661684.84	8731550.30	-6171.95	-39.18	6172.1
0.09	0.06	-0.04	34750.49	47550.80	-0.05	268149.95	11.27	268002.30	8661706.49	8660041.84	124.44	-1666.71	1671.3
0.06	-0.05	0.00	-26132.29	34760.39	-0.23	268062.87	15.42	268041.83	8661709.61	8661385.05	4.73	-325.61	325.6
-0.05	-0.25	0.58	-136188.79	-26146.43	-0.41	268051.59	-20.51	268078.69	8661709.66	8661153.73	-47.65	-554.94	557.0
-0.25	-0.04	0.45	-20542.91	-136296.41	0.43	268309.37	-3.94	268186.90	8661686.40	8662170.90	35.42	506.77	508.0
-0.04	0.17	0.03	89638.34	-20553.27	0.41	268296.50	-26.11	268290.53	8661663.52	8661819.25	-10.02	156.34	156.7
0.17	0.31	-3.61	166763.73	89688.73	0.29	268171.05	5.99	268322.18	8661665.52	8662570.18	-166.79	902.04	917.3
0.31	0.14	-3.03	75690.15	166912.52	-0.34	268670.33	3.22	268441.36	8661700.31	8660963.52	125.43	-768.97	779.1
0.14	0.09	-0.11	50904.51	75733.68	-0.09	268666.92	7.09	268561.58	8661734.84	8660987.65	88.65	-749.54	754.8
0.09	-0.03	0.01	-14696.07	50917.77	-0.24	268623.47	10.55	268595.73	8661738.94	8661446.11	10.29	-294.39	294.6
-0.03	-0.08	0.01	-41618.81	-14690.13	-0.10	268610.46	-36.58	268631.51	8661740.00	8660963.90	-39.38	-763.59	770.6
-0.08	-0.19	4.80	-100028.19	-41765.18	-0.22	268601.89	-12.91	268669.95	8661737.94	8653113.88	-698.18	-8622.50	8649.9
-0.19	-0.12	7.45	-63814.50	-100708.54	0.14	272160.30	-5.37	269576.30	8661571.40	8675452.38	1697.78	14045.95	14148.2
-0.12	-0.06	0.08	-32490.43	-64045.59	0.12	270610.01	-8.45	270497.33	8661402.31	8662354.38	77.89	956.19	959.4

Figura 4.5: Processo di ricavo dei raggi di curvatura.

N	O	Q	R	S	T	U
N°	Prog	DATO	TIPO	LONGITUD	P.K. final	RADIO
1	0	1	RECTA	0.509	0.509	
2	0.462	1	CIRC.	0.074	0.583	533
3	0.509	2	RECTA	0.181	0.764	
4	0.542	2	CIRC.	0.064	0.828	767
5	0.583	3	RECTA	0.217	1.044	
6	0.764	3	CIRC.	0.146	1.190	533
7	0.796	4	RECTA	1.873	3.063	
8	0.828	4	CIRC.	0.110	3.173	635
9	1.044	5	RECTA	0.735	3.908	
10	1.078	5	CIRC.	0.168	4.076	1044
11	1.113	6	RECTA	1.528	5.604	
12	1.150	6	CIRC.	0.270	5.874	926

Figura 4.6: Parte del risultato.

## 4.1.2 Altimetria

Per ricavare la pendenza degli archi da inserire su OpenTrack, si è iniziato dall'altitudine di ciascun punto esposti nella Figura 4.7. In questo grafico, pur essendo un po' rumoroso, è possibile distinguere intervalli dove la pendenza si mantiene costante e dove essa varia, come è illustrato.

Partendo dall'inizio, ovvero dal porto del Callao, c'è un primo tratto di pendenza quasi nulla nei primi chilometri mentre si attraversa la capitale Peruviana, dopo 5km c'è un tratto ascendente con pendenza costante del 19‰ fino alla progressiva 40+000, dove comincia un raccordo verticale lungo 20km per elevare la pendenza fino al 33‰, che persiste per i prossimi 95km dove la pendenza scende a zero 5km, prima dell'ultimo tratto in salita all'andata. La pendenza viene ancora alzata una volta raggiungendo il 44‰ per poche centinaia di metri arrivando in cima nella progressiva 172+400.

Dopodiché comincia la discesa, dove la pendenza viene diversificata in vari tratti relativamente corti. Il primo è un raccordo che comincia in -33‰ nella progressiva della cima e la pendenza si appiana fino a -13.6‰ nella progressiva 183+000, da dove percorre 6km con pendenza nulla. Il terzo tratto in discesa è a pendenza costante di -38‰ con una fine alla progressiva 200+000. Gli ultimi due tratti in discesa sono a pendenza costante del -14‰ e -18‰ lunghi 8km e 15km rispettivamente.

La modellazione viene fatta a tratti, dove si possono interpolare con gran affidabilità i valori di altimetria con polinomi di alto grado esistendo una continuità tra di loro. Nel grafico 4.8 si può vedere la sovrapposizione dei valori dei dati e la modellazione di questi.

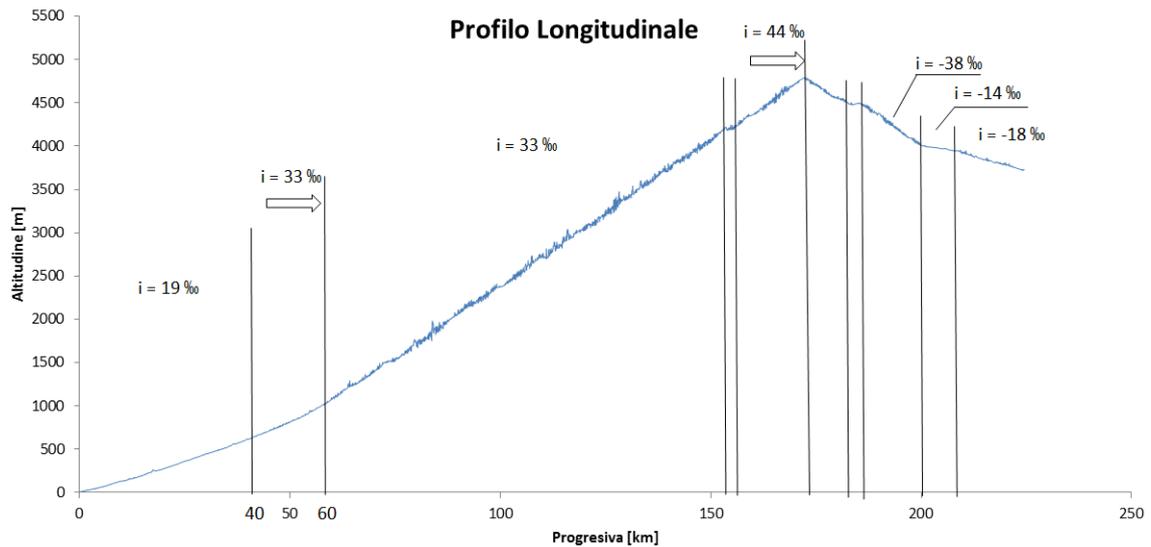


Figura 4.7: Modellizzazione dell'altimetria della linea.

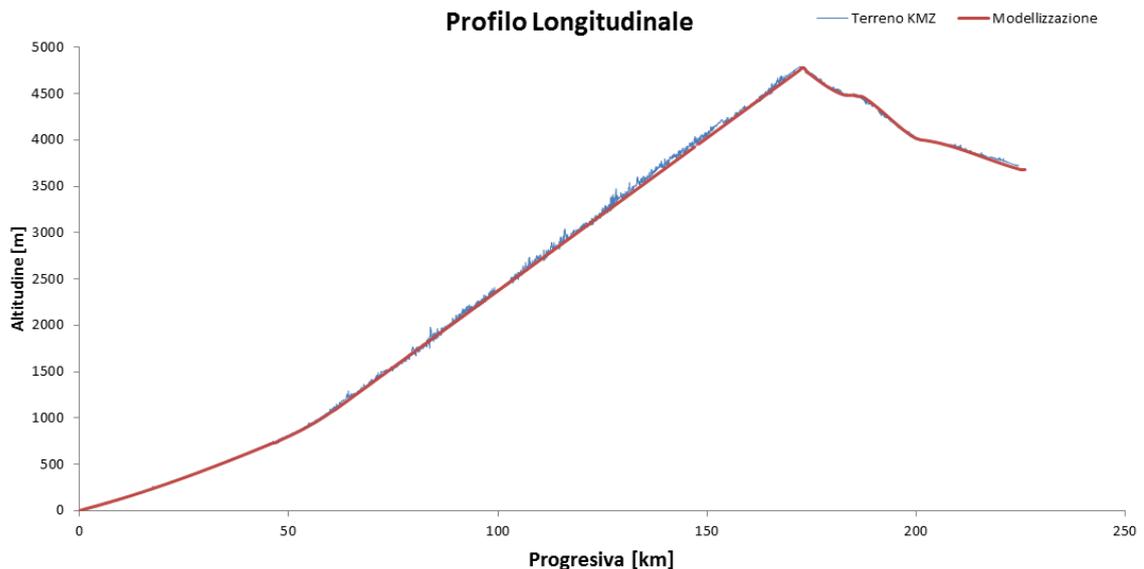


Figura 4.8: Dati di altimetria (blu), dati della modellazione (rosso).

### 4.1.3 Segnalamento

Attualmente sulla linea la marcia è completamente a vista, non esiste cioè nessun tipo di segnalazione tra due stazioni. In quelle più grandi, come ad esempio quella del porto del Callao, Santa Clara, Gallera, Chosica, ecc, esiste un tipo di segnalamento che governa il movimento dei treni all'interno dei piazzali.

In quel modo la modellazione viene fatta così che solo esistono segnali agli estremi delle stazioni e i zig-zag solo se si possono incrociare i treni, ma permettendo di inserire più di un treno nella medesima direzione di marcia tra due stazione.

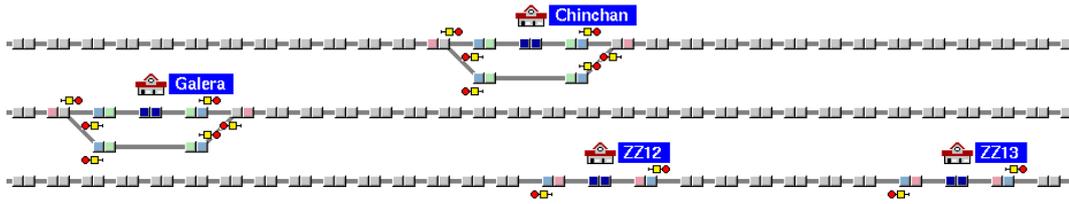


Figura 4.9: Modellizzazione del segnalamento.

#### 4.1.4 Tunnel e velocità massima

In questa linea, essendo stata fatta e inaugurata più di un secolo fa, la tortuosità con cui è stata costruita non permette di fare viaggiare i treni a più di una certa velocità che viene ancora ridotta per motivi di sicurezza, a causa della mancanza di un'accurata manutenzione sulle opere d'infrastruttura, come ponti e viadotti, ma soprattutto per i rischi di svio che questo comporta.

Tutto questo fa sì che la velocità massima dal Callao in direzione a La Oroya sia di 30 chilometri all'ora, dove quasi tutto il percorso è in salita; e al ritorno, in senso opposto, è di 20 chilometri all'ora per il fatto che è quasi tutto il percorso in discesa, dove il rischio di svio o di perdere il controllo del treno è maggiore.

Si è detto che su questa linea ci sono 69 gallerie, con lunghezze minori di 200 metri e in genere piazzate nel tratto di pendenza longitudinale di 33‰, ma che non sono stati inseriti nella modellazione per le sue corte lunghezze e la bassa velocità di percorrenza limitata dalla velocità massima ammessa sulla linea in quanto la resistenza dei tunnel è direttamente proporzionale a questi due fattori.

#### 4.1.5 Stazioni e zig-zag

Le stazioni e i zig-zag sono stati trattati insieme per la modellazione; si è solo fatta una distinzione tra dove c'è la possibilità di fare incrociare i treni, ossia, dove c'è almeno un binario di precedenza che si possa utilizzare per le soste e dove non si possa fare incrociare i treni per diversi motivi.

Di seguito (nelle Figure 4.10 e 4.11) si illustrano le stazioni e i zig-zag modellate secondo la possibilità di poter fare incrociare almeno due treni o non.

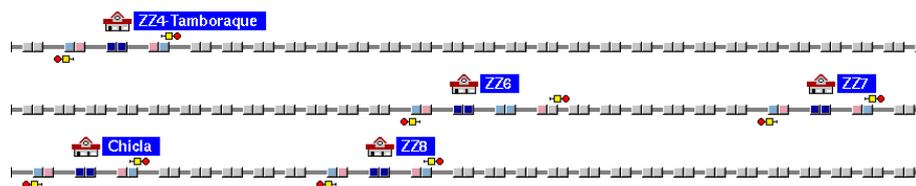


Figura 4.10: Stazioni e Zig-Zags dove non si possono fare incrociare i treni.

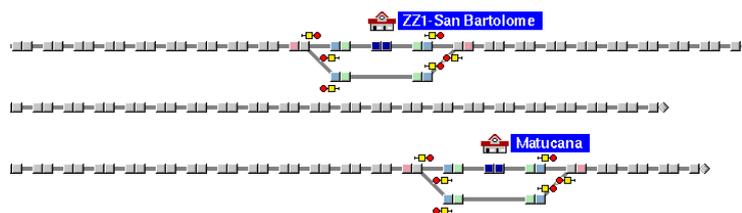


Figura 4.11: Stazioni e Zig-Zags dove si possono fare incrociare i treni.

Come ultima cosa, per poter importare direttamente i dati dell'infrastruttura su OpenTrack si è dovuto riordinare i dati e salvarli nel tipo di file corretto perché il software possa leggerli senza problemi e disegnarli direttamente nell'interfaccia grafica i vertici e gli archi con le sue proprie caratteristiche di lunghezza, progressiva, velocità massima, raggio di curvatura in caso non fosse rettilineo e la presenza delle stazioni nei punti corrispondenti.

## 4.2 Materiale rotabile

Il materiale rotabile, in questo caso solo merce, viene inserito secondo la spiegazione del capitolo precedente ed è composto da la/le motrice/i (specificate ancora prima) e i carri che contengono il carico trasportato.

I convogli che si includono nella simulazione sono stati conformati con la premessa di trovare il massimo carico trasportato in un tempo non eccessivamente lungo, in modo di esigere molto ma non troppo dalle locomotive essendo relativamente vicino alle condizione limite di trazione con un certo margine ragionevole di sicurezza. Ciò significa che sono stati fatti un gran numero di simulazioni cambiando il carico totale dei carri, che per la situazione attuale dell'infrastruttura son quattordici.

Si è cominciato simulando la condizione limite di sforzo di trazione dove il treno non poteva continuare a salire nei tratti più pendenti e la situazione dove il treno percorre tutta la tratta a velocità massima. Con queste due soglie si sono ritrovati i convogli per ciascuna situazione infrastrutturale, come si dettaglia nella sezione successiva.

## 4.3 Orario grafico

L'orario grafico, per mancanza di dati tecnici, è stato inserito manualmente in modo di inserire il maggior numero di tracce possibile provando che siano di uguale quantità in andata che in ritorno e che siano intorno a 18 ore circa di lavoro, per lasciare finestre temporali per il riposo dei macchinisti e la manutenzione dell'infrastruttura. *Per questo gli orari grafici ritrovati rappresentano la massima capacità della linea.*

## 4.4 Limitazioni della modellizzazione

Le limitazioni della simulazione sono principalmente dovuti alla modellizzazione dell'infrastruttura, dal materiale rotabile e degli orari grafici.

L'altimetria dell'infrastruttura è stata modellata con una gran accuratezza, dove i diversi polinomi si sovrappongono ai punti in maniera quasi perfetta. La planimetria, che vuol dire lunghezza archi e raggi di curvatura ha avuto un'accuratezza minore, ma comunque soddisfacente per gli obiettivi del lavoro.

Il materiale rotabile è stato inserito in maniera molto precisa trattando di coprire gli estremi dell'intervallo dei tipi di locomotive e vagoni componenti il materiale rotabile.

L'ultima informazione inserita ha riguardato gli orari grafici, che sono orari compatibili col sistema, cioè sono fattibili, ma non sono ottimi e dal punto di vista teorico non appartengono alla frontiera di pareto.

## Capitolo 5

# Effetti della modellizzazione e simulazione

In questo capitolo si sviluppa singolarmente ogni scenario trattato precedentemente, spiegando i miglioramenti infrastrutturali particolar di ciascuna.

La prima situazione, chiamata Situazione 0, è quella che imita le condizioni attuali; cioè i 13 zig-zag, la pendenza che sale fino al 44‰ facendo arrivare la linea a 4781 m di altitudine e il materiale rotabile composto da due locomotive non può tirare più di 1260 tonnellate utili.

La seconda situazione, chiamata Situazione 1.0, prevede l'inserimento alla linea del Tunnel Transandino, una galleria di 25,6 km di lunghezza che accorcia il percorso di circa 40 km e toglie il tratto di pendenza più ripida facendo sì che la massima pendenza longitudinale sia del 33‰. Essa elimina sette zig-zag, così da lasciarne cinque; mentre il materiale rotabile è uguale.

La terza situazione, indicata Situazione 1.1, aggiunge alla situazione 1.0 il tunnel di San Bartolomé di 5,3 km di lunghezza e per non togliere la fermata in quella stazione, perché comincia prima della stazione e finisce dopo, si prevede un binario di precedenza subito prima del tunnel (mantenendo la progressiva 0+000.00 nel porto del Callao), per mantenere la possibilità d'incrocio; ciò toglie un zig-zag in più, così che ne rimangono quattro. Il materiale rotabile è il medesimo.

La quarta situazione, nominata Situazione 1.2, invece del tunnel di San Bartolomé prevede l'inserimento del tunnel di San Miguel del Viso, che possiede una lunghezza di 15,6 km e toglie quattro zig-zag invece che uno, e questo fa sì che ne rimanga soltanto uno. Il materiale rotabile è identico.

La quinta situazione, chiamata Situazione 1.3, prevede tutte e tre tunnel con il binario di precedenza, che raggiungono una lunghezza complessiva di 46,5 km, e tolgono tutti i zig-zag. Questo permette che il materiale rotabile si possa allungare e si utilizzano tre locomotive che tirano quarantaquattro carri, con un peso netto di 2475 tonnellate.

L'ultima situazione, designata Situazione 2.0, è quella che rappresenta la potenzialità della linea a singolo binario, composta dai tre tunnel con il rispettivo binario di precedenza. Si prevede anche un ingrandimento dei raggi delle curve minori a 150m, che significa 7 curve su tutta la linea, e si dispone anche un armamento nuovo su tutta la linea, che possa sopportare i treni più pesanti, di 2475 tonnellate nette trasportate con tre locomotive.

Per ciascuna delle situazioni si dispongono dall'inizio uno schema dell'infrastruttura,

una tabella che descrive i punti caratteristici del tracciato, il materiale rotabile tipo e quello utilizzato per la modellazione, che comporterebbe la massima capacità in quel caso; un riassunto dei risultati più importanti, una approssimazione preliminare dei macrocosti presi da esempi similari già fatti che sono stati apportati da Geodata. L'orario grafico, ritrovato con le premesse suddette, rappresenta la capacità della linea per ciascun scenario.

Per ogni alternativa si mostrano due orari grafici, dove l'unica differenza tra loro è che nel primo il segnalamento viene disposto solo nelle stazioni. Questo in termini pratici, vuol dire che un treno non può essere inserito dietro a un altro che viaggia nella medesima direzione, dovendo aspettare che il primo arrivi alla stazione successiva per poter partire. In altre parole le lunghezze delle sezioni di blocco sono uguali al distanziamento tra le stazioni. Invece nel secondo orario grafico la lunghezza delle sezioni di blocco sono di 5 km circa, fatto con il motivo di osservare l'aumento nella capacità della linea nel caso ci fosse un sistema di segnalamento simile a quello Svizzero, che permette di far viaggiare a più di un treno nella medesima direzione tra due stazioni.

Il peso utile o carico netto del convoglio è il 75% del carico totale che può/possono tirare le locomotive mentre il 25% restante è il peso a vuoto dei carri. Questo è stato fatto considerando tutti i diversi carri che si utilizzano su questa linea.

***La capacità massima viene calcolata come la moltiplicazione del carico netto del convoglio tipo, per il numero di traccie diarie, per 300 giorni annuali.***

## 5.1 Situazione 0:

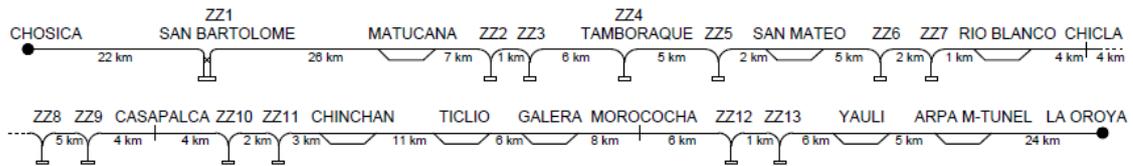


Figura 5.1: Schema Infrastrutturale Situazione 0.

Tabella 5.1: Descrizione del tracciato.

Elemento	P.K.[km]	Lunghezza[m]	Vel. massima[km/h]	
			Up	Down
Chosica	54.0	520	30	20
ZZ1 -S. Bartolomé	76.0	400	30	20
Matucana	102.0	300	30	20
ZZ2	108.8	320	30	20
ZZ3	109.8	500	30	20
ZZ4-Tamboraque	115.7	300	30	20
ZZ5	120.4	300	30	20
San Mateo	122.0	550	30	20
ZZ6	126.9	300	30	20
ZZ7	128.9	300	30	20
Rio Blanco	130.0	320	30	20
Chicla	134.0	300	30	20
ZZ8	137.7	300	30	20
ZZ9	143.0	300	30	20
Casapalca	147.0	300	30	20
ZZ10	151.4	300	30	20
ZZ11	153.3	320	30	20
Chinchán	156.0	300	30	20
Ticlio	167.0	300	30	20
Galera	173.0	550	30	20
Morocochoa	181.0	300	30	20
ZZ12	186.5	320	30	20
ZZ13	187.5	300	30	20
Yauli	193.0	600	30	20
Arpa-Mahr tunel	198.0	600	30	20
La Ororya	222.0	600	30	20

Tabella 5.2: Descrizione Materiale rotabile.

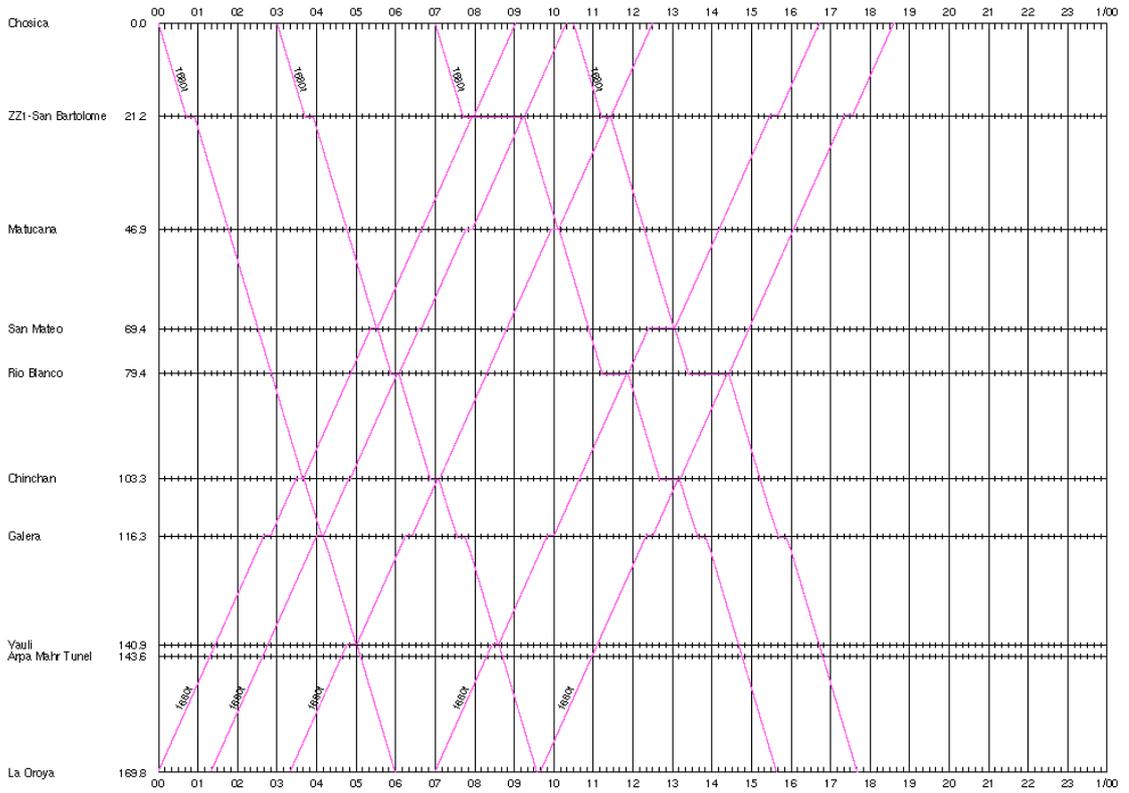
Motrice [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)
N° Vagoni [t]	10 (75)	12 (75)	14 (110)	14 (120)
Capacità utile [t]	563	675	1155	1260

In questo caso si è utilizzato il convoglio composto da due locomotive di 3.0 MW che tirano quattordici carri di 120 t di peso totale.

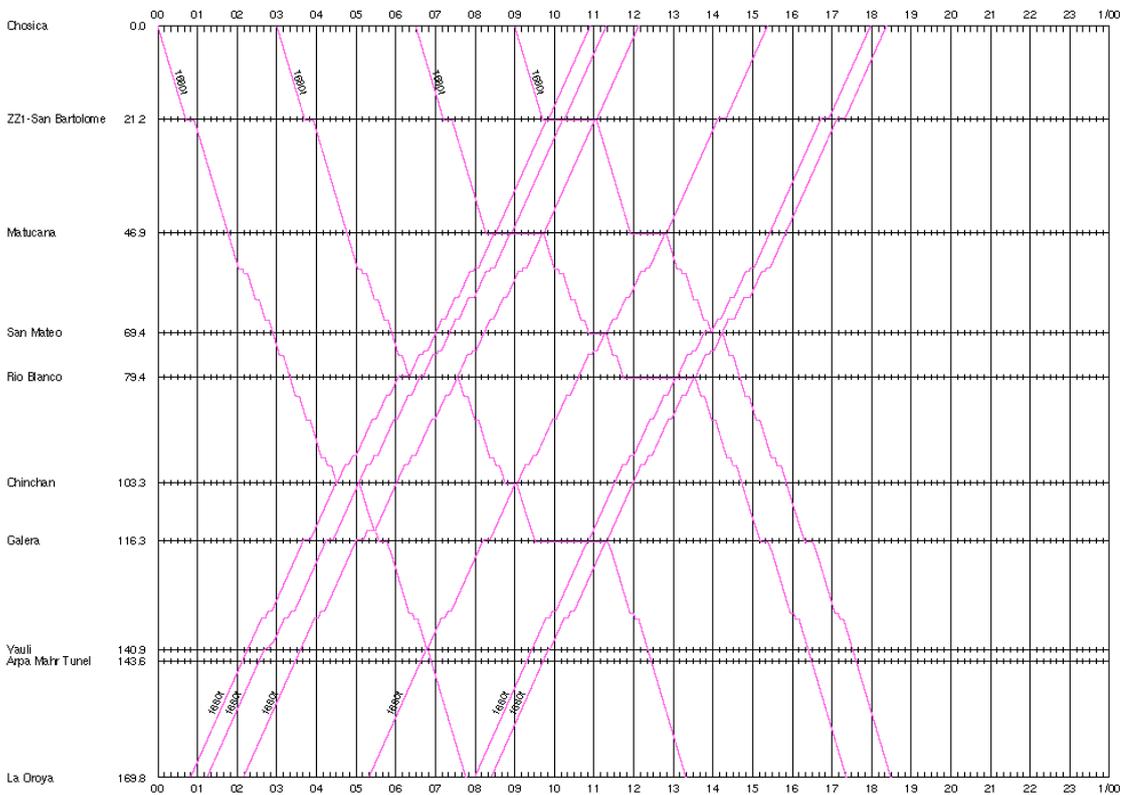
Tabella 5.3: Riasunto Risultati Situazione 0

Capacità massima [t/anno]	Tempo di percorrenza	
	Medio	Minimo
3 780 000	9ore 45min	7ore 06min

Chosica - La Oroya - Situacion 0



Chosica - La Oroya - Situacion 0



## 5.2 Situazione 1.0:

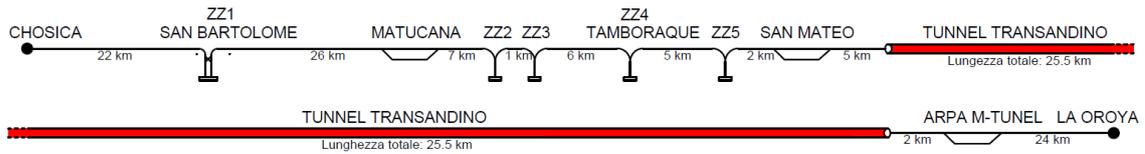


Figura 5.2: Schema Infrastrutturale Situazione 1.0.

Tabella 5.4: Descrizione del tracciato.

Elemento	P.K.[km]	Lunghezza[m]	Vel. massima[km/h]	
			Up	Down
Chosica	54	520	30	20
ZZ1 -San Bartolomé	76	400	30	20
Matucana	102	300	30	20
ZZ2	108.8	320	30	20
ZZ3	109.8	500	30	20
ZZ4-Tamboraque	115.7	300	30	20
ZZ5	120.4	300	30	20
San Mateo	122	550	30	20
T. TRANSANDINO	129.9	25645	70	70
Arpa-Mahr tunel	156	600	30	20
La Ororya	180	600	30	20

Tabella 5.5: Descrizione Materiale rotabile.

Motrice [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)
N° Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	14 (120)	14 (120)
Capacità utile [t]	731	893	1260	1260

In questo caso si è utilizzato il convoglio composto da due locomotive di 3.0 MW che tirano quattordici carri di 120 t di peso totale.

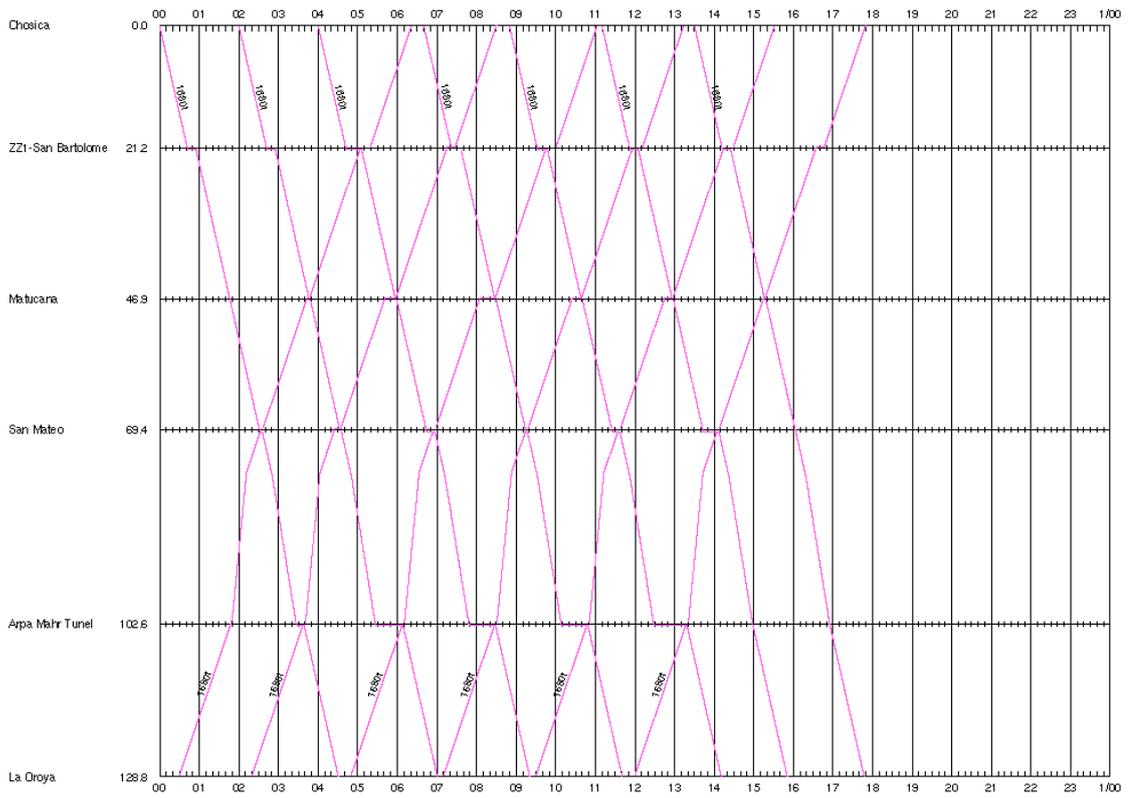
Tabella 5.6: Riasunto Risultati Situazione 1.0

Capacità massima [t/anno]	Tempo di percorrenza	
	Medio	Minimo
4 914 000	5ore 51min	4ore 21min

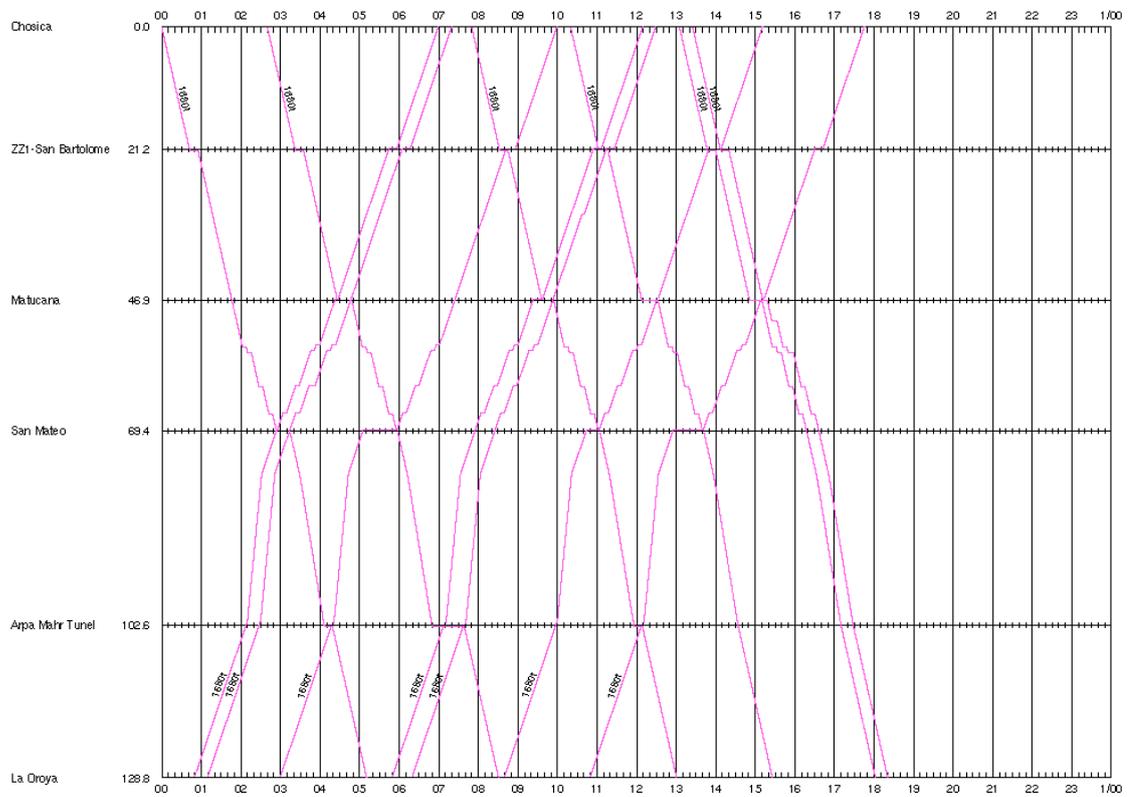
Tabella 5.7: Analisi Costi Situazione 1.0.

Opera	Lunghezza Quantità	Costo Unitario [US\$]	Costo Totale [US\$]
TUNNEL T	25.645 m	25.000,00	641.125.000,00
Segnalamento e Tecnologie	129.400 m	100,00 m	12.940.000,00
Totale [US\$]			654.065.000,00

Chosica - La Oroya - Situacion 1.0



Chosica - La Oroya - Situacion 1.0



## 5.3 Situazione 1.1:

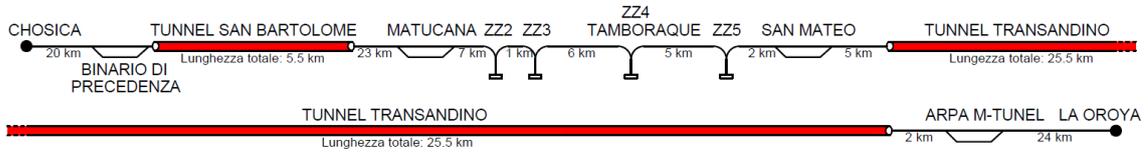


Figura 5.3: Schema Infrastrutturale Situazione 1.1.

Tabella 5.8: Descrizione del tracciato.

Elemento	P.K.[km]	Lunghezza[m]	Vel. massima[km/h]	
			Up	Down
Chosica	54	300	30	20
Binario di Precedenza	20.2	1000	30	20
T. S BARTOLOMÈ	74.1	550	70	70
Matucana	101	320	30	20
ZZ2	107.8	300	30	20
ZZ3	108.8	600	30	20
ZZ4-Tamboraque	114.7	600	30	20
ZZ5	119.4	600	30	20
San Mateo	121	550	30	20
T. TRANSANDINO	128.9	25645	70	70
Arpa-Mahr tunel	155	600	30	20
La Ororya	179	25645	30	20

Tabella 5.9: Descrizione Materiale rotabile.

Motrice [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)
N° Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	14 (120)	14 (120)
Capacità utile [t]	731	893	1260	1260

In questo caso si è utilizzato il convoglio composto da due locomotive di 3.0 MW che tirano quattordici carri di 120 t di peso totale.

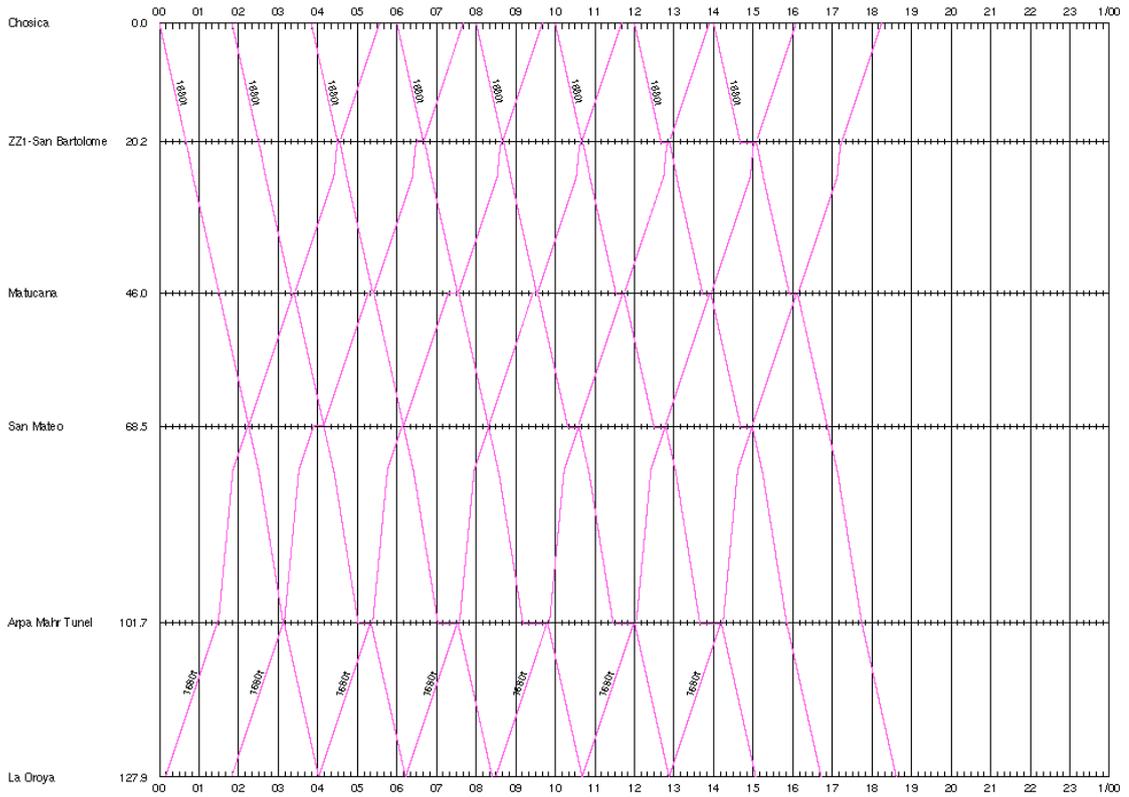
Tabella 5.10: Riasunto Risultati Situazione 1.1

Capacità massima [t/anno]	Tempo di percorrenza	
	Medio	Minimo
5 670 000	5ore 18min	4ore 00min

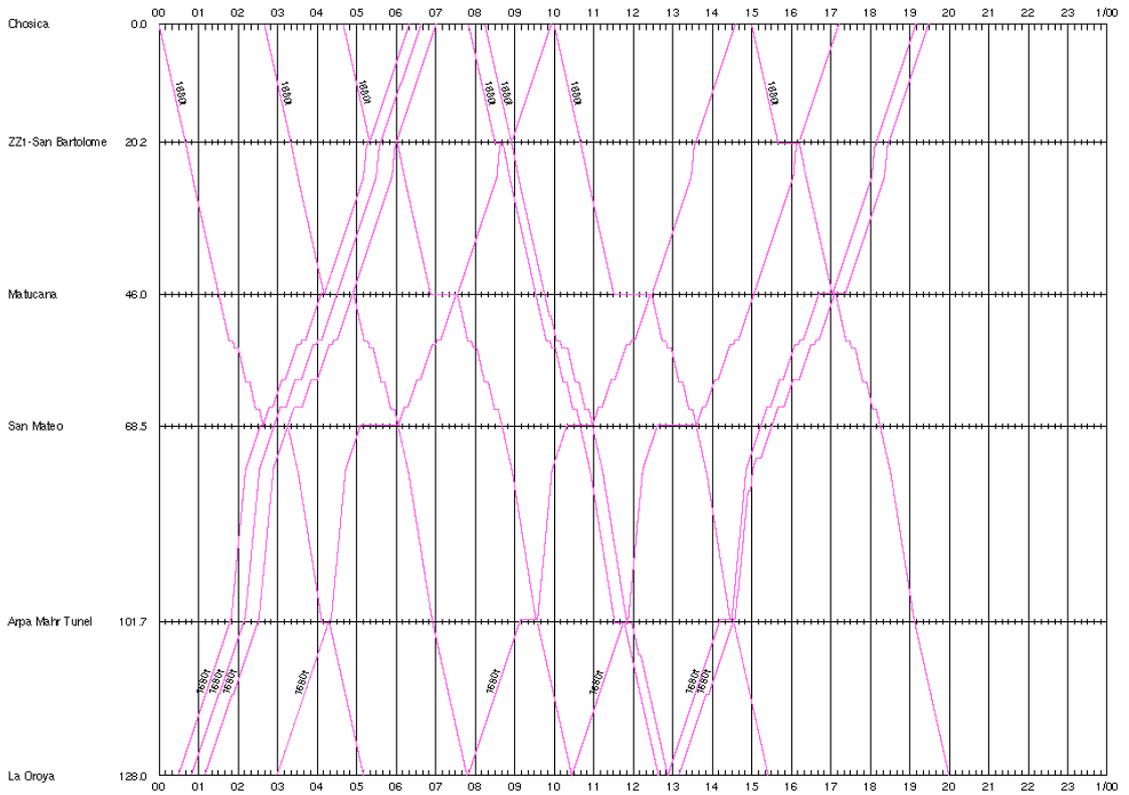
Tabella 5.11: Analisi Costi Situazione 1.1.

Opera	Lunghezza Quantità	Costo Unitario [US\$]	Costo Totale [US\$]
TUNNEL T	25.645 m	25.000,00	641.125.000,00
TUNNEL SB	5.310 m	25.000,00	132.750.000,00
Segnalamento e Tecnologie	128.500 m	100,00 m	12.850.000,00
Binario di Precedenza	850 m	500,00/ml	425.000,00
		Totale [US\$]	787.150.000,00

Chosica - La Oroya - Situazione 1.1



Chosica - La Oroya - Situazione 1.1



## 5.4 Situazione 1.2:



Figura 5.4: Schema Infrastrutturale Situazione 1.2.

Tabella 5.12: Descrizione del tracciato.

Elemento	P.K.[km]	Lunghezza[m]	Vel. massima[km/h]	
			Up	Down
Chosica	54	300	30	20
ZZ1 -San Bartolomé	76	320	30	20
Matucana	102	500	30	20
T. S M DEL VISO	110	156020	70	70
San Mateo	124.1	550	30	20
T. TRANSANDINO	132	25645	70	70
Arpa-Mahr tunel	158.1	600	30	20
La Ororya	182.1	25645	30	20

Tabella 5.13: Descrizione Materiale rotabile.

Motrice [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)
N° Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	14 (120)	14 (120)
Capacità utile [t]	731	893	1260	1260

In questo caso si è utilizzato il convoglio composto da due locomotive di 3.0 MW che tirano quattordici carri di 120 t di peso totale.

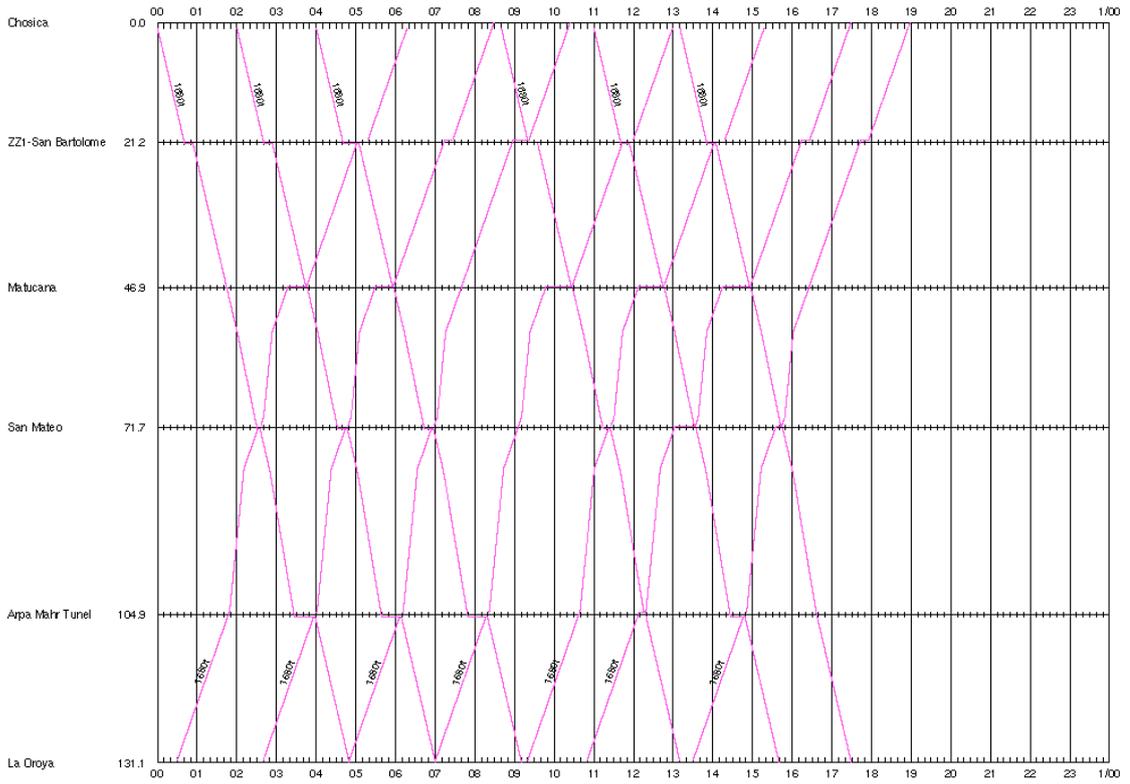
Tabella 5.14: Riasunto Risultati Situazione 1.2

Capacità massima [t/anno]	Tempo di percorrenza	
	Medio	Minimo
5 670 000	5ore 6min	3ore 46min

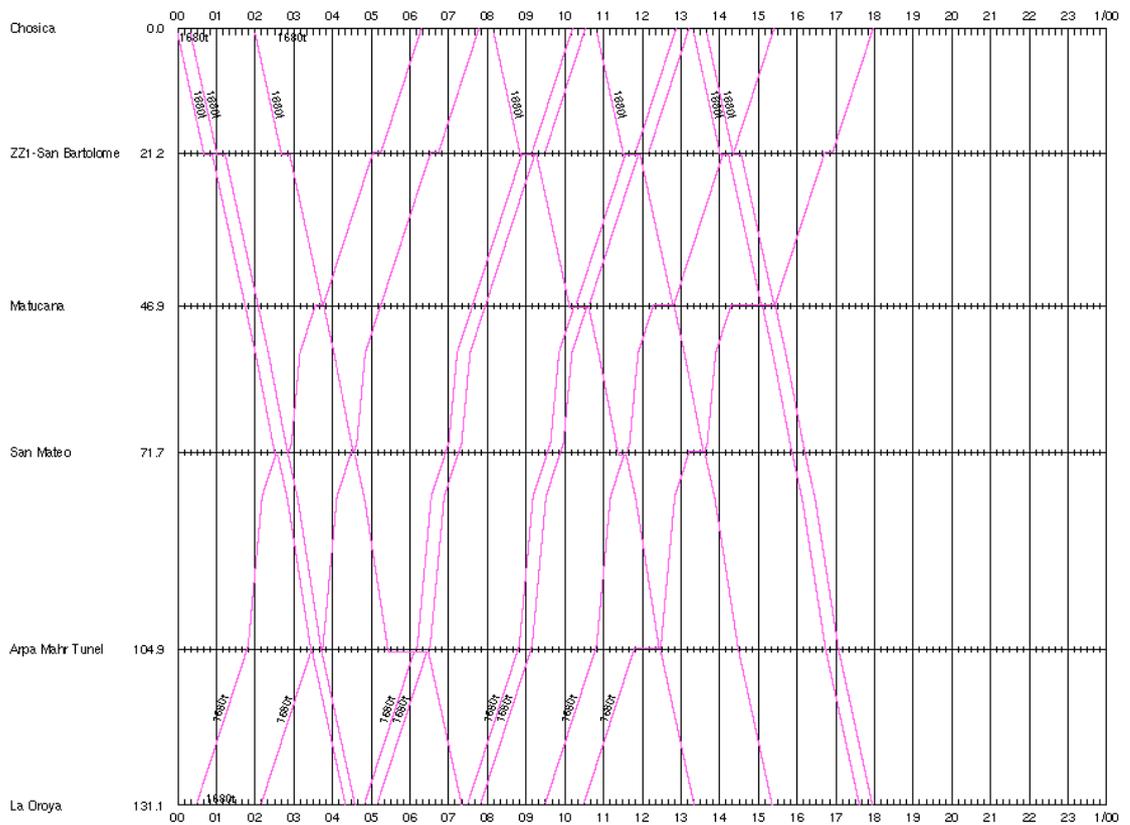
Tabella 5.15: Analisi Costi Situazione 1.2.

Opera	Lunghezza Quantità	Costo Unitario [US\$]	Costo Totale [US\$]
TUNNEL T	25.645 m	25.000,00	641.125.000,00
TUNNEL SMV	15.620 m	25.000,00	390.050.000,00
Segnalamento e Tecnologie	131.600 m	100,00 m	13.160.000,00
Totale [US\$]			1.044.335.000,00

Chosica - La Oroya - Situacion 1.2



Chosica - La Oroya - Situacion 1.2



## 5.5 Situazione 1.3:



Figura 5.5: Schema Infrastrutturale Situazione 1.3.

Tabella 5.16: Descrizione del tracciato.

Elemento	P.K.[km]	Lunghezza[m]	Vel. massima[km/h]	
			Up	Down
Chosica	54	300	30	20
Binario di Precedenza	20.2	1000	30	20
T. S BARTOLOMÈ	74.1	550	70	70
Matucana	101	320	30	20
T. S M DEL VISO	109	156020	70	70
San Mateo	123.1	550	30	20
T. TRANSANDINO	131	25645	70	70
Arpa-Mahr tunnel	157.1	600	30	20
La Ororya	181.1	600	30	20

Tabella 5.17: Descrizione Materiale rotabile - Situazione 1.3

Motrice [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)	3 (2.2)	3 (3.0)
N° Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	28 (75)	33 (75)	36 (75)	44 (75)
Capacità utile [t]	731	893	1575	1856	2025	2475

In questo caso si è utilizzato il convoglio composto da tre locomotive di 3.0 MW che tirano quarantaquattro carri di 75 t di peso totale.

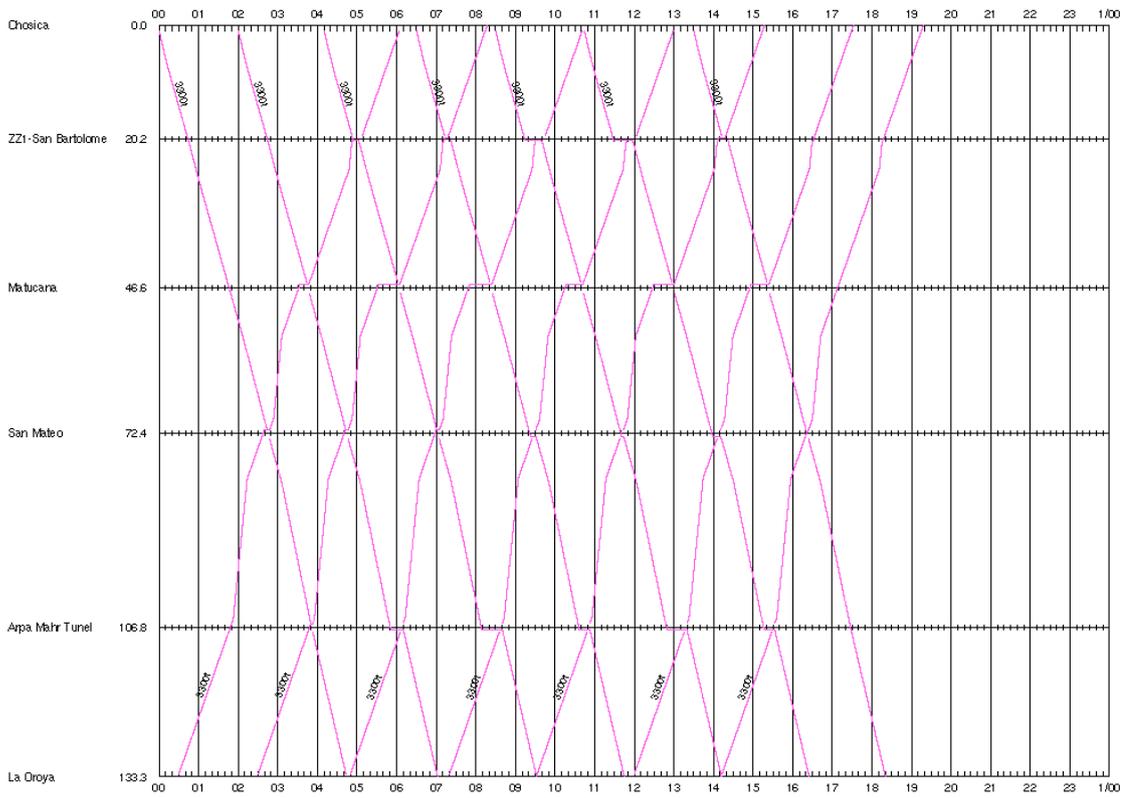
Tabella 5.18: Riasunto Risultati Situazione 1.3

Capacità massima [t/anno]	Tempo di percorrenza	
	Medio	Minimo
11 880 000	5ore 8min	3ore 26min

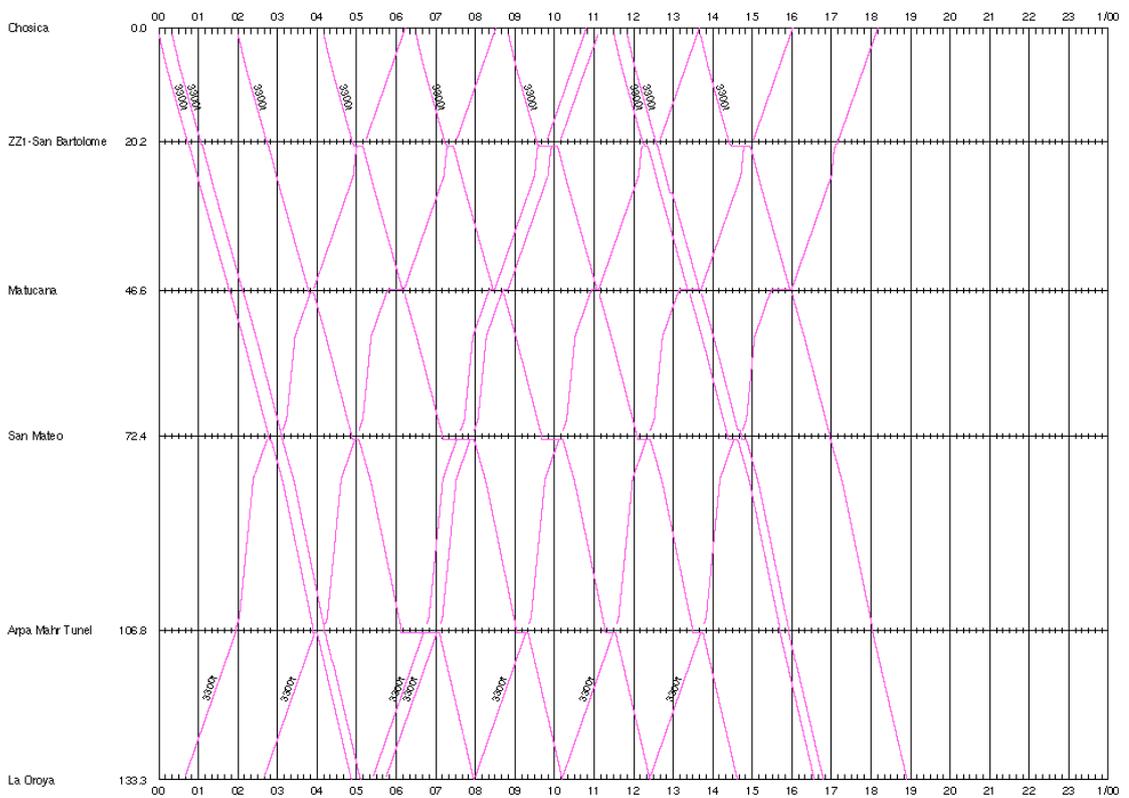
Tabella 5.19: Analisi Costi Situazione 1.3.

Opera	Lunghezza Quantità	Costo Unitario [US\$]	Costo Totale [US\$]
TUNNEL T	25.645 m	25.000,00	641.125.000,00
TUNNEL SMV	15.620 m	25.000,00	390.050.000,00
TUNNEL SB	5.310 m	25.000,00	132.750.000,00
Armamento Nuovo	77.355 m	400,00 ml	30.942.000,00
Segnalamento e Tecnologie	130.800 m	100,00 m	13.080.000,00
Binario di Precedenza	850 m	500,00/ml	425.000,00
		Totale [US\$]	1.208.372.000,00

Chosica - La Oroya - Situazione 1.3



Chosica - La Oroya - Situazione 1.3



## 5.6 Situazione 2.0:



Figura 5.6: Schema Infrastrutturale Situazione 2.0.

Tabella 5.20: Descrizione del tracciato.

Elemento	P.K.[km]	Lunghezza[m]	Vel. massima[km/h]	
			Up	Down
Chosica	54	300	50	50
Binario di Precedenza	20.2	1000	50	50
T. S BARTOLOMÈ	74.1	550	70	70
Matucana	101	320	50	50
T. S M DEL VISO	109	156020	70	70
San Mateo	123.1	550	50	50
T. TRANSANDINO	131	25645	70	70
Arpa-Mahr tunel	157.1	600	50	50
La Ororya	181.1	600	50	50

Tabella 5.21: Materiale rotabile - Situazione 2.0

Motrice [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	1 (3.5)	2 (2.2)	2 (3.0)	2 (3.5)
N° Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	14 (75)	28 (75)	33 (75)	36 (75)
Capacità utile [t]	682.5	833	735	1470	1732.5	2025

Motrice [MW]	3 (2.2)	3 (3.0)	3 (3.5)
N° Vagoni [t]	31 (75)	44 (75)	44 (75)
Capacità utile [t]	1627.5	2475	2475

In questo caso si è utilizzato il convoglio composto da tre locomotive di 3.5 MW che tirano quarantaquattro carri di 75 t di peso totale.

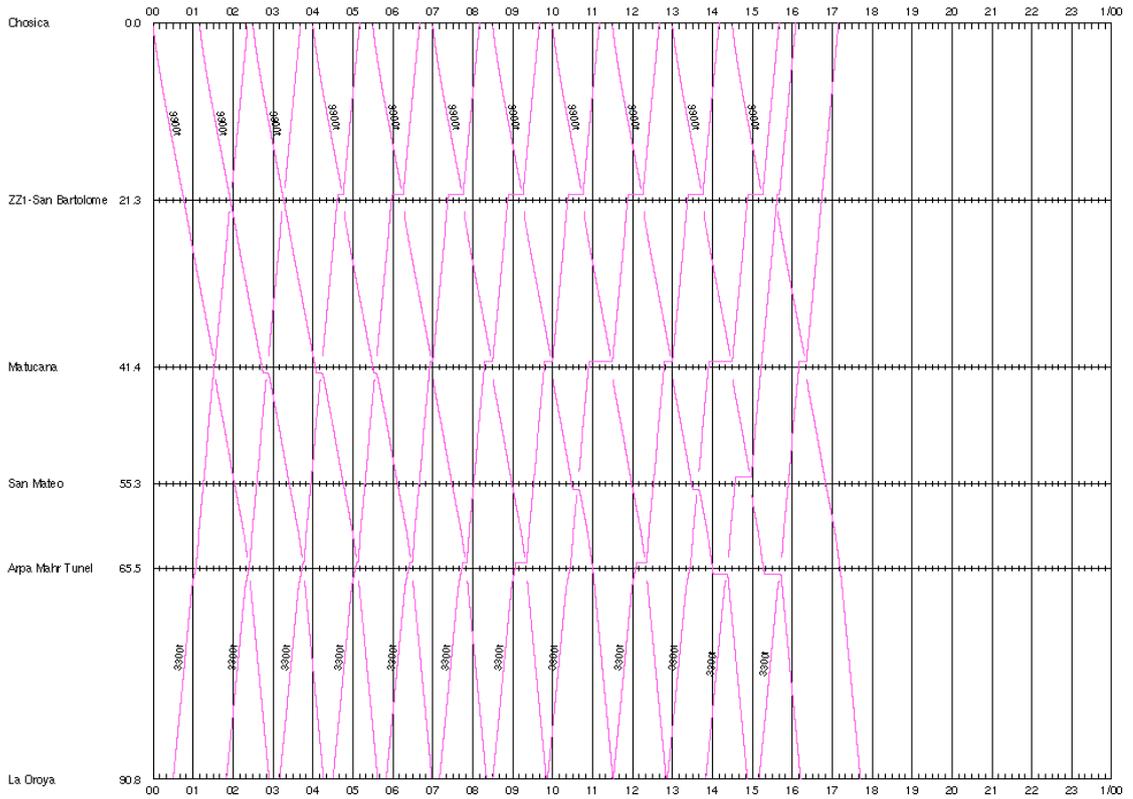
Tabella 5.22: Riasunto Risultati Situazione 2.0

Capacità massima [t/anno]	Tempo di percorrenza	
	Medio	Minimo
20 047 500	2ore 40min	1ora 45min

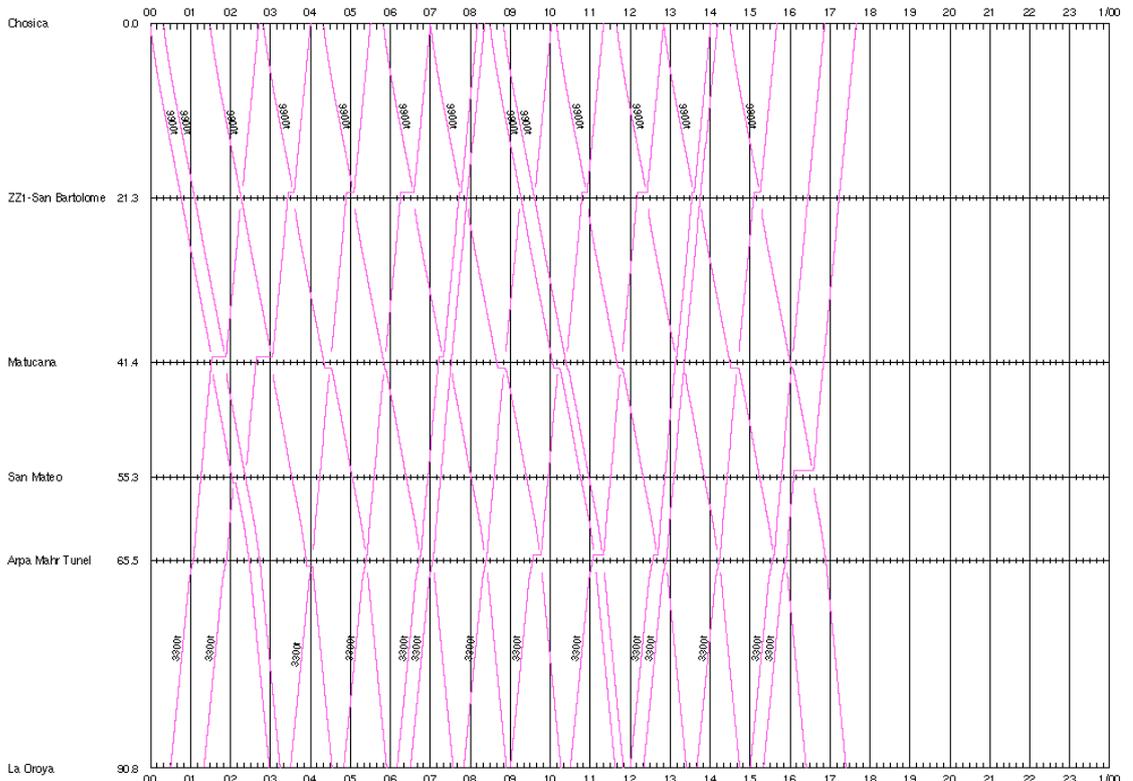
Tabella 5.23: Analisi Costi Situazione 2.0.

Opera	Lunghezza Quantità	Costo Unitario [US\$]	Costo Totale [US\$]
TUNNEL T	25.645 m	25.000,00	641.125.000,00
TUNNEL SMV	15.620 m	25.000,00	390.050.000,00
TUNNEL SB	5.310 m	25.000,00	132.750.000,00
Ampliamento Curve Orizzontali	7 curve 2.150 m	2.500,00 ml	5.375.000,00
Armamento Nuovo	77.355 m	400,00 ml	30.942.000,00
Segnalamento e Tecnologie	133.200 m	100,00 m	13.320.000,00
Binario di Precedenza	850 m	500,00/ml	425.000,00
		Totale [US\$]	1.214.437.000,00

Chosica - La Oroya - Situazione 2.0



Chosica - La Oroya - Situazione 2.0



# Capitolo 6

## Analisi dei risultati

In questa parte si disporranno i risultati ritrovati nel capitolo precedente in maniera sintetica, in modo da poter apprezzare le variazioni della capacità, dei costi e dei tempi di percorrenza medi tra le diverse situazioni infrastrutturali.

### 6.1 Capacità

In questo primo grafico a barre (Figura 6.1), ci sono due classi, la prima più scura, collocata dietro è il gruppo delle situazioni che comporterebbe un segnalamento simile a quello Svizzero, con distanza tra i segnali di cinque chilometri circa; invece il gruppo di situazioni più chiaro è quello dove non si distinguerebbe nessun tipo di segnalamento tra le stazioni, facendo sì che possa solo esserci un treno a la volta tra due stazioni.

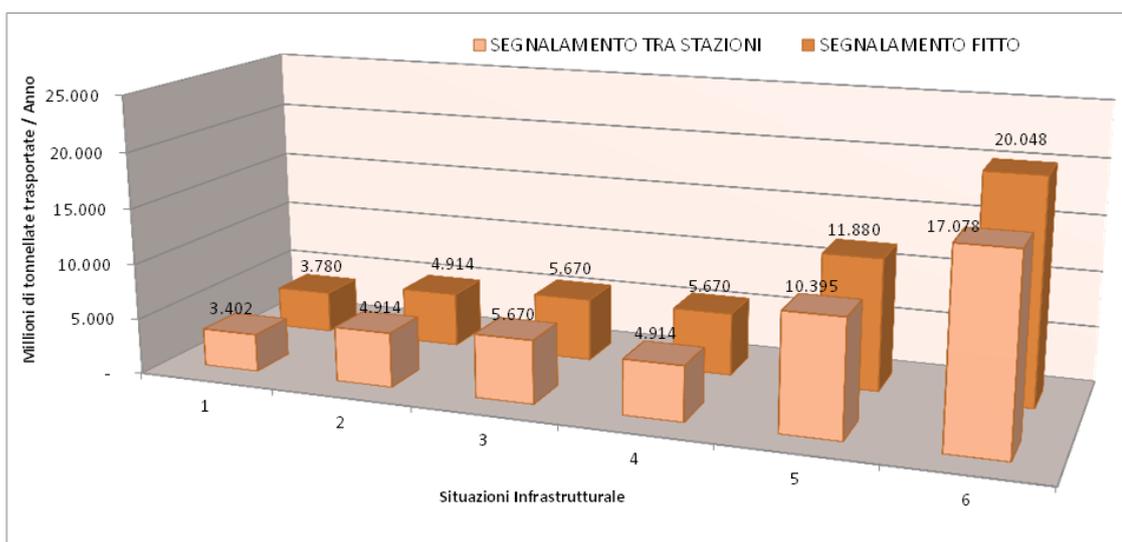


Figura 6.1: Valori di Capacità delle diverse situazione con segnalamento fitto (dietro) e segnalamento tra le stazioni (avanti).

Questo grafico può essere letto sia trasversalmente che longitudinalmente, cioè le stesse situazioni con diversa configurazione di segnalamento; oppure le diverse situazioni con una configurazione di segnalamento stabilita. Trasversalmente si può osservare che nelle prime situazioni, cioè nella fase costruttiva

prima che si mettano in funzionamento tutte e tre le gallerie, avere un segnalamento con blocchi fissi lunghi 5 km non aggiunge nessun tipo di beneficio. Però una volta messi in servizio tutte le gallerie (situazione 1.3) si percepisce un incremento della capacità del 10% circa. Nell'ultima situazione, dove la linea è stata rettificata e si è alzata la velocità massima di percorrenza, il sistema di segnalamento fitto beneficia invece di un 15% circa.

Longitudinalmente, per il gruppo col sistema di segnalamento ridotto, si vede poco incremento della capacità al costruire un solo tunnel; nel caso in cui si riesca a metterne in servizio due, c'è un aumento del 33%. Ma la gran differenza nell'aumento della capacità avviene quando si possono utilizzare tutte e tre insieme. Ciò moltiplica la capacità più di tre volte perché non ci saranno più i zig-zag che limitavano la lunghezza dei convogli e quindi la capacità. Infine, un ulteriore incremento si ottiene all'aumentare della velocità massima di percorrenza nella situazione 2.0, la quale quasi raddoppia i valori della situazione 1.3, facendo arrivare la capacità a 20.05 milioni di tonnellate trasportate ogni anno.

## 6.2 Costi e tempi di percorrenza

In questo secondo grafico, è possibile vedere una prima approssimazione dei costi in blu, i tempi medi di percorrenza degli orari grafici in rosso e in verde i tempi di percorrenza minimo. Le tre categorie sono con un segnalamento fitto, perché l'influenza del tipo di segnalamento su questi risultati essendo praticamente nulla, si è deciso di prendere quelli più elevati, così che le conclusioni siano conservative.

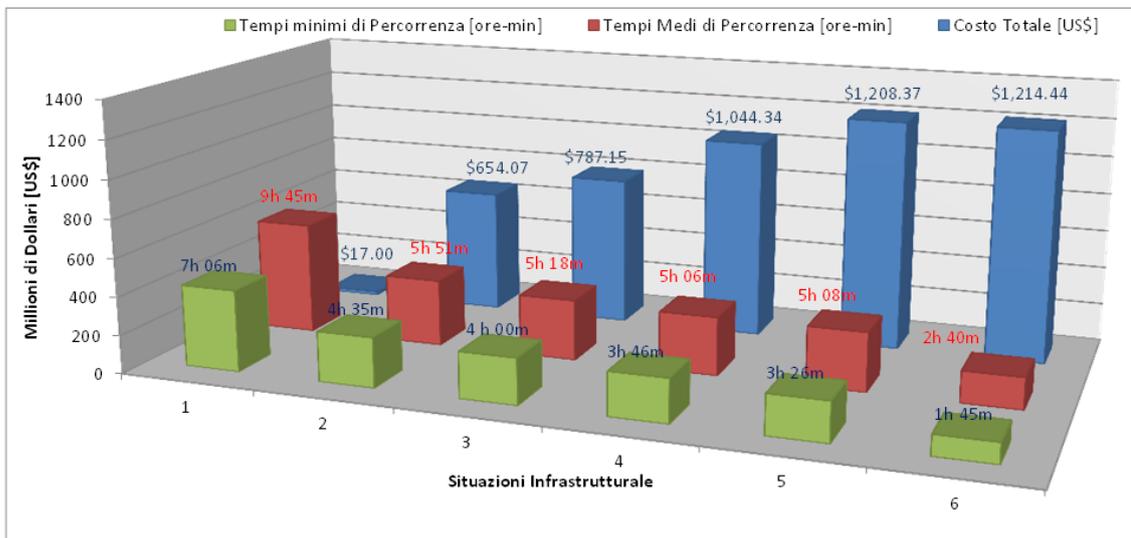


Figura 6.2: Costi preliminari delle situazioni e tempi di percorrenza.

Per il gruppo dei costi, la situazione che simula quella attuale prevede il sistema di segnalamento, mentre nella situazione successiva si prevede che il tunnel transandino abbia un costo di 650 milioni di dollari e il costo delle seguenti situazioni cresca in modo lineare fino ad arrivare ad un costo di 1.208 milioni nella situazione con le tre gallerie. La situazione più lontana nel tempo con velocità di percorrenza considerevole non dista praticamente nulla di quella precedente. Per quanto riguarda i tempi, nella situazione successiva a quella attuale si osserva

un notevole risparmio di più di quattro ore per i tempi medi e due ore e mezza circa per i tempi minimi soltanto col tunnel transandino, perché si toglie il tratto con pendenza più elevata che fa scendere la velocità di percorrenza dei convogli e accorcia di 40 km circa il percorso; nell'aggiungere un secondo tunnel oppure i due restanti, si diminuisce di 40 minuti indicativamente, indipendente da quale sia perché la sua lunghezza è simile a quella che percorrerebbero i treni in superficie sulle vie esistenti. La seconda e significativa riduzione si avrà dopo che si sarà rettificata la linea per poter alzare la velocità di percorrenza, dove i treni potrebbero impiegare circa 2 ore e 40 minuti per andare tra due capostazione; oppure 1 ora e 45 minuti nel caso che si percorra la tratta a velocità massima.

### 6.3 Domanda vs. Capacità

Nella seguente tabella è possibile osservare i risultati di domanda calcolati da un consulente peruviano nella fase di prefattibilità del progetto con diversi scenari in funzione dell'incertezza e i suoi rispettivi orizzonti temporali. La prima colonna di valori rappresenta la domanda attuale sulla linea; la seconda dopo aver inaugurato il progetto nella sua completezza mentre la terza l'anno dopo ove si apprezza un incremento notevole. L'ultima rappresenta la domanda nell'orizzonte del progetto previsto di 40 anni. Prima dell'inaugurazione dell'opera si prevede che la domanda cresca di un tasso del 1% circa, mentre che una volta a pieno funzionamento si prevede un tasso di acquisizione di domanda del 4,2% fino al suo orizzonte temporale di 40 anni.

Tabella 6.1: Domanda attuale e progettata [ton/annue].

Scenario / Anno	Presente	2024	2025	2055
Sin Progetto	1,927,001	2,045,550	2,066,006	2,704,664
Scenario Pessimista	1,927,001	2,045,550	6,257,575	12,666,506
Scenario Neutro	1,927,001	2,045,550	6,597,730	16,658,101
Scenario Ottimista	1,927,001	2,045,550	6,758,994	18,908,971

Si può vedere che la domanda è leggermente minore dalla capacità della linea progettata, ovvero la capacità supera la domanda di un 5,7%. Questo margine risulta insufficiente per continuare a gestire l'aumento della domanda dopo il limite di 40 anni per il quale si prevede l'opera.

# Capitolo 7

## Conclusioni

In conclusione, emergono tre problemi principali su questa linea: L'elevata pendenza longitudinale nel tratto di maggior altitudine, la presenza di un gran numero di anse a zig-zag e la bassa velocità di percorrenza imposta per probabilità di svio. Per i due primi è possibile dire che con la costruzione dei tre tunnel non saranno più utilizzate le anse e la pendenza longitudinale scende notevolmente; invece per alzare la velocità di percorrenza si deve modificare i ranghi di circolazione.

Per queste ragioni le conclusioni saranno di due tipi, le prime riguardante all'opera in sé, la cronologia degli interventi e il contesto del progetto. Le seconde, invece, riguarderanno più l'aspetto di esercizio sulla linea.

Circa la cronologia dei miglioramenti infrastrutturali, considerando i costi e le acquisizione di capacità; si consiglia il seguente ordine degli interventi:

1. realizzare il Tunnel Transandino per avere un'importanza vitale nel progetto essendo il cuore di esso;
2. realizzare il tunnel di San Bartolomé e il suo rispettivo binario di precedenza perché comporta l'esteso guadagno di capacità che il tunnel di San Miguel del Viso, ma con un costo molto più ridotto per essere un terzo circa della sua lunghezza;
3. realizzare il tunnel di San Miguel del Viso per togliere i Zig-Zags rimanenti, e piazzamento del nuovo armamento per poter far convogli più lunghi che comporta un raddoppio della capacità.

Come conclusione sul progetto e il suo contesto, in relazione cioè alla domanda sull'infrastruttura, le conclusioni sono:

- si sarebbe dovuto prevedere da molto tempo questa situazione, in modo tale che l'opera fosse in questo momento completamente funzionante;
- per soddisfare la gran domanda che potrebbe acquisire potenzialmente l'infrastruttura non è sufficiente una linea a binario singolo, ma è necessaria una linea tutta a doppio binario. Essa molto probabilmente diventerebbe dal punto di vista economico tuttavia non conveniente, per i forti condizionamenti geografici e orografici che fanno elevare i costi di costruzione.

Riguardante alla modalità di esercizio, in una linea a singolo binario, non solo è di massima importanza avere al più equidistanti possibile i binari di precedenza oppure le stazioni con motivo di fare incrociare treni con diversi senso di marcia, ma anche di mantenere una velocità di percorrenza lo sufficientemente alta per ridurre i tempi di viaggi, ed è non tanto importante il sistema di segnalamento fitto che permette di inserire più treni, uno dietro l'altro, tra due punti di sosta col stesso itinerario. Sul primo aspetto degli incroci, questa linea presenta i punti distanziati ogni 20-30 km, la quale è ottima per il suo contesto di alta quota, ma nel caso che non si mettesse il binario di precedenza prima del tunnel di San Bartolomé, la linea verrebbe penalizzata tra 10 e 20% rispetto ad avere la possibilità d'incrociare treni con diversi senso di marcia all'imbocco sud della galleria.

Rispetto ai ranghi di esercizio, si vede chiaramente nei risultati tra le due ultime situazioni come s'incrementa la capacità della linea di circa 70% all'aumentare la velocità di esercizio, ciò significa in questo caso, rettificare le curve e avere la sopraelevazione necessaria e il armamento nelle condizioni giuste.

Come conclusione personale, sento che mi ha servito molto mettermi dentro di un caso reale di realizzazione pratica; sia per l'applicazione pratica dei concetti e delle conoscenze acquisita all'interno del percorso accademico, che per approfondire come possono influenzare diversi aspetti, come ad esempio gli incroci, ranghi di velocità, pendenze, ecc, a una linea ferroviaria a singolo binario ed alla sua capacità.

# Appendice A

In questo apparato si fanno vedere per ciascuna delle situazioni infrastrutturali definite e studiate anteriormente i tempi di percorrenza dei diversi convogli configurati per trovare il più conveniente in modo di calcolare la capacità della linea.

## Situazione 0

Locomotive [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)
N° di Vagoni [t]	10 (75)	12 (75)	14 (110)	14 (120)
Capacità lorda treno [t]	750	900	1540	1680
Tempo Andata [h:m]	8:14	7:29	8:20	7:18
Tempo Ritorno [h:m]	9:54	9:54	9:54	9:54
Velocità Com Andata	20.6	22.7	20.4	23.3
Velocità Com Ritorno	17.2	17.2	17.2	17.2

## Situazione 1.0

Locomotive [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)
Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	14 (120)	14 (120)
Capacità treno [t]	975	1190	1680	1680
Tempo Andata [h:m]	6:30	5:56	5:44	4:39
Tempo Ritorno [h:m]	6:04	6:04	6:04	6:04
Velocità Com Andata	19.9	21.8	22.6	27.8
Velocità Com Ritorno	21.3	21.3	21.3	21.3

## Situazione 1.1

Locomotive [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)
Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	14 (120)	14 (120)
Capacità treno [t]	975	1190	1680	1680
Tempo Andata [h:m]	6:10	5:35	5:28	4:23
Tempo Ritorno [h:m]	5:40	5:40	5:40	5:40
Velocità Com Andata	20.8	23.0	23.5	29.3
Velocità Com Ritorno	22.7	22.7	22.7	22.7

## Situazione 1.2

Locomotive [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)
Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	14 (120)	14 (120)
Capacità treno [t]	975	1190	1680	1680
Tempo Andata [h:m]	6:01	5:10	5:23	4:16
Tempo Ritorno [h:m]	5:18	5:18	5:18	5:18
Velocità Com Andata	21.9	25.5	24.4	30.8
Velocità Com Ritorno	24.8	24.8	24.8	24.8

## Situazione 1.3

Locomotive [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	2 (2.2)	2 (3.0)	3 (2.2)	3 (3.0)
Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	28 (75)	33 (75)	36 (75)	44 (75)
Capacità treno [t]	975	1190	2100	2475	2700	3300
Tempo Andata [h:m]	5:42	4:58	7:00	5:35	4:39	4:56
Tempo Ritorno [h:m]	4:52	4:52	4:52	4:52	5:52	5:52
Velocità Com Andata	24.2	26.3	18.7	23.4	28.1	26.5
Velocità Com Ritorno	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9

## Situazione 2.0

Locomotive [MW]	1 (2.2)	1 (3.0)	1 (3.5)	2 (2.2)	2 (3.0)	2 (3.5)
Vagoni [t]	13 (75)	14 (85)	14 (75)	28 (75)	33 (75)	36 (75)
Capacità treno [t]	975	1190	1050	2100	2475	2700
Tempo Andata [h:m]	3:43	3:11	2:33	4:40	3:40	3:26
Tempo Ritorno [h:m]	1:51	1:51	1:49	1:52	1:52	1:52
Velocità Com Andata	35.2	41.1	51.3	28.0	35.7	38.1
Velocità Com Ritorno	70.7	70.7	72.0	70.1	70.1	70.1

Locomotive [MW]	3 (2.2)	3 (3.0)	3 (3.5)
Vagoni [t]	41 (75)	44 (75)	44 (75)
Capacità treno [t]	3075	3300	3300
Tempo Andata [h:m]	3:30	2:58	2:43
Tempo Ritorno [h:m]	1:51	1:51	1:51
Velocità Com Andata	37.4	44.1	48.1
Velocità Com Ritorno	70.7	70.7	70.7

# Bibliografia

- [1] IIRSA, Iniziativa para la Integracion Regional Sud Americana, <http://www.iirsa.org/>
- [2] Analisis Integral de la Logística en el Perú. 5 Cadenas de Exportación. [http://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/comercio\\_exterior/facilitacion\\_comercio\\_exterior/Analisis\\_Integral\\_Logistica\\_Peru.pdf](http://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/comercio_exterior/facilitacion_comercio_exterior/Analisis_Integral_Logistica_Peru.pdf), Aprile, 2016
- [3] Google Accademico, <https://scholar.google.com/>
- [4] Scopus, <https://www.scopus.com/>
- [5] Pico, Politecnico di Torino, <http://pico.polito.it/>
- [6] Aguilar, Ingrid Calixto. *"El descongestionamiento de la Carretera Central."* Civilizate 5: 60-62.
- [7] Zegarra, Luis Felipe. *"Railroads in Peru: How Important Were They? // Ferrocarriles en el Perú: ¿Qué tan importantes fueron?"*, Desarrollo y Sociedad, II Semestre 2011: 213-259.
- [8] Nikos Kavoori, blog digitale, <http://railscapestravel.com/2017/07/01/to-the-top-of-the-world-by-locomotive/>
- [9] COVIELLO, Dott Ing Nicola, Bruno DALLA CHIARA, and Stefano RICCI. *"Generazione automatica di orari ed applicazioni di algoritmi di programmazione per lo studio di capacità e perturbazioni di linee ferroviarie Scheduling algorithms for rail operations and the automatic generation of timetables: application."* Ingegneria Ferroviaria 787 (2015): 10.
- [10] COVIELLO, Dott Ing Nicola, Bruno DALLA CHIARA, and Eng Bo-Lennart NELLDAL. *"Un modello valutativo della potenzialità di linee a singolo binario: influenza del sistema di segnalamento ed applicazione alla ferrovia trans-mongolica An assessment model of the single-track line carrying capacity: influence of the signalling system and application."* INGEGNERIA FERROVIARIA 627 (2014): 7-8.
- [11] Di Mino, Gaetano. *"Le vibrazioni in campo ferroviario: analisi FEM dell'interazione convoglio-sovrastuttura-terreno."* XIII Convegno SIIV Strade, ferrovie ed aeroporti. Università di Padova, 2003.
- [12] Chiocchia, Gianfranco, et al. *"Impatto acustico di una linea ferroviaria ad alta capacità in una valle alpina: il caso della bassa Val di Susa."*

- [13] Ferrocarril del Centro, *[http://www.mtc.gob.pe/transportes/concesiones/ferrovias/ferrocarril\\_centro.html](http://www.mtc.gob.pe/transportes/concesiones/ferrovias/ferrocarril_centro.html)*
- [14] FCCA, Ferrocarril Central Andino, *[http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrocarril\\_Central\\_Andino](http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrocarril_Central_Andino)*
- [15] Blacksmith Institute, *The Top Ten of The Dirty Thirty*, New York, 1 ed., Settembre 2007
- [16] OpenTrack, Software di modellazione ferroviaria, *<http://www.opentrack.ch/>*