

# 2018

## Storico Valico del Frejus e Tunnel di Base del Moncenisio a confronto: le credenze Notav di fronte ai fatti reali



Mauro Olivero Pistoletto

# **PARTE PRIMA**

## **PREMESSA**

## 1.1 ► Scopo dell'elaborato

Lo scopo di questo elaborato è comparare la **tratta di Valico del Frejus** e il **tunnel di Base del Moncenisio** dal punto di vista dei **treni reali** che li percorrono, o li percorreranno, tenendo conto delle **diversità d'infrastruttura**. Nell'ottica della **massima trasparenza** saranno esposti anche i **calcoli** e le **metodologie** seguite. In altre parole tutti i **numeri** o **concetti** prodotti saranno **giustificati** e **supportati** da una **base matematica**.

► Si vaglieranno quindi:

- le differenze di **sfuerzo di trazione** che hanno influenza sulla **capacità di traino**,
- le **differenze energetiche**, sia in trazione sia in frenatura elettrodinamica a recupero di corrente, che hanno influenza sul **bilancio totale dei consumi**,
- le **differenze** tra i **tre differenti sistemi di alimentazione elettrica**,  $1,5 kV_{cc}$  e  $3 kV_{cc}$  da un lato e  $2x25 kV_{ca}$   $50 Hz$  dall'altro, che hanno influenza sui **rendimenti di sistema**,
- le **differenze di frenatura**, sia **pneumatica** sia **elettrodinamica**, che hanno influenza sulla **velocità massima in discesa** e quindi **sul divario** rispetto alla velocità di **salita**.

► In seguito, come naturale conseguenza delle analisi precedenti, saranno analizzate affermazioni o credenze NoTav che circolano da tempo, quali:

- la **quantità di locomotive** necessarie per trainare i futuri treni previsti nel tunnel di Base del Moncenisio,
- la **proposta d'utilizzo dei Supercondensatori** per l'accumulo di energia sulla tratta di Valico del Frejus,
- il **passaggio da Ventimiglia** come **alternativa** alla tratta di Valico del Frejus,
- lo studio di **Mirco Federici**,
- la **retorica del "Supertreno"** sulla linea storica,
- quanto **energeticamente** si può **effettivamente recuperare** in fase di **frenatura elettrodinamica** in una tratta di valico.

## 1.2 ► La struttura dell'elaborato

L'elaborato è **strutturato** seguendo un **filo logico** in cui la parte **precedente** fornisce le **necessarie informazioni** per la comprensione di quella **successiva**.

Quindi:

- **parte prima:** la premessa indicante "*lo scopo e la strutturazione*" del presente documento,
- **parte seconda:** si gettano le basi fisiche che regolano la trazione ferroviaria introducendo le "*forze resistenti*", in altre parole quelle forze che si oppongono al moto di un treno,
- **parte terza:** è affrontata la "*caratteristica meccanica di trazione e frenatura elettrodinamica*" di una locomotiva, in altre parole la capacità di vincere le forze resistenti per mettere in moto il treno tramite la trazione o, eventualmente, rallentarlo per mezzo della frenatura elettrodinamica,
- **parte quarta:** si analizzano i "*parametri principali*" di una locomotiva evidenziando come influenzino la capacità di traino e la velocità massima,
- **parte quinta:** con l'analisi di "*potenza ed energia*" si comprende il ruolo che assumono nella trazione e frenatura elettrodinamica di un treno,
- **parte sesta:** si affronta il "*rendimento di sistema*", in altre parole le perdite che si hanno in fase di trazione e frenatura elettrodinamica a partire dalla linea elettrica primaria Terna fino a giungere alla potenza sviluppata dalla locomotiva al cerchione (e viceversa). Il tutto avviene tenendo in debito conto i differenti sistemi di alimentazione elettrica ferroviaria della tratta di Valico del Frejus e del tunnel di Base del Moncenisio,
- **parte settima:** utilizzando le conclusioni delle parti precedenti, si confronta la tratta di Valico del Frejus con il tunnel di Base del Moncenisio rispetto alla "*resistenza globale alla trazione, alle differenze energetiche e alla frenatura*" (sia elettrodinamica, sia pneumatica),
- **parte ottava:** qui ci si occupa delle "*affermazioni e credenze NoTav*" inerenti il contesto di questo studio e che da anni sono propagandate senza che, da quel che mi risulta, siano mai state seriamente vagliate per verificarne i fondamenti e l'attualità. Riassumendole: quante locomotive sono realmente necessarie per trainare i futuri treni previsti nel tunnel di Base del Moncenisio, la questione dei Supercondensatori per l'accumulo di energia sulla tratta di Valico del Frejus, il passaggio da Ventimiglia come alternativa alla tratta di Valico del Frejus, il mito di Federici, la retorica del "Supertreno" sulla tratta di Valico del Frejus ed infine la questione del rendimento della frenatura elettrodinamica.

Al termine di ogni punto vi è un riquadro **sintetico** delle **conclusioni**.

**Tutto lo studio è stato sviluppato prendendo in considerazione esclusivamente la tratta di Valico del Frejus e del tunnel di Base del Moncenisio. Nessuna considerazione è quindi frutto di altri contesti estranei alle suddette linee.**

## **PARTE SECONDA**

### **LE FORZE RESISTENTI**

## 2.1 ► La condotta di un treno con locomotiva a trazione elettronica.

La **condotta** di un **treno** con locomotiva a **trazione elettronica** avviene in **modo** sostanzialmente **diverso** dai comuni **mezzi stradali** (i vecchi locomotori a reostato qui non sono presi in considerazione perché ormai quasi tutti radiati e comunque non interessano la tratta di "**Valico della Linea Storica**" - d'ora in poi denominata semplicemente "**tratta di Valico del Frejus**"). Prendere atto di queste **procedure operative**, che saranno meglio descritte successivamente, è fondamentale per la comprensione di quanto esposto.

Quindi:

- **treno fermo:** non vi è alcun assorbimento di corrente nel circuito di trazione. Il solo consumo è dovuto ai servizi ausiliari: elettronica di comando/controllo della trazione, compressori dell'aria per garantire la frenatura/sfrenatura del treno e, nel caso di un convoglio viaggiatori, anche la corrente per le carrozze (luci, riscaldamento, condizionamento ecc.). L'assorbimento dei servizi ausiliari, ineliminabile, sarà dato per scontato nei punti successivi e va inteso in sovrapposizione a quanto già accade nel circuito di trazione,
- **treno in accelerazione:** avviene assorbimento di corrente dalla linea, ad opera del circuito di trazione, per raggiungere la velocità massima,
- **treno alla velocità massima prevista:** se la locomotiva è in marcia automatica, rimane solo un residuo assorbimento di corrente per compensare la resistenza alla trazione del materiale rotabile, se in marcia manuale il macchinista comanda la fine trazione e in convoglio entra in fase di *coasting* (il treno viaggia per inerzia perdendo più o meno rapidamente velocità). La differenza tra la marcia automatica e quella manuale è che, nel primo caso, una volta impostata la velocità massima la macchina automaticamente regola la corrente di trazione fino al suo raggiungimento dopo di che provvede al mantenimento. Qualora tale velocità fosse superata, ricorrerà all'inserimento della frenatura elettrodinamica per rientrare nuovamente nel valore prefissato. Nel secondo caso è invece il macchinista a eseguire manualmente tutte le operazioni per portare il treno alla velocità prefissata e mantenervelo. Salvo casi particolari, normalmente si utilizza la marcia automatica regolando di volta in volta, invece della corrente, la velocità massima permessa dalle varie tratte di linea, considerate anche le caratteristiche tecniche del treno.
- **treno in fase di fermata:** il macchinista attiva il freno pneumatico per la fermata e, se presente, automaticamente (sopra a una certa velocità) si attiva in sovrapposizione a esso anche la frenatura elettrodinamica. Quest'ultima può essere comandata anche autonomamente. Salvo casi particolari, la frenatura elettrodinamica è generalmente meno efficace di quella pneumatica.

Nel caso abbastanza comune dove il treno **non** proceda in **rettilineo** e in **piano**, agiranno anche altre **forze** sul convoglio. Per garantire dunque la **velocità massima**

si avranno assorbimenti di corrente **aggiuntivi** nelle tratte in **salita** e nelle **curve**, mentre si dovrà **frenare** nelle tratte in **discesa**. In quest'ultimo caso la **frenatura elettrodinamica** permette, entro certi limiti, di **contenere** il treno **senza** dover ricorrere a quella **pneumatica**.

## 2.2 ► Le forze resistenti alla trazione

Le **forze** che si **oppongono** al **movimento** dei **rotabili** sono dovute a una serie di **resistenze** riconducibili in:

- A) quelle dovute unicamente **all'avanzamento**,
- B) quelle dovute alle **condizioni della linea**,
- C) quelle dovute **all'inerzia**.

Le prime due sono a loro volta composte da più resistenze di natura diversa (*da 1 a 6*).

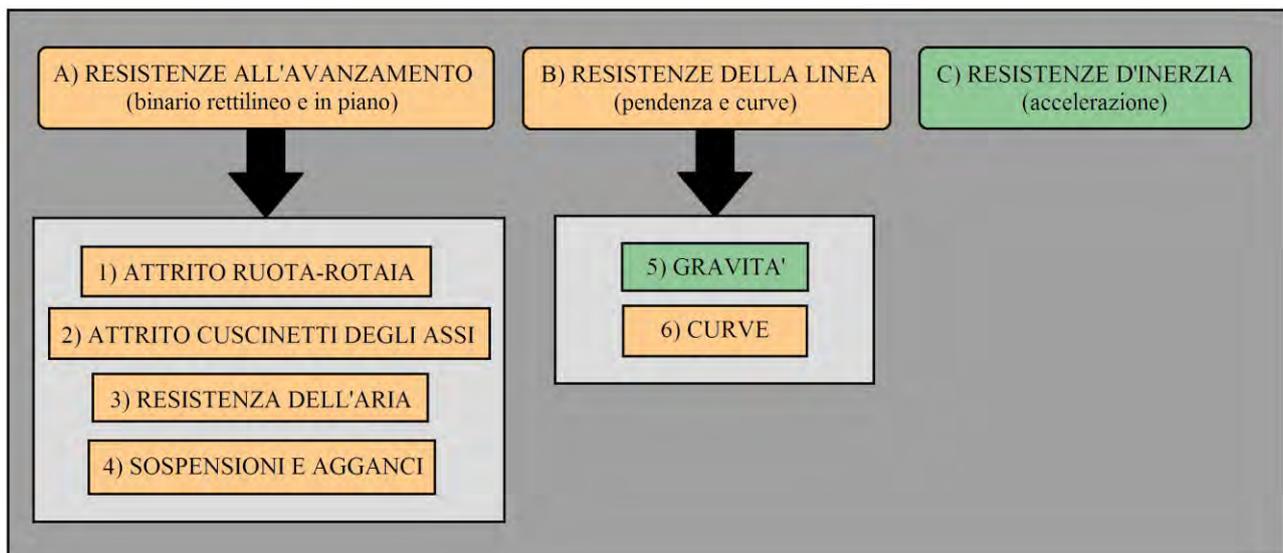


Tabella 1

## 2.3 ► Le resistenze unitarie alla trazione

Per **convenienza pratica** è prassi ferroviaria esprimere tali resistenze alla trazione sotto forma di "**resistenze unitarie**" ovvero quantificando i **newton** di forza resistente riferiti a **una tonnellata** di massa. L'unità di misura risulta quindi  $N/t$  e tali resistenze unitarie s'indicano genericamente con la lettera minuscola "**r**".

In tab.1 sono riassunte tali forze resistenti divise in gruppi principali e sottogruppi.

Nei riquadri **marrone** le resistenze sono di natura **dissipativa** per cui l'energia spesa è trasformata in **calore a bassa temperatura** mentre in quelli **verdi** può essere **recuperata** in quanto:

- a) quella dovuta **all'inerzia** diventa **energia cinetica**;
- b) quella dovuta alla **gravità** diventa **energia potenziale**.

Esaminiamo ora in dettaglio a quanto ammontano numericamente tali forze resistenti.

### ► A - resistenza unitaria dovuta unicamente all'avanzamento (binario rettilineo e in piano)

Essa si compone delle resistenze **dissipative** dei punti da 1 a 4 di tab.1:

- 1) la **resistenza unitaria di attrito ruota-rotaia** che indicativamente è di  $10 \text{ N/t}$ ,
- 2) la **resistenza unitaria di attrito dei cuscinetti** che indicativamente è di  $7 \text{ N/t}$ ,
- 3) la **resistenza unitaria** dovuta alla **velocità** che è fortemente variabile in base alla sagoma del convoglio, soprattutto frontale. La formula che ne determina l'entità in base alla velocità  $V$ , al coefficiente  $C$  del fattore di forma della superficie frontale e alla superficie  $S$  di testata del treno è:

$$r_{vel} = 0,005 C \cdot S \cdot V^2 \quad [\text{N/t}]$$

dove:

$V$  = velocità [ $m/s$ ] ( $V$  in  $m/s$  =  $V$  in  $km/h$  divisa per 3,6),

$C$  = fattore di forma della superficie frontale [*adimensionale*] (rotabili non sagomati: 0,7 – 0,8, sagomati: 0,35 – 0,5),

$S$  = superficie di testata del treno [ $m^2$ ] (locomotive circa  $9 \text{ m}^2$ - elettromotrici  $7 \text{ m}^2$ ).

Questa terza resistenza unitaria diventa **preponderante** sulle altre due oltre gli  $80 - 90 \text{ km/h}$ .

Infatti:

$$[\text{resistenze unit. ruota-rotaia} \approx 10 \text{ N/t}] + [\text{attrito dei cuscinetti} \approx 7 \text{ N/t}] = \approx 17 \text{ N/t}$$

Ponendo come valori tipici di un treno merci i parametri  $C = 0,8$  e  $S = 9 \text{ m}^2$ :

- con  $V = 72 \text{ km/h}$  ( $20 \text{ m/s}$ )  $\rightarrow r_{vel} = 14,4 \text{ N/t} \rightarrow$  quindi  $< \approx 17 \text{ N/t}$
- con  $V = 90 \text{ km/h}$  ( $25 \text{ m/s}$ )  $\rightarrow r_{vel} = 22,5 \text{ N/t} \rightarrow$  quindi  $> \approx 17 \text{ N/t}$

in accordo con quanto affermato.

4) la **resistenza unitaria** delle **molle di sospensione** e **agganci** è minima per cui trascurabile in questo contesto.

→ Riassumendo :

a) resistenza unitaria di attrito **ruota-rotaia**  $\approx 10 N/t$ ,

b) resistenza unitaria di attrito **cuscinetti**  $\approx 7 N/t$ ,

c) resistenza unitaria di attrito **dell'aria**  $\approx 22,5 N/t @ 90 km/h$  - treno merci.

Terminata la fase acceleratrice, ed **esaurita** quindi la **forza d'inerzia**, per un convoglio che prosegua in **rettilineo** e **in piano** le sole forze resistenti unitarie al moto sono quelle dei precedenti punti *a, b, c*. Esse possono essere riunite in un valore **complessivo** di resistenze unitarie al moto " $r_v$ " attraverso **formule sperimentali** dotate di un buon grado di attendibilità.

A seconda **del tipo** di materiale rotabile tali formule possono essere:

> di tipo **binomiale**:

$$r_v = a + b V^2 \quad [N/t]$$

> di tipo **trinomiale**:

$$r_v = a + b V + c V^2 \quad [N/t]$$

Per i principali materiali rotabili, **attualmente in uso** sulla rete **italiana**, le forze resistenti unitarie  $r_v$ , dovute **unicamente all'avanzamento in rettilineo e in piano** valgono:

$$r_{vML} = 19 + 0,0026 V^2 \quad [N/t] \quad \rightarrow \text{Mezzi leggeri}$$

$$r_{vMO} = 20 + 0,0028 V^2 \quad [N/t] \quad \rightarrow \text{Materiale ordinario}$$

$$r_{vTM} = 25 + 0,0030 V^2 \quad [N/t] \quad \rightarrow \text{Treni merci}$$

$$r_{vETR500} = 9,211 + 0,001226 V^2 \quad [N/t] \quad \rightarrow \text{Frecciarossa 500}$$

$$r_{vETR1000} = 13,34074 + 0,014651 V + 0,000662676 V^2 \quad [N/t] \quad \rightarrow \text{Frecciarossa 1000}$$

$$r_{vTGV\_A} = 6,576 + 0,0864 V + 0,001493 V^2 \quad [N/t] \quad \rightarrow \text{TGV Atlantique}$$

dove:

$V$  = velocità [km/h]

**N.B.** ► In molti testi cartacei in circolazione, oppure documenti *WEB*, sono riportate formule datate che si riferiscono a materiali ormai obsoleti con maggiore resistenza all'avanzamento rispetto a quelli attualmente in esercizio: tali formule sono da scartare e gli elaborati basati su tali formule da ritenere non più attuali.

Facendo uso delle formule precedenti è possibile creare un grafico di forze resistenti unitarie  $r_v$  divise per materiali rotabili:

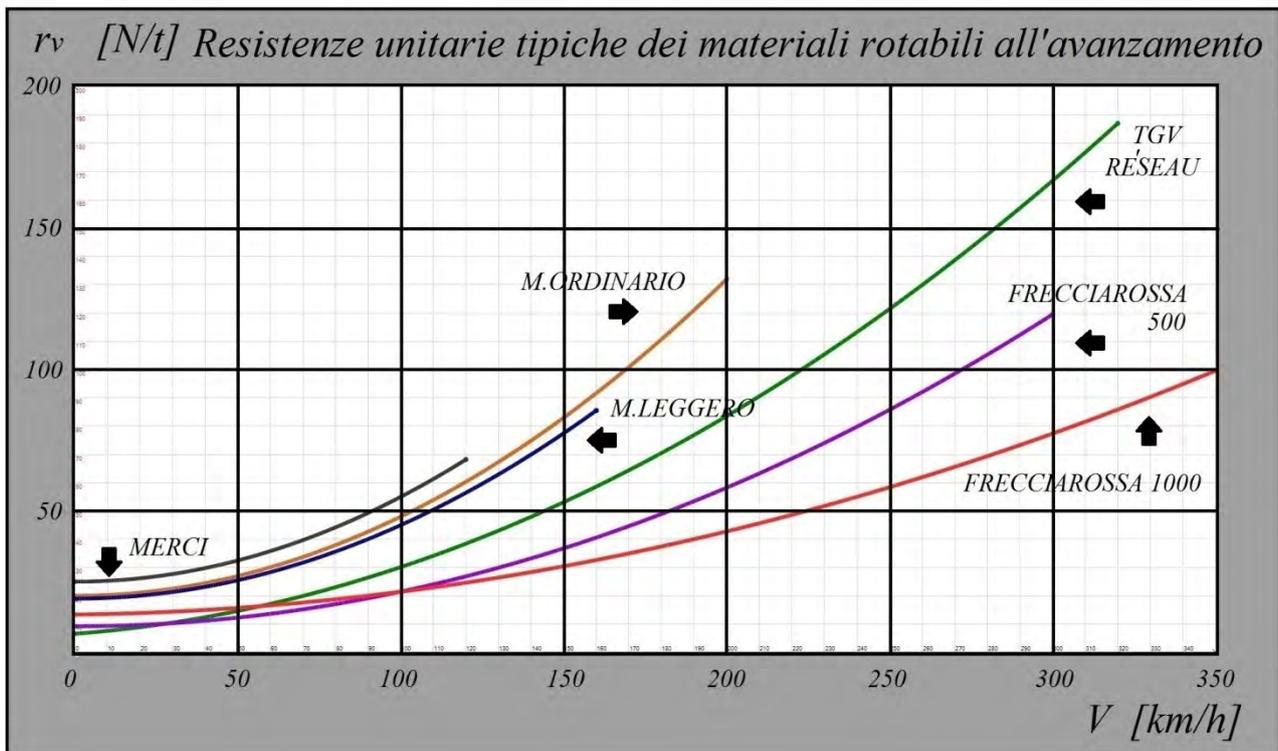


Grafico 1

Le curve terminano alla velocità **massima** raggiungibile dallo specifico **materiale rotabile** ovvero:

- 120 km/h: treni merci (tipicamente 100km/h o 120 km/h a seconda del tipo di carro),
- 160 km/h: materiale leggero (140 km/h TAF e Ale724, 160 km/h Minuetto elettrico e Jazz),
- 200 km/h: materiale ordinario (140 km/h doppio piano e piano ribassato, 160km/h Vivalto 1°/2° serie e medie distanze, 200 km/h IC e treni notte),
- 300 km/h: Frecciarossa 500 (2 motrici E404 in doppia trazione simmetrica),
- 320 km/h: TGV Réseau,
- 350 km/h: Frecciarossa ETR 1000 (V300 Zefiro - velocità teoricamente possibile - attualmente omologato in esercizio a 300 km/h).

In proposito si specifica che:

- per *materiale ordinario* s'intendono carrozze trainate/spinte da uno o più locomotori compresi i treni navetta con la carrozza semipilota (*Vivalto*, medie distanze, doppio piano, piano ribassato ecc..),
- per *materiale leggero* s'intende un convoglio dotato di carrozza con motori propri e fornito alle estremità di cabine di guida avente anche posti per i passeggeri. Può circolare da solo o con carrozze intermedie (*TAF*, *Jazz*, *minuetto* ecc..),
- per *ETR* s'intende un complesso a trazione elettrica con prestazioni elevate e composizione bloccata con motori (e quindi potenza) distribuiti lungo il convoglio (*Frecciarossa 1000*, *Italo* ecc..),
- il *Frecciarossa 500*, anche se è usualmente denominato *ETR500*, in realtà non ha le caratteristiche tecniche di un *ETR* essendo i motori concentrati alle estremità sulle due motrici come pure non lo è il *TGV*. Gli *ETR* sono: *Frecciarossa 1000*, *Italo* (*AGV575* - Automotrice à Grande Vitesse - versione francese degli *ETR*) e i vari Pendolini *ETR 450, 460, 470, 480 e 485*. I mezzi come l'*ETR500* e *TGV* sono definiti "a potenza concentrata", mentre quelli come il *Frecciarossa 1000* a "potenza distribuita",
- I *TGV* che circolano sulla direttrice *Milano – Parigi* via *Frejus* sono i *Réseau* (dal 4501 al 4506), una derivazione dell'*Atlantique*, con due motrici e 8 carrozze. Le differenze minimali tra i due materiali (resistenza ai colpi di pressione e tricolore per il *Réseau*) permettono di utilizzare la stessa formula dell'*Atlantique* per il calcolo della  $r_v$ .

► **In conclusione:**

La **resistenza unitaria**  $r_v$ , dovuta **unicamente all'avanzamento** (binario rettilineo e in piano), è deducibile da **formule specifiche** per ogni **tipo di materiale rotabile**. Essa si esprime in  $N/t$ .

► **B - Resistenza unitaria dovuta alle condizioni della linea (pendenza e curve)**

Essa si compone delle resistenze dei punti 5 e 6 della tab.1.

La **resistenza unitaria** " $r_g$ ", dovuta alla **gravità**, ammonta a  $9,8 N/t$  per ogni 1‰ di pendenza della linea " $i$ ".

Quindi:

$$r_g = g \cdot i = 9,8 \cdot i \quad [N/t]$$

dove:

$g$  = accelerazione di gravità che vale  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

**N.B. ► In tutto il testo seguente "g" indicherà sempre l'accelerazione di gravità con valore  $9,8 \text{ m/s}^2$ .**

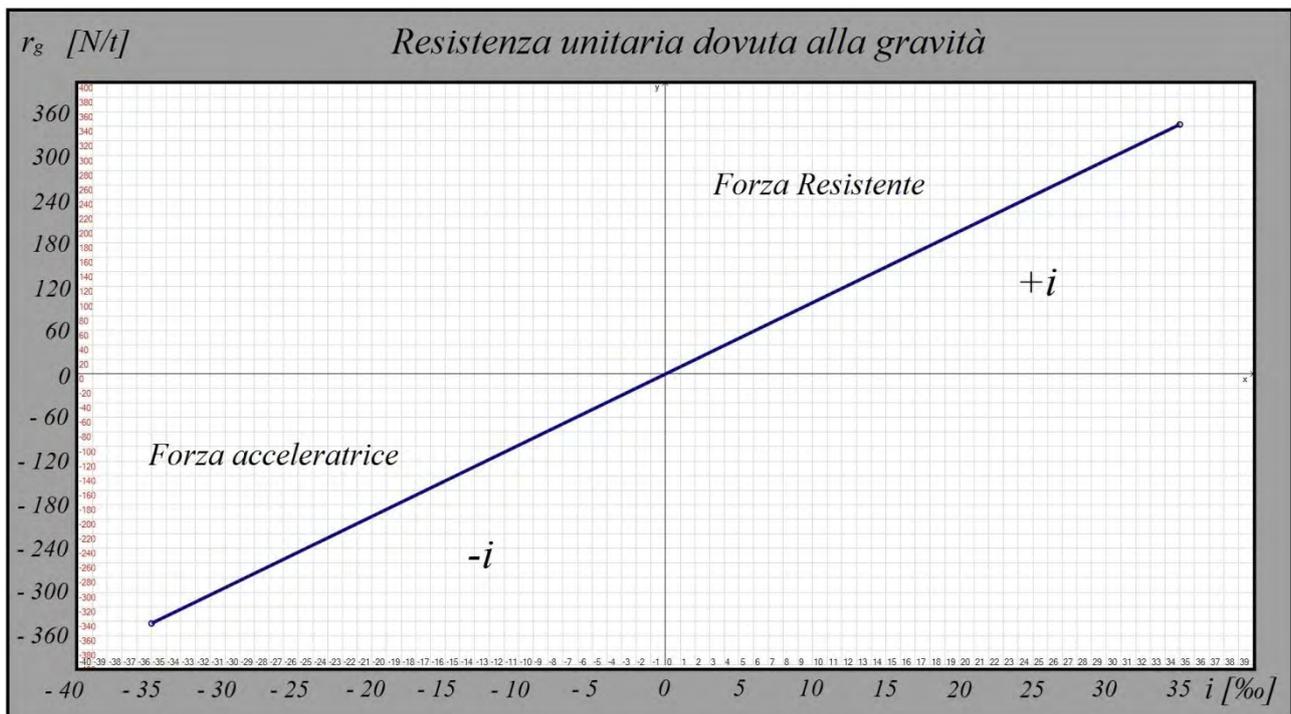


Grafico 2

La resistenza unitaria  $r_g$ , che in **salita** rappresenta una **resistenza** al moto, in **discesa** diventa **forza acceleratrice**. Pertanto essa avrà segno **positivo** nelle salite e **negativo** nelle discese. L'energia spesa per la salita si trasforma in **energia potenziale** e pertanto può essere **recuperata** in discesa.

In termini pratici  $r_g$  si va a **sommare** o **sottrarre** punto-punto a  $r_v$  facendo **scorrere** verso **l'alto** (salita) oppure verso il **basso** (discesa) tale curva.

Si osservi il grafico 3. In esso sono riportate 3 curve della resistenza unitaria  $r_v$ , in funzione della velocità, di un treno merci che viaggia in una tratta rettilinea nei casi:

- pianura (0‰),
- salita (+5‰),
- discesa (-5‰).

Com'è possibile osservare, l'andamento delle curve del +5‰ e -5‰ è **identico** a quello del 0‰ **traslato** verso l'**alto** o verso il **basso**. Tenendo conto del contributo della pendenza, il **divario** punto-punto varrà:

$$r_g = g \cdot i = 9,8 \cdot i = 9,8 \cdot (\pm 5) = \pm 49 \text{ N/t}$$

Si noti che, mentre per la tratta in **piano** o in **salita** la resistenza unitaria  $r_g$  è **sempre positiva**, per la tratta in **discesa** può assumere anche **entrambi i segni**.

Con riferimento specifico alla curva del -5‰ del grafico 3, si possono quindi presentare 3 situazioni:

- 1) a 88 km/h il treno potrebbe viaggiare con **motori disinseriti** di **moto uniforme** perché i 48 N/t \* di **resistenza al moto** sarebbero **interamente compensati** dalla componente dovuta alla **gravità**,
- 2) per mantenere la velocità sotto gli 88 km/h (area marroncina) è necessario **frenare** (pneumaticamente e/o elettrodinamicamente),
- 3) per ottenere velocità superiori a 88 km/h è necessario **inserire i motori**.

\*) i 48 N/t sono la  $r_v$  della curva in piano a 88 km/h.

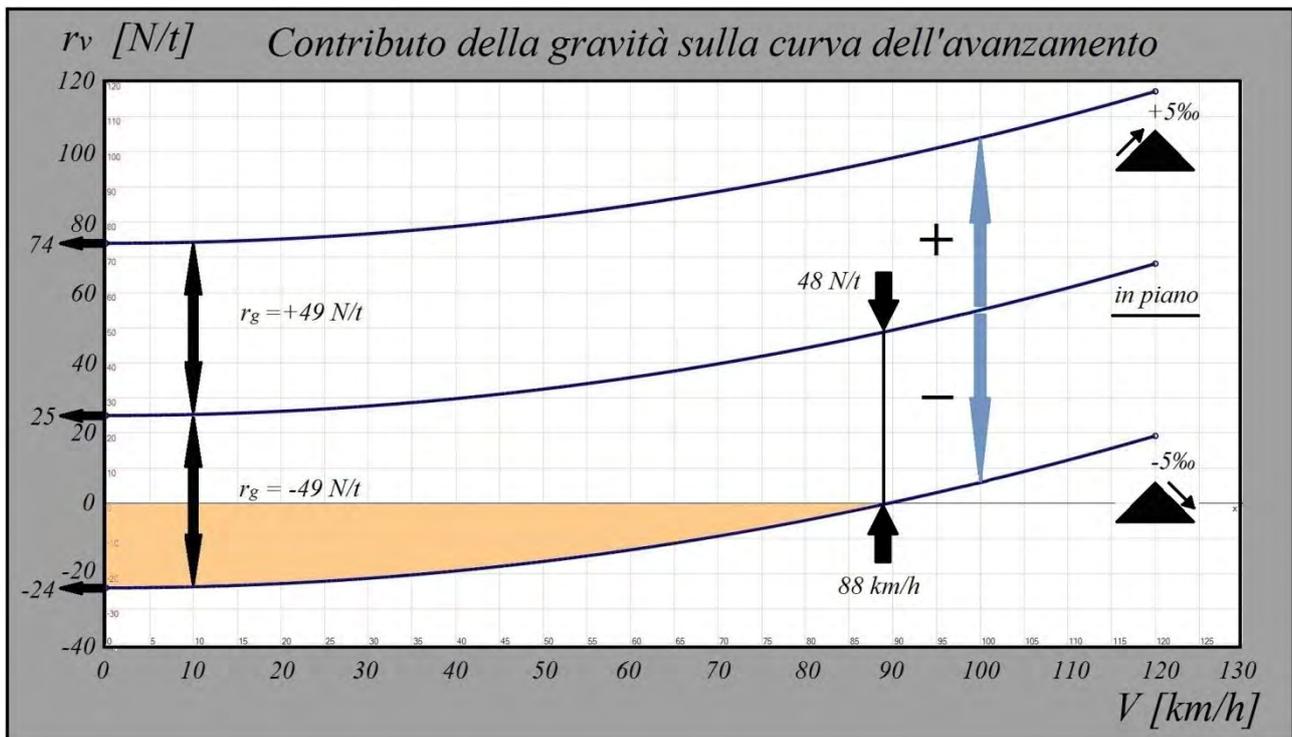


Grafico 3

Per quanto concerne la **resistenza unitaria dissipativa** dovuta alle **curve**, in ferrovia indicata con " $\rho$ ", esiste una formula semplificata che ne permette la determinazione in funzione del raggio di curvatura del binario:

$$\rho = \frac{8.000}{\text{raggio}} \quad [N/t]$$

dove:

*raggio* = raggio della curva [m]

Indicativamente, per una curva di 600 m di raggio (quindi abbastanza ampia), il contributo è di  $\approx 13 N/t$ , in altre parole come si **umentasse virtualmente** di circa 1,5‰ la **pendenza** di una linea.

► **In conclusione:**

- la **resistenza unitaria  $r_g$**  dovuta alla gravità vale  $\pm 9,8 N/t$  per ogni 1‰ di pendenza della linea,
- la **resistenza unitaria  $\rho$**  dovuta alle curve vale circa 13 N/t per curve di raggio di 600 metri.

Si noti che, contrariamente a  $r_v$ , sia  $r_g$  che  $\rho$  **non** dipendono dalla **velocità del treno**.

Tenendo conto solo della **pendenza** e delle **curve**, le linee ferroviarie sono state **storicamente** suddivise in "**sezioni di carico**" con l'introduzione dei **gradi di prestazione** cui corrispondono un valore somma costante di  $r_g$  e  $\rho$ , in altre parole  $r_T$  :

$$r_T = r_g + \rho = \text{costante}$$

In termini pratici questo vuol dire che, durante la progettazione della linea, in curva era diminuita la pendenza e viceversa. Alla luce di questo la rete infrastrutturale è suddivisa in **31 gradi di prestazione**, riportati sui fascicoli linee di *RFI* e a ciascuno di essi corrisponde in un'apposita tabella un preciso valore di  $r_T$  (tab.2).

La resistenza dovuta al tracciato con il sistema dei gradi di prestazione non è però utilizzabile per il calcolo energetico. Questo perché tale metodo è nato con l'intento di determinare la **massima massa trainabile** dalla locomotiva per cui presenta alla base il **concetto** che, ovunque si **fermi** il treno, tale convoglio debba essere in grado di **ripartire**. Non sempre però l'intero troncone in esame è **omogeneo** (e di conseguenza la somma  $r_g$  e  $\rho$ ), ma per tratti più o meno lunghi vi possono essere **livелlette** a **minore pendenza** o addirittura **quasi in piano**, come spesso accade nelle stazioni.

*Grado di prestazione - corrispondenza con  $r_T$  [N/t]*

Grado di prestazione	$r_T$ N/t	Grado di prestazione	$r_T$ N/t	Grado di prestazione	$r_T$ N/t
1	44	12	118	23	241
2	49	13	126	24	252
3	54	14	135	25	272
4	59	15	143	26	287
5	64	16	155	27	302
6	69	17	167	28	319
7	75	18	180	29	335
8	82	19	194	30	368
9	90	20	205	31	397
10	98	21	215		
11	108	22	222		

Tabella 2

La **pendenza**, quindi, è da intendersi come **massima** per una determinata tratta. Tutto questo non ha influenza sulla determinazione della massima massa trainabile ma **falsa** per eccesso un eventuale computo dell'energia basato su tali dati.

*Grado di prestazione - RFI - Estratto fascicolo linea FL2 [Modane-Torino]*

Linea MODANE - TORINO Trazione elettrica a corrente continua  
Esercizio con DC(Sede Torino) da Modane a Bussoleno

PER I TRENI PERCORRENTI IL BINARIO DI SINISTRA



Grado di prestazione	Ascesa ‰	Progres- sive chilome- triche	Distanze parziali	LOCALITA' DI SERVIZIO	Posti di blocco	INDICAZIONI DI SERVIZIO E PROTEZIONE P.L.	Numero e capacità binari
8	5			<b>MODANE FOURNEAUX</b>			vari
27	28	102,548		<b>MODANE</b>	121	(4) (5) (6) (3)	(425-595)
		100,212	2,336	Dev. U	P119		
		98,145	2,067	P.C. TERRE FROIDES	117	(c) (1)	

Figura 1

► **C - Resistenza unitaria dovuta all'inerzia (all'avviamento o variazioni di velocità in aumento, detta "accelerazione")**

Come accennato, tali resistenze del punto C tab.1 si hanno solo nelle fasi di **accelerazione** per cui nelle **partenze da fermo** o per **aumenti** di velocità del convoglio. In caso di **diminuzione** di velocità, invece, la forza d'inerzia tende a **conservare il moto, invertendosi** (l'accelerazione indicata usualmente con "a" diventa " - a" per le decelerazioni).

La resistenza unitaria  $r_i$ , nel contesto di quest'analisi, **non è presa in considerazione** perché i **convogli** si ritengono a **velocità costante** e quindi **già accelerati**.

### Resistenza globale unitaria alla trazione

Per resistenza globale unitaria alla trazione  $\Sigma_r$  s'intende la **somma algebrica** delle tre componenti  $r_v$ ,  $r_g$  e  $\rho$  quando il treno **ha raggiunto** la velocità di marcia uniforme  $V$ .

$$\Sigma_r = r_v + r_g + \rho \quad [N/t]$$

Il fatto che si prenda in considerazione la **velocità uniforme**  $V$  è perché, **contrariamente** ai mezzi stradali, **terminate** le fasi **acceleratrici** un treno si muove **prevalentemente di moto uniforme** per tratte che spesso possono essere anche **molto lunghe**. Infatti un convoglio merci, o un treno *Alta velocità*, possono percorrere anche **centinaia di km** a velocità pressoché **invariata**.

## 2.4 ► Le resistenze alla trazione riferite all'intera massa del treno

La **moltiplicazione** della massa **totale del treno**  $M_T$  per ogni **specifica resistenza unitaria** fornisce la medesima resistenza **riferita all'intero treno** e s'indica con  $R$  maiuscola.

Quindi:

$$R_v = M_T \cdot r_v \quad [N] \quad \blacksquare \quad R_g = M_T \cdot r_g \quad [N] \quad \blacksquare \quad R_\rho = M_T \cdot \rho \quad [N]$$

dove:

$M_T$  = somma fra " $M_{LOC}$ " massa della **locomotiva** e " $M_R$ " massa **rimorchiata lorda** (per convogli leggeri ed *ETR* s'intende la massa **dell'intero complesso**). Nel caso di più locomotive si **sommano** le loro **singole** masse.

### Resistenza globale alla trazione

Analogamente al punto precedente la **resistenza globale alla trazione** " $\Sigma R$ " di un treno si ottiene **moltiplicando** quella specifica  $\Sigma_r$  per la **massa** totale del treno " $M_T$ " permettendo quindi di **quantificare** i newton di sforzo di trazione **richiesti in totale** alla locomotiva (o alle locomotive):

$$\Sigma R = M_T \cdot \Sigma_r = M_T \cdot (r_v + r_g + \rho) \quad [N]$$

Anche in questo caso la sommatoria delle resistenze riferite **all'intera** massa del treno s'indica con  $R$  maiuscola.

E' **prassi ferroviaria**, considerato l'entità delle grandezze in gioco, utilizzare i  $kN$  al posto dei  $N$  quindi la formula necessita di un'ulteriore divisione per 1.000:

$$\Sigma R = \frac{M_T \cdot (r_v + r_g + \rho)}{1.000} \quad [kN]$$

considerato che:

$$r_g = g \cdot i \quad [N/t]$$

$$\rho = 8.000/r \quad [N/t]$$

si ottiene la seguente formula generale:

$$\Sigma R = \frac{M_T \cdot (r_v + g \cdot i + 8.000/r)}{1.000} \quad [kN]$$

**Sostituendo** a  $r_v$  la **formula** di pag.10 **corrispondente** allo **specifico materiale** in esame, si ottiene la **resistenza globale alla trazione a lui riferita**.

► **In conclusione:**

$$\Sigma R = \frac{M_T \cdot (r_v + g \cdot i + 8.000/r)}{1.000} \quad [kN]$$

la precedente **formula generale** di **resistenza globale alla trazione** permette di calcolare lo **sforzo di trazione** che deve **effettivamente** esercitare una **locomotiva** (o più locomotive) per un **treno**:

- > che abbia terminato la fase acceleratrice,
- > di qualunque tipologia, [merci, viaggiatori]
- > di qualunque massa totale  $M_T$ , [t]
- > che viaggi di moto uniforme a velocità  $V$ , [km/h]
- > che viaggi su linea di pendenza  $i$ , [‰]
- > che viaggi su linea con curve di raggio  $r$ . [m]

## **PARTE TERZA**

# **CARATTERISTICA MECCANICA DI TRAZIONE E FRENATURA ELETTRODINAMICA DELLA LOCOMOTIVA**

### 3.1 ► Caratteristica meccanica di trazione

Per **muovere** un materiale rotabile ferroviario di **forza resistente**  $\Sigma R$  è necessario uno **sforzo di trazione**  $ST_C$  esercitato da **mezzo motore** al **cerchione** sulla rotaia.

La "**caratteristica meccanica di trazione**" può essere intesa come la "**carta d'identità**" di una **locomotiva** ed è una curva **iperbolica** che riporta l'andamento dello **sforzo di trazione** al cerchione  $ST_C$  in relazione alla **velocità di marcia**  $V$ . Tale iperbole può anche essere equilatera.

La **moltiplicazione** dello sforzo di trazione al cerchione  $ST_C$  con la relativa velocità  $V$  fornisce la **potenza meccanica**  $PW_{MC}$  che la locomotiva mette a disposizione alla **periferia dei cerchioni**.

Quindi:

$$PW_{MC} = ST_C \cdot V \quad [kW]$$

dove:

$ST_C$  = sforzo di trazione ai cerchioni [kN]

$V$  = velocità della locomotiva [m/s]

Se **trascuriamo** per ora i **rendimenti** della locomotiva (che, come si vedrà più avanti, sono comunque molto alti), la **potenza meccanica**  $PW_M$  di trazione **equivale** a quella **elettrica**  $PW_E$  **assorbita dalla catenaria**.

Lo sforzo di trazione ai cerchioni  $ST_C$  vale quindi:

$$ST_C = \frac{PW_{MC}}{V} \quad [kN]$$

Questa **formula** è però **inapplicabile** per **velocità basse** perché lo sforzo di trazione diventerebbe elevatissimo **superando** l'aderenza della locomotiva.

Lo sforzo di trazione massimo **limitato dall'aderenza** vale perciò:

$$ST_{CMAX} = M_A \cdot f \cdot g \quad [kN]$$

dove:

$M_A$  = massa aderente della locomotiva [t],  
 $f$  = coefficiente di aderenza [adimensionale].

Per *massa aderente* s'intende la sola massa che grava sugli assi motori o accoppiati.

Il **coefficiente di aderenza**  $f$ , invece, **varia** con la **velocità** e le **condizioni delle rotaie**, in altre parole se queste sono asciutte o umide:

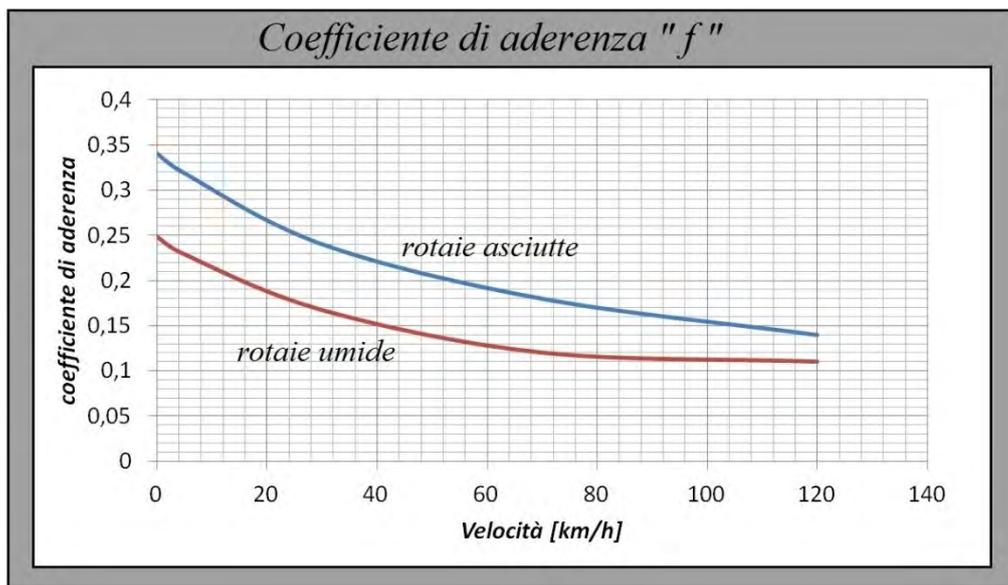


Grafico 4

Qualora lo **sforzo** fosse **superato**, **s'innescerebbe** il **fenomeno** dello **slittamento** (*slittamento*: ruota che gira senza avanzare - *pattinamento*: ruota che avanza senza girare, in altre parole bloccata a veicolo in movimento).

In base a quanto esposto, la **potenza** dei motori di trazione alle **basse velocità** può essere utilizzata quindi **solo parzialmente**: più scende la velocità e meno è utilizzabile.

Esiste quindi una **velocità limite**  $V_B$  di erogazione della potenza massima:

$$V_B = \frac{PW_{MC}}{ST_{C_{MAX}}} = \frac{PW_{MC}}{M_A \cdot f \cdot g} \quad [m/s]$$

**N.B.** ► Nei grafici che seguiranno lo  $ST_{C_{MAX}}$  si presuppone con **aderenza ideale** e quindi con **rotaie asciutte**. In altri calcoli successivi, invece, per situazioni critiche sarà assunto il valore di  $f$  per le rotaie umide. Il valore di  $f$ , in questi casi, sarà specificato.

Esaminiamo ora in dettaglio come si compone la **caratteristica meccanica di trazione** di una **locomotiva**.

Si osservi il grafico 5 dove è riportato lo **sforzo di trazione al cerchione  $ST_C$**  in **funzione della velocità della locomotiva  $V$** .

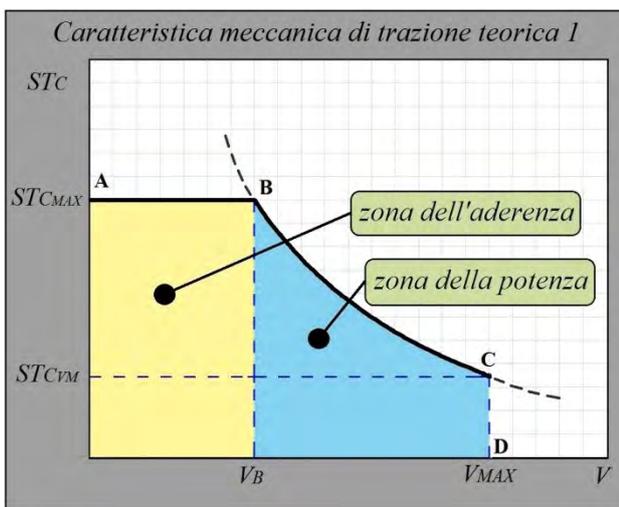


Grafico 5

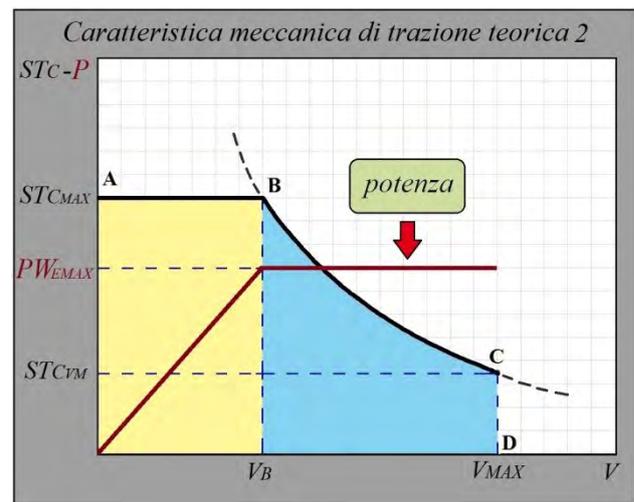


Grafico 6

Il **segmento tratteggiato  $V_B - B$** , **dividendo** la caratteristica meccanica in **due parti**, forma **altrettante aree** che assumono denominazione:

- **zona dell'aderenza**, dove lo sforzo di trazione è **limitato dall'aderenza** (area gialla),
- **zona della potenza**, dove lo sforzo di trazione è **limitato dalla potenza** (area azzurra).

► La **caratteristica meccanica teorica di trazione** di una **locomotiva** si compone quindi di:

- **tratto AB**: un segmento con origine a velocità zero fino alla velocità  $V_B$  dove lo sforzo di trazione è limitato *dall'aderenza* oltre il quale avviene il fenomeno dello slittamento.

Questo limite di sforzo di trazione corrisponde approssimativamente al valore di corrente massimo ai motori oltre il quale si rischia di danneggiare la locomotiva.

- **tratto BC:** un'iperbole equilatera che corrisponde all'assorbimento di una potenza costante. Questa zona *della potenza* si estende come velocità da  $V_B$  a  $V_{MAX}$  e lo sforzo di trazione è limitato dalla potenza massima del mezzo.
- **tratto CD:** un segmento verticale tratteggiato che delimita la *velocità massima*  $V_{MAX}$  in base alle caratteristiche costruttive del mezzo di trazione.

► Dal punto di vista della **potenza** assorbita **dalla linea**, con riferimento al grafico 6, invece:

- **nel tratto AB:** la potenza aumenterà da zero, a velocità zero, fino a raggiungere quella massima  $PW_{EMAX}$  della locomotiva a velocità  $V_B$  (in realtà a velocità zero si assorbirà comunque una certa potenza, seppur piccola, dovuta alla resistenza elettrica dei motori di trazione che non sono ancora in rotazione).

Qualsiasi moltiplicazione di  $ST_{CX} \cdot V_X$ , con  $0 \leq V_X \leq V_B$ , fornirà quindi come risultato una potenza elettrica tra (circa) zero e quella massima della macchina  $PW_{EMAX}$  che sarà raggiunta nel punto B.

Il **punto B, di passaggio** dalla zona **dell'aderenza** a quella della **potenza**, in fase di accelerazione del mezzo di trazione è spesso particolarmente visibile dallo strumento  $kN$  di bordo come una **netta diminuzione** dello **sforzo di trazione** e il contestuale **arresto** dell'aumento della **corrente assorbita** dalla catenaria.

La velocità  $V_B$  di tale punto B, che può anche variare nei mezzi di trazione politensione, indicativamente vale:

Locomotiva/Materiale	$V_B$ di Transizione [km/h]			
	1.5 kVcc	3 kVcc	15 kVCA 16.7 Hz	25 kVCA 50 Hz
<i>E633</i>		50		
<i>E652</i>		50		
<i>BB36.000</i>	70	70		70
<i>TAF (ALe506 - Ale426)</i>		65		
<i>E464</i>		70		
<i>Frecciabianca (E414)</i>		100		
<i>Frecciarossa 500PLT (E404)</i>	100	160		125
<i>ETR1000</i>	30	75	75	115
<i>TGV Réseau</i>	60	60		120
<i>Italo (AGV575)</i>	55	80	80	80

Tabella 3

- **nel tratto BC**: la potenza, pari a quella massima del mezzo, rimane costante fino alla velocità  $V_{MAX}$ . Qualsiasi moltiplicazione di  $ST_{CX} \cdot V_X$  fornirà come risultato la potenza elettrica massima della macchina  $PW_{EMAX}$ .

Dal punto di vista **teorico** si considera il segmento dello sforzo di trazione nella zona dell'aderenza **parallelo** all'asse della velocità.

In **realtà**, come insegna il grafico 4 del coefficiente d'aderenza  $f$ , questa **diminuisce** con la velocità.

Ne consegue che l'andamento reale delle caratteristiche meccaniche e della potenza assume un andamento come quello dei grafici 7 e 8.

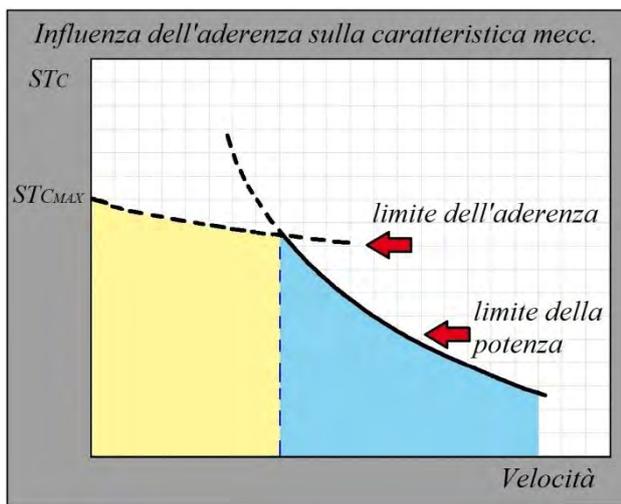


Grafico 7

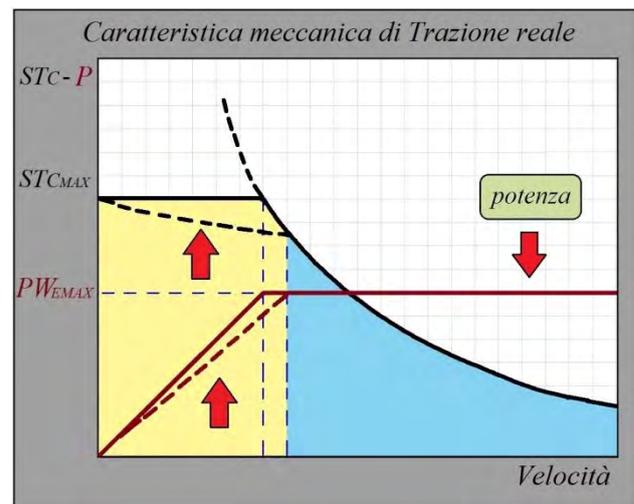


Grafico 8

Le due **freccie rosse**, all'interno dell'area dell'aderenza del grafico 8, evidenziano le curve della **caratteristica meccanica** e della **potenza reali** (tratteggiate) nella parte che si **discostano** da quelle **teoriche** (tratto continuo).

► **In conclusione:**

la "**caratteristica meccanica di trazione**" è la "**carta d'identità di una locomotiva**" che riporta l'**andamento dello sforzo di trazione al cerchione  $ST_C$**  in relazione alla **velocità di marcia  $V$** .

## 3.2 ► Caratteristica meccanica di frenatura elettrodinamica

Per comprendere a fondo il comportamento della **frenatura elettrodinamica** è necessario aver chiari alcuni concetti relativi all'arresto dei treni.

Un **convoglio** percorrente a **velocità costante** una tratta **rettilinea** e in **piano**, come appurato in precedenza, è soggetto alle **sole resistenze**  $R_v$  dovute all'**avanzamento**.

Se la locomotiva **cessa lo sforzo di trazione**, in altre parole a **compensare** queste resistenze, il convoglio **spontaneamente rallenterà** e dopo un certo spazio **si fermerà** (fase detta di *coasting*). Se la linea è invece in **salita**, a tali resistenze contrarie al moto si **sommerà** anche quella dovuta alla **gravità**  $R_g$  **riducendo** così lo spazio d'arresto (in **discesa** avverrà il contrario).

Lo spazio d'arresto è **vincolante** poiché vi sono delle **distanze da rispettare** perché il convoglio deve raggiungere **velocità zero** nella distanza che intercorre tra un segnale **giallo** e il successivo **rosso**.

Il solo **arresto spontaneo**, tranne il **caso particolare** in salita per certi treni e certe pendenze, **non** è in grado di rispettare questi spazi per cui si deve ricorrere alla **frenatura**.

La frenatura **prioritaria** di un convoglio **ordinario** è quella **pneumatica** perché è la **più efficace** (agendo su tutti gli assi del treno) e la più **affidabile** (quella elettrica potrebbe cessare improvvisamente per guasti o quant'altro). Nei soli **treni AV** e nelle **discese continuate** è d'obbligo l'**uso prioritario** della **frenatura elettrodinamica** ma il **freno prioritario** resta sempre quello **pneumatico**.

La **velocità massima** di un treno (rispetto alla frenatura) è legata **all'efficienza frenante** e alla **pendenza** (in particolare la discesa).

L'**efficacia frenante** della frenatura pneumatica è determinata **in percentuale** dal **rapporto** tra l'efficienza frenante dei carri e la massa degli stessi in modo tale che si considera 100% quando il bloccaggio dell'asse avviene a velocità zero.

Tali efficacie frenanti spaziano da **valori bassi** come nel caso di treni **merci pesanti** (60 – 75 – 90%) fino ai **valori alti** dei treni **viaggiatori** (120 ÷ 130%) per arrivare a valori **ancora più alti** sui treni **AV** (135 – 145%).

Il **principio tecnico** su cui si basa la **frenatura pneumatica** è semplice: **immettendo** aria in un'apposita condotta che dalla locomotiva raggiunge la coda del convoglio (collegando quindi tutti gli impianti frenanti dei carri/carrozze) si **sfrena** il treno, **scaricandola** si **frena**; la condotta, detta **condotta generale**, a treno in movimento è quindi **carica** alla pressione di 5 bar. Ogni **diminuzione** da tale pressione va ad agire **proporzionalmente** su degli appositi apparecchi detti **distributori** che, prelevando più o meno aria dai serbatoi di veicolo, provvedono ad immetterla in **cilindri a freno**. Tali **stantuffi pneumatici** forniscono meccanicamente l'**azione frenante** andando ad agire con dei **ceppi** direttamente sulle **ruote** oppure tramite **ferodi** su dei **dischi** presenti sugli assi.

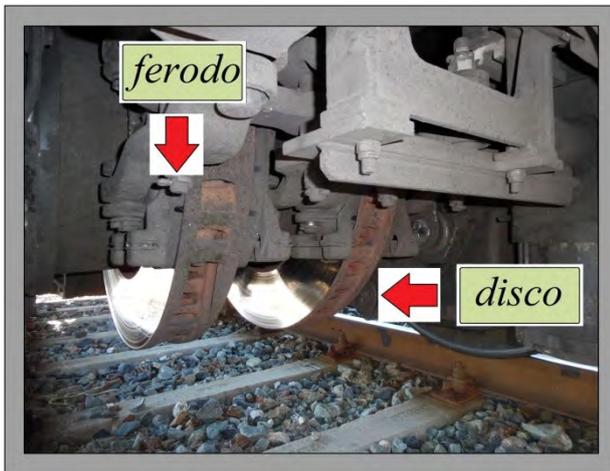


Figura 2

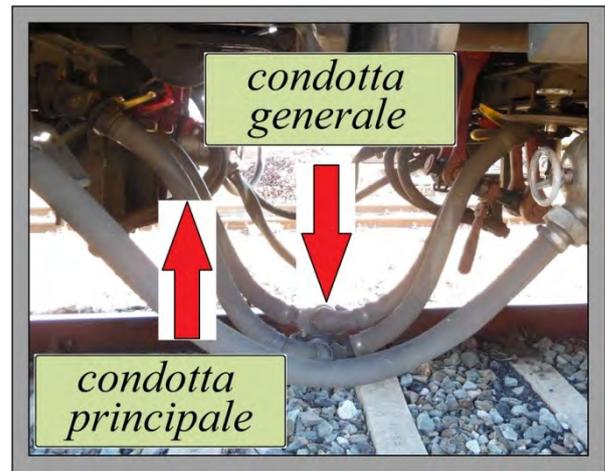


Figura 3

Per ottenere la **sfrenatura** totale o parziale del convoglio, si **ricarica** nuovamente **aria** nella condotta e questa, sempre tramite l'azione del distributore, va **proporzionalmente** a **svuotare** i cilindri a freno e contestualmente ricarica i **serbatoi del veicolo** per una successiva frenata.

In tutti i **treni viaggiatori** moderni la ricarica dei serbatoi di veicolo sulle carrozze avviene attraverso una **seconda condotta**, detta **condotta principale**, che **garantisce l'immobilità** del treno a **tempo indeterminato**, a patto che funzionino i meccanismi di produzione dell'aria sulla locomotiva.

Le due condotte si differenziano per il **colore** dei **rubinetti di chiusura** delle stesse: **rosso** per la condotta **generale**, **giallo** per quella **principale**.

Tale funzionamento del freno pneumatico, all'apparenza bizzarro, è necessario per **questioni di sicurezza**: se per qualsiasi motivo **si spezza il tenditore** di una carrozza oppure di un carro, **si sgancia** anche la condotta pneumatica e la fuoriuscita dell'aria fa **frenare automaticamente** le due parti del convoglio che si sono distaccate (il tenditore è l'organo di unione dei veicoli). Tale **freno pneumatico**, infatti, è denominato "**freno continuo automatico**" proprio perché si **estende con continuità** su tutto il convoglio e **interviene in modo automatico** a seguito di uno spezzamento.

Va precisato, a onor del vero, che lo spezzamento di un treno viaggiatori è abbastanza **accademico** mentre è spesso **realtà** sui treni merci, soprattutto sulle linee in salita come la tratta di Valico del Frejus in presenza di treni spinti (trippla trazione).

La **frenatura elettrodinamica** è quindi una **sovrapposizione** alla **frenatura pneumatica** e poiché **non ha** la stessa **affidabilità** non se ne tiene conto ai fini del **calcolo dell'efficacia frenante**.

La frenatura elettrodinamica, inoltre, spesso da sola **non è in grado** di garantire il **rispetto dello spazio di arresto** per cui la **frenatura pneumatica** rimane **prioritaria**. In compenso, come si vedrà, in **discesa** la sola **frenatura elettrodinamica** a certe **condizioni** può **trattenere** il treno e, se la locomotiva frena anche a **recupero di energia** e la linea è ricettiva, può permettere anche il **recupero parziale** dell'energia spesa per la **salita**.



Figura 4

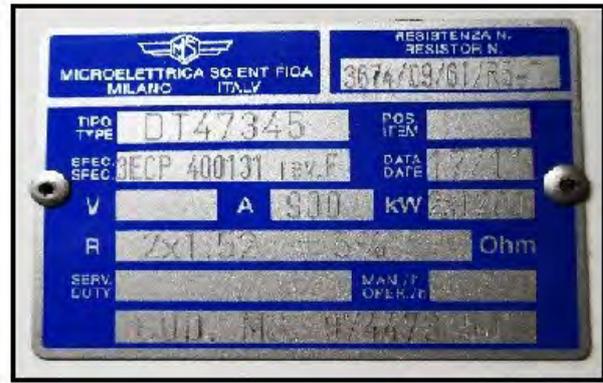


Figura 5

Come per la **trazione**, anche per la **frenatura elettrodinamica** è possibile stabilire delle **caratteristiche meccaniche di frenatura**.

Contrariamente alla trazione, però, in frenatura esistono almeno **tre caratteristiche** riconducibili alla tecnologia, alle scelte progettuali/costruttive e/o di utilizzo commerciale.

Inoltre il mezzo di trazione ha **due modalità** di funzionamento in base alla destinazione d'uso finale della corrente prodotta:

- **dissipazione** sul reostato di bordo,
- **immissione in catenaria** e quindi recuperata.

Il **problema** principale del **reostato** è l'**ingombro** e il **peso**. Nelle **prime** locomotive attrezzate con la **frenatura elettrodinamica** il reostato era posizionato sul **tetto** ed era **ventilato** per via **naturale** col movimento del mezzo.

Tale sistema si è rivelato nel tempo assolutamente **inadeguato** con una ventilazione insufficiente (soprattutto alle basse velocità) che causava continui guasti riconducibili all'**interruzione elettrica** del reostato.

L'esperienza ha portato successivamente a reostati **chiusi** in **cassoni** oppure **torri** con **motori di raffreddamento** che a loro volta, però, sono ulteriore fonte di **peso** e **ingombro**.

Nella fig.4 è possibile osservare un reostato posizionato **sul tetto** di una locomotiva di vecchia costruzione mentre nella fig.5 la targhetta di un reostato di frenatura **ventilato**.

**Peso** e **ingombro** del **reostato**, spesso, determinano la **potenza massima dissipabile** e quindi **generabile** dai motori di trazione in fase di **frenatura elettrodinamica**. L'ideale sarebbe quindi riversarla a **recupero** in catenaria ma, come analizzato successivamente, **non sempre** questo è possibile.

Anche nella grande maggioranza dei grafici dello **sforzo di frenatura**  $SF_C$  è possibile individuare, **come per la trazione**, un'area **dell'aderenza** e una **della potenza**.

Le locomotive, al **fine della frenatura elettrodinamica**, si possono ricondurre sommariamente, anche se in maniera **non** esaustiva, in **tre gruppi principali**:

► **Gruppo 1**

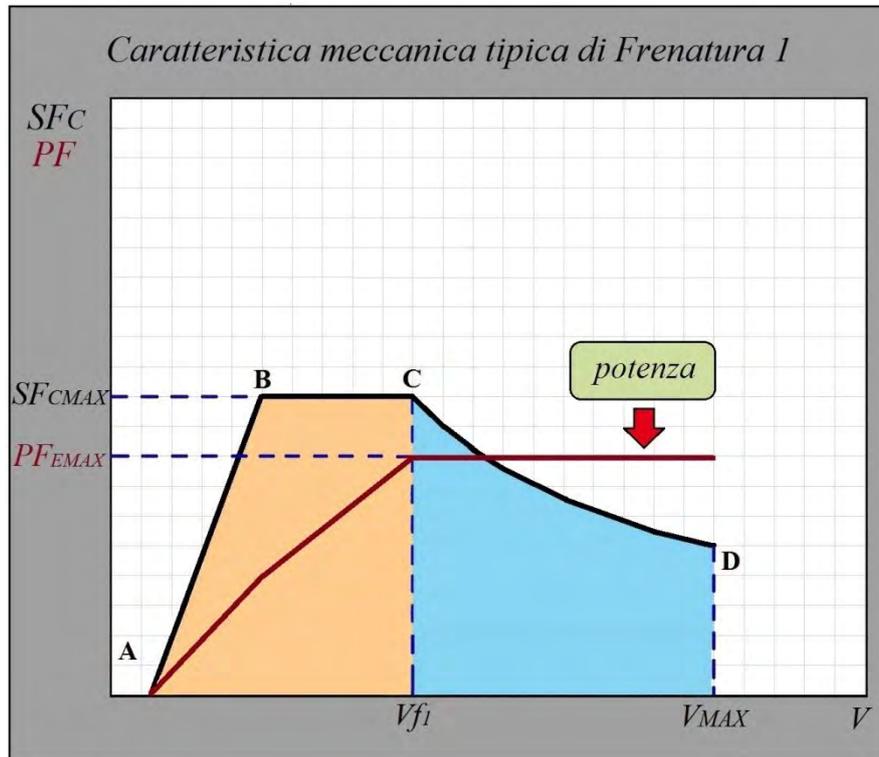


Grafico 9

► Lo **sforzo di frenatura elettrodinamica**  $SF_C$  sale **progressivamente** da **zero** sino a un valore  $SF_{CMAX}$  **massimo** (tratta A-B) poi si mantiene **costante** a causa **dell'aderenza** (tratta B-C) e successivamente **diminuisce** (tratta C-D).

► La **potenza** elettrica sale da **zero** fino a quella **massima**  $PF_{EMAX}$ , quindi inizia la zona a **potenza costante**. La potenza  $PF_{EMAX}$  **equivale** generalmente a quella **massima dissipabile** elettricamente dal reostato. Se la locomotiva lo permette, e la linea è ricettiva, tale potenza invece di essere persa sul reostato è **riversata in catenaria**.

Il punto **A** **tende** a velocità zero per le moderne locomotive a motori trifase mentre è più alto su quelle con i vecchi motori in corrente continua (indicativamente  $30 \text{ km/h}$ ).

Sono di questo gruppo, ad esempio, le locomotive del **TGV Roséau**, **BB36.000**, **E633**, **E652**.

► Gruppo 2

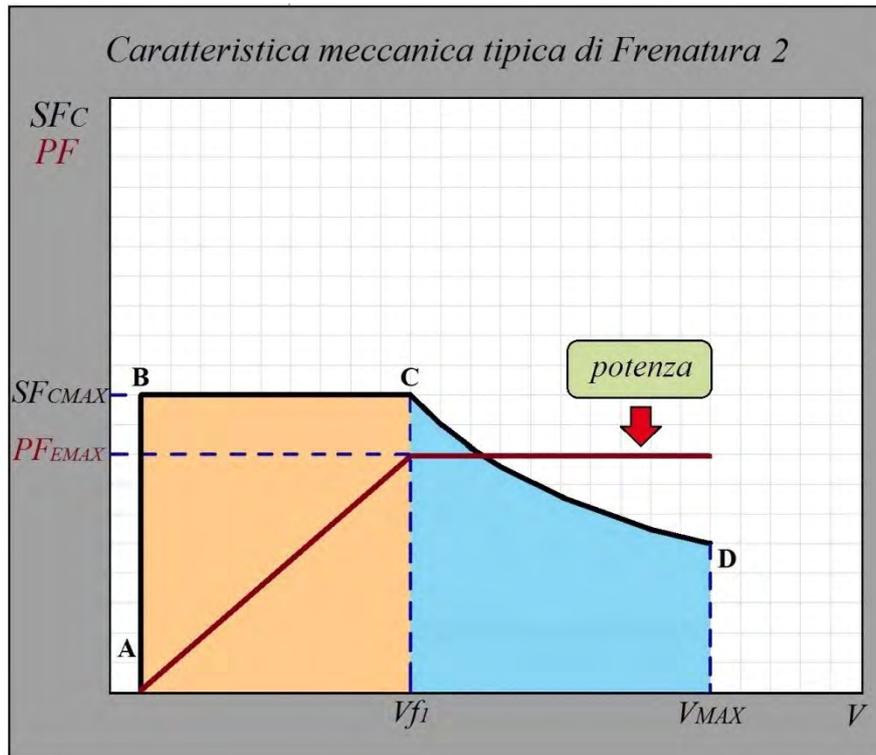


Grafico 10

► Lo **sforzo di frenatura elettrodinamica**  $SF_C$  sale **repentinamente** da **zero** sino a un valore  $SF_{C_{MAX}}$  **massimo** (tratta A-B) poi si mantiene **costante** a causa **dell'aderenza** (tratta B-C) e successivamente **diminuisce** (tratta C-D).

► La **potenza** sale da **zero** fino a quella **massima**  $PF_{EMAX}$ , quindi inizia la zona a **potenza costante**. La potenza  $PF_{EMAX}$  **equivale** generalmente a quella **massima dissipabile** elettricamente dal reostato. Se la locomotiva lo permette, e la linea è ricettiva, tale potenza invece di essere persa sul reostato è **riversata in catenaria**.

Il punto A **tende** a velocità zero e comunque si mantiene normalmente al di sotto dei 15 km/h.

Sono di questo gruppo, ad esempio, la locomotiva **E464**, **l'ETR1000** e **l'ETR500** (l'ETR500 dispone di **due curve** a potenza costante a seconda che operi nella condizione reostatica o di recupero).

► Gruppo 3

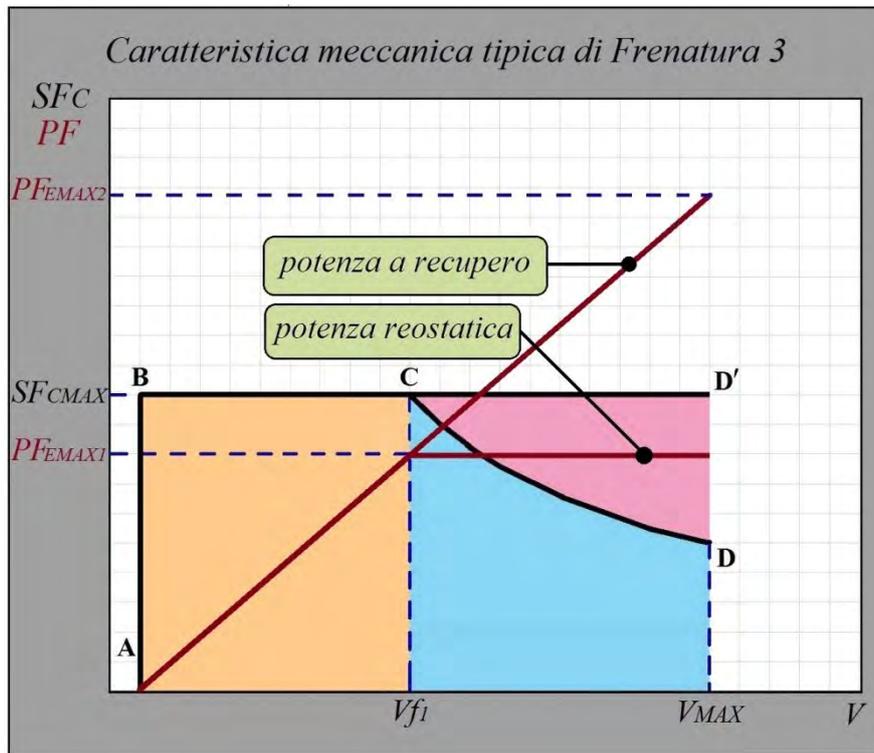


Grafico 11

► **Linea non ricettiva:** lo sforzo di frenatura elettrodinamica  $SF_C$  sale **repentinamente** da **zero** sino a un valore  $SF_{C_{MAX}}$  **massimo** (tratta A-B) poi si mantiene **costante** a causa **dell'aderenza** (tratta B-C) e successivamente **diminuisce** (tratta C-D). Anche la **potenza** sale da **zero** fino a quella **massima**  $PF_{EMAX1}$ , quindi inizia la zona a **potenza costante**. La potenza  $PF_{EMAX1}$  **equivale** generalmente a quella **massima dissipabile elettricamente dal reostato**.

► **Linea ricettiva:** lo sforzo di frenatura elettrodinamica  $SF_{C_{MAX}}$  si mantiene **costante** anche oltre al punto C fino al valore  $D'$  corrispondente alla velocità massima  $V_{MAX}$ . Anche la **potenza continua a salire** da  $PF_{EMAX1}$  fino a  $PF_{EMAX2}$ , valore che **equivale** approssimativamente a quello **massimo della macchina in trazione**.

Il punto A **tende** a velocità zero e comunque si mantiene normalmente al di sotto dei 15 km/h.

Sono di questo gruppo, ad esempio, le **E412** e le **BR186 TRAXX**.

A prescindere da tutte le altre condizioni che la richiedano, la **frenatura pneumatica dovrà comunque essere utilizzata** al raggiungimento del punto **A** qualora si debba portare il treno a **velocità zero**, cioè quando la frenatura elettrodinamica **cessa ogni effetto** (o per tipo di tecnologia o per evitare interferenze tra le due frenature).

Si noti che, nella **marcia reale** del treno, i grafici suddetti si comportano alla **rovescia** rispetto al consueto **senso di lettura** poiché si parte da una **velocità alta** e per effetto della **frenatura** ci si porta progressivamente al **valore zero**.

Nella tab.4 sono riportati in **trazione** e in **frenatura** gli **sforzi** e le **potenze massime** di alcuni mezzi di trazione.

Locomotiva	Sforzo traz.	Sforzo fren.	Potenza traz.	Potenza frenatura Max kW		Tensione	Vmax km/h	Utilizzo
	Max kN	Max kN	Max kW	reostato	recupero			
E633	287	-80	4.905	-2.150		3 kVcc	130	merci
E652	285	-80	5.775	-2.200		3 kVcc	160**	
BB36.000*	320	-130	5.600	-2.950		3 kVcc	120	
BR186 TRAXX	300	-145	5.600	-2.600	-5.600	3 kVcc	140	
E412	300	-130	6.000	-2.700	-6.000	3 kVcc	200	
E464	200	-85	3.500	-2.350		3 kVcc	160	regionali
TGV Réseau (2 loc.)	220	-145	8.750	-7.536		25 kVca 50 Hz	320	AV
ETR500 PLT (2 loc. E404)	340	-168	8.800***	-7.500	-8.800	25 kVca 50 Hz	300	
ETR1000	370	-305	9.800	-10.500		25 kVca 50 Hz	350	
* BB36.000 frena anche a recupero solo in modalità 25 kVca 50 Hz. A 3 kVcc e 1,5 kVcc solo reostatico.								
** in atto il cambio rapporto ingranaggi con trasformazione a velocità massima di 120 km/h.								
*** La potenza a 25 kVca 50 Hz è limitata a 6.600 kW per questione di peso del trasformatore: la limitazione avviene solo ad olio di raffreddamento caldo. Tale condizione si ha solo in seguito a lunghe tratte in salita.								

Tabella 4

A causa della **diminuzione del coefficiente di aderenza  $f$  all'aumentare della velocità**, in caso di **frenatura ad alte velocità**, possono insorgere **problemi di aderenza** del mezzo.

In questo caso si tende a lasciare al **massimo** lo sforzo di **frenatura** ottenuto con la **frenatura elettrodinamica** (quindi l'eventuale recupero di energia) e **diminuire**, in modo automatico, quello applicato con la **frenatura pneumatica**.

Nel grafico 12 è possibile osservare tale **modalità operativa** associata all'ETR 1000 da cui si evince che la **riduzione** dello **sforzo di frenatura** per opera del sistema **pneumatico** è attuato alla velocità di 230 km/h.

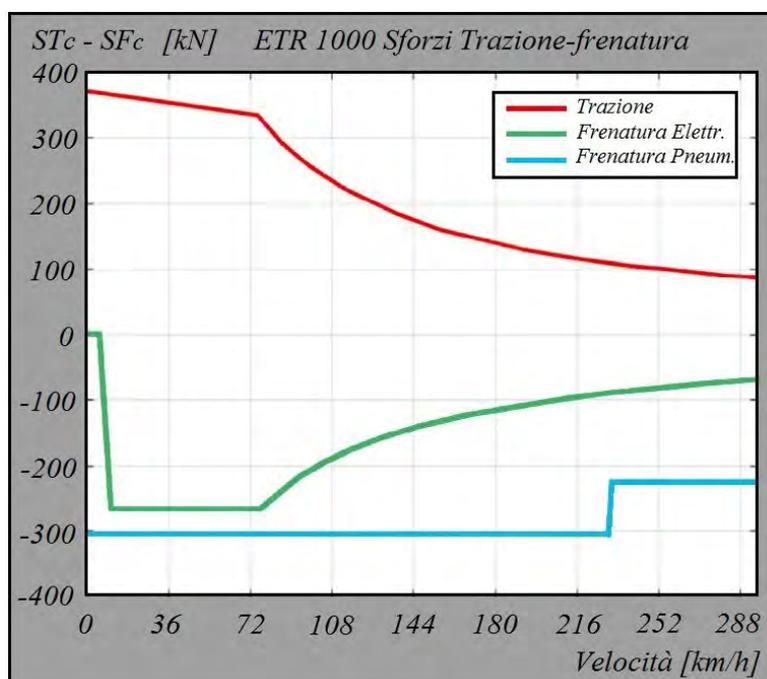


Grafico 12

► **In conclusione:**

la "caratteristica meccanica di frenatura" riporta l'andamento dello sforzo di frenatura al cerchione  $SF_c$  in relazione alla velocità di marcia  $V$  e si differenzia per gruppi di locomotive.

### 3.3 ► Sforzo di trazione e velocità massima raggiungibile da un convoglio

Sovrapponendo la curva  $\Sigma R f(V)$  di resistenza globale alla trazione alla caratteristica meccanica  $ST_C f(V)$  della locomotiva che lo traina è possibile ottenere il grafico 13.

Per una determinata velocità  $V_x$ , facendo la differenza fra i due corrispondenti punti sull'asse dell'ordinata delle curva dello sforzo di trazione  $ST_{Cx}$  e della curva di resistenza al moto  $\Sigma R_x$ , si ottiene il valore della forza acceleratrice  $F_{ax}$  alla velocità  $V_x$ .

Tale sforzo acceleratore, necessario per portare in velocità un treno di massa  $M$ , diminuisce con l'aumentare della velocità stessa fino a esaurirsi alla velocità  $V_{MAX}$  dove lo sforzo di trazione e la forza resistente si eguagliano per cui:

$$ST_C = \Sigma R \quad \blacktriangleright \quad F_a = 0$$

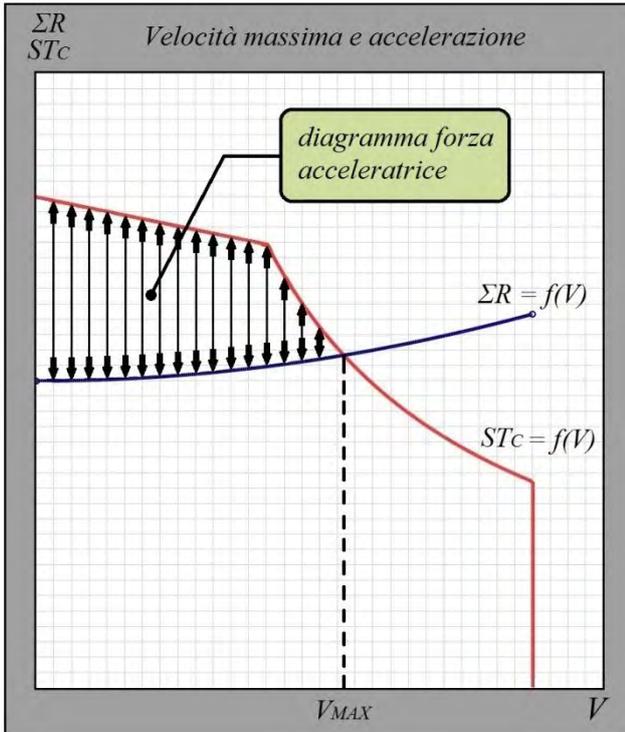


Grafico 13

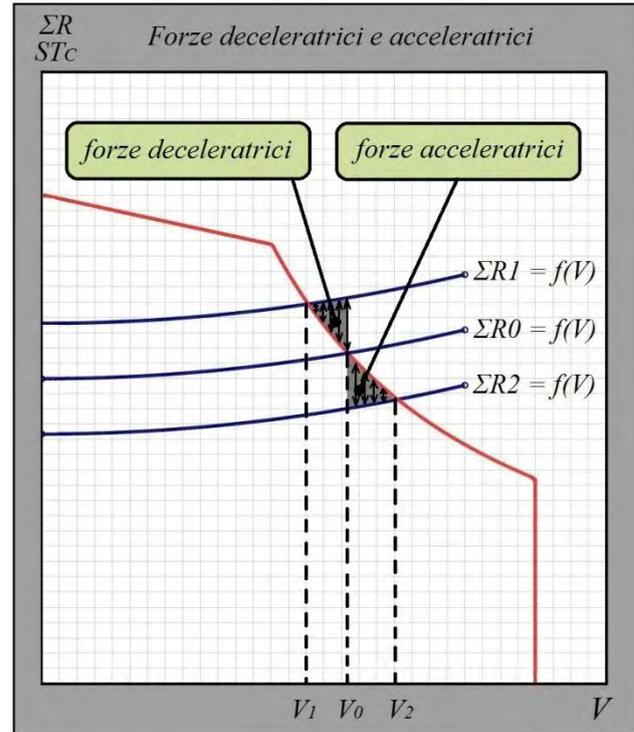


Grafico 14

Cessata la **forza acceleratrice**, il **moto** diventa **uniforme** avendo raggiunto la **massima velocità possibile**  $V_{MAX}$  che vale:

$$V_{MAX} = \frac{3,6 PW_{MC}}{\Sigma R} = \frac{3.600 PW_{MC}}{M_T \cdot \Sigma r} = \frac{3.600 PW_{MC}}{M_T \cdot (r_v + r_g + \rho)} \quad [km/h]$$

dove:

$PW_{MC}$  = potenza meccanica al cerchione [kW],

$\Sigma R$  = resistenza globale alla trazione [kN],

$M_T$  = massa totale del treno [t],

$r_v, r_g, \rho$  = resistenze unitarie dei veicoli, gravità e curve [N/t].

Dall'analisi delle formule precedenti si evince che la **velocità massima raggiungibile** è **direttamente proporzionale** alla **potenza** della **macchina** e **inversamente proporzionale** alla **massa** del **treno** e alle **resistenze** dei **veicoli**, **gravità** e **curve**.

Nel caso di più macchine si **sommano** sforzi di trazione e potenze.

Se a un treno che viaggia con resistenza al moto  $\Sigma R_0$  a velocità  $V_0$  viene ad **aumentare** ( $\Sigma R_1$ ) oppure a **diminuire** ( $\Sigma R_2$ ) la resistenza al moto (grafico 14), nasce una **forza deceleratrice** o **acceleratrice** che porta la **velocità** a un nuovo **equilibrio**, minore ( $V_1$ ) o maggiore ( $V_2$ ).

#### ► **In conclusione :**

- **sovrapponendo** la curva  $\Sigma R f(V)$  di **resistenza globale alla trazione** alla **caratteristica meccanica**  $ST_C f(V)$  della locomotiva che lo traina è possibile determinare la **velocità massima raggiungibile** dal **convoglio**,
- la **velocità massima** raggiungibile è **direttamente proporzionale** alla **potenza** della **macchina** e **inversamente proporzionale** alla **massa del treno**, alle **resistenze** dei **veicoli**, **gravità** e **curve**.

### 3.4 ► Considerazioni sulla caratteristica meccanica di trazione

Alla luce di quanto trattato finora, la **caratteristica meccanica di trazione** di questa **particolare forma** è considerata **ideale** perché:

- **sfrutta al massimo** le **caratteristiche** della **locomotiva**: dove lo  $ST_C$  è limitato dall'aderenza, si ha la forza limite di aderenza; dove lo  $ST_C$  è limitato dalla potenza si ha:

$$ST_{CX} \cdot V_X = PW_{EMAX} = costante$$

ossia si sfrutta la potenza massima del motore,

- è **stabile**: al variare della  $\Sigma R$  la velocità del treno trova un nuovo punto di equilibrio,
- se si fanno fermate ravvicinate **senza raggiungere** elevate velocità (treni regionali, metropolitani) **si sfrutta il primo tratto** della caratteristica meccanica dove lo **sforzo acceleratore** è **massimo**,
- solo **alcuni tipi** di **motori** hanno una **caratteristica meccanica simile**: i **motori elettrici a corrente continua** eccitati **serie** e i **motori sincroni e asincroni trifase** tramite l'impiego di **apparecchiature elettroniche** che agiscono su **tensione, frequenza e flusso**.

#### ► *In conclusione :*

la **caratteristica meccanica di trazione** di questa particolare forma è considerata **ideale**:

- perché sfrutta al massimo le caratteristiche della locomotiva,
- perché è stabile,
- perché se si fanno fermate ravvicinate si sfrutta il primo tratto della caratteristica meccanica dove lo sforzo acceleratore è massimo,
- perché solo alcuni tipi di motori hanno una caratteristica meccanica simile.

### 3.5 ► Sforzo di frenatura elettrodinamica e massima velocità contenibile di un convoglio

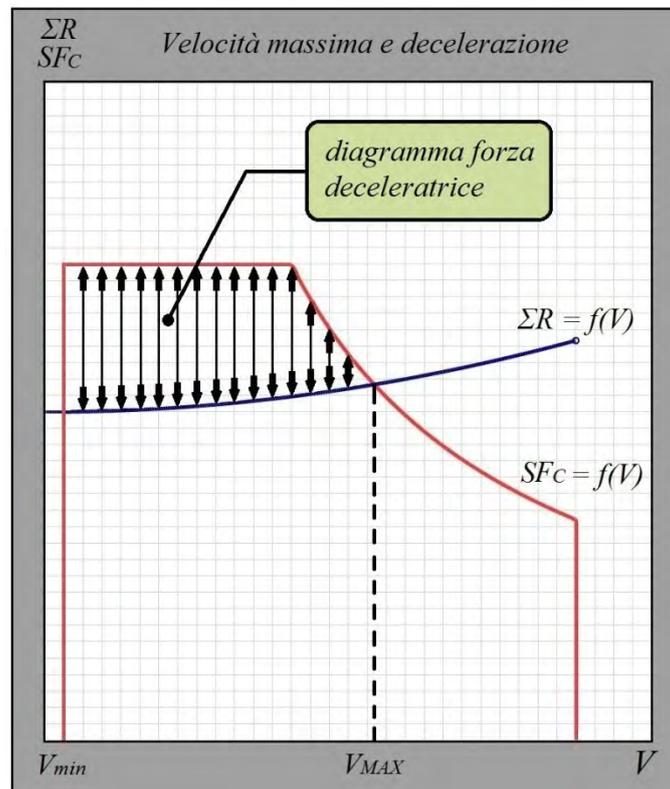


Grafico 15

Lo stesso grafico per sovrapposizione si può produrre con la frenatura elettrodinamica: nell'esempio del grafico 15 si è assunta la caratteristica di frenatura elettrodinamica del gruppo 2.

Adesso però, per velocità massima  $V_{MAX}$ , s'intende quella in cui locomotiva è in grado di trattenere il treno senza dover ricorrere all'ausilio della frenatura pneumatica: la forza inferiore a essa, ora, è deceleratrice.

### 3.6 ► Sforzo di trazione e frenatura elettrodinamica della locomotiva BB36.000

Poiché la locomotiva BB36.000 sarà utilizzata più avanti per moltissimi esempi, riporto i grafici dello sforzo di trazione e di frenatura elettrodinamica per maggiore e rapida comprensione di quanto sarà trattato.

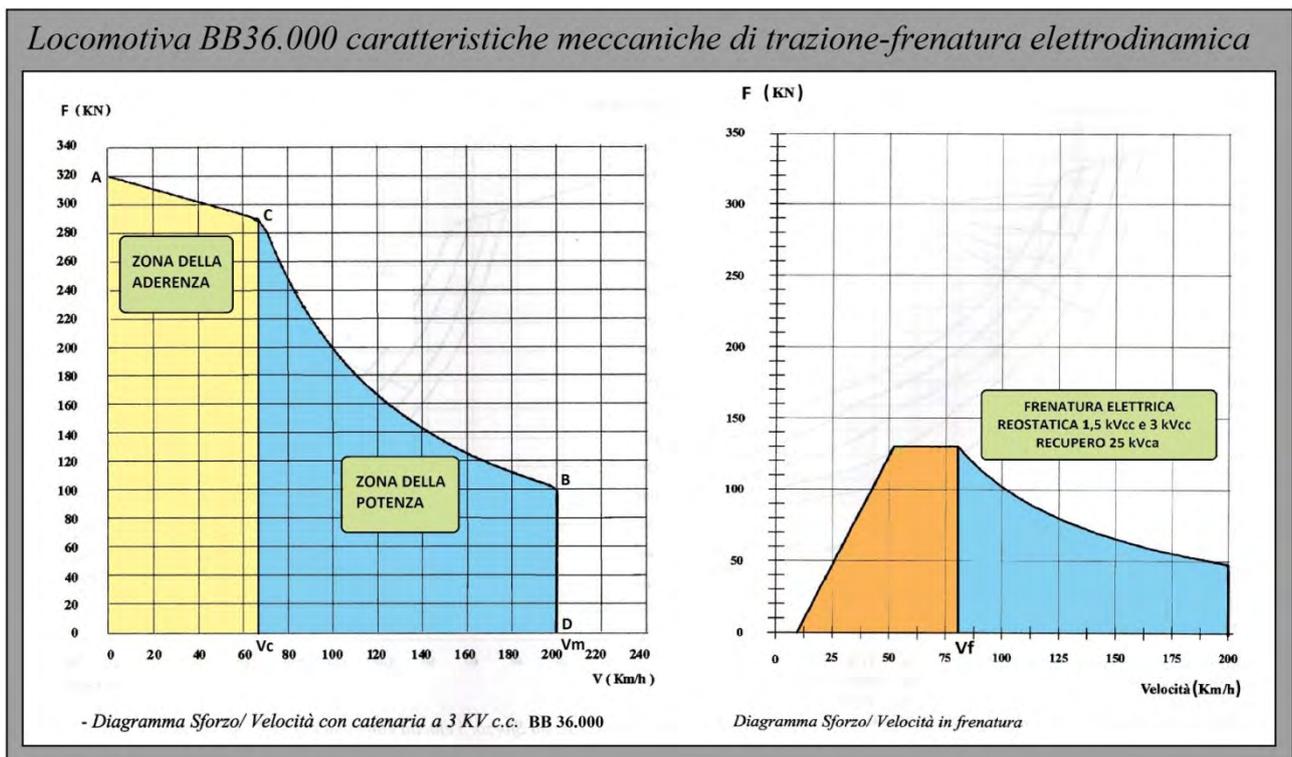


Grafico 16

## **PARTE QUARTA**

### **I PARAMETRI PRINCIPALI DELLA LOCOMOTIVA**

## 4.1 ► Prestazione della locomotiva

Alla base della **trazione ferroviaria** c'è la **prestazione della locomotiva** intesa in due modi:

- la **prestazione** di una locomotiva è il carico in **tonnellate** che essa può rimorchiare o eventualmente spingere, su un determinato tratto di linea, **garantendo il rispetto dell'orario programmato**,
- la **prestazione massima** di una locomotiva è il carico in **tonnellate** che essa può rimorchiare o eventualmente spingere su un determinato tratto di linea, **garantendo dopo l'arresto la ripresa della corsa da ogni punto con un minimo valore di accelerazione**.

I valori della **prestazione** e della **prestazione massima**, anche nel caso di più mezzi di trazione attivi, sono **determinati dalle imprese ferroviarie** interessate, secondo specifiche procedure che tengono conto delle caratteristiche dei mezzi di trazione e delle caratteristiche delle linee da percorrere, valutate anche la stagionalità e le condizioni di circolazione degradate.

La **Direzione Tecnica di RFI** può imporre **limitazioni temporanee** alla **prestazione massima** di taluni mezzi di trazione in caso di **anormalità** all'infrastruttura ferroviaria.

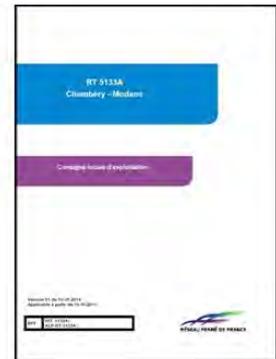
Analogamente, al fine di preservare la regolarità dell'esercizio ferroviario, le Direzioni Tecniche comunicano alle imprese ferroviarie ogni altra informazione utile per il **ricalcolo delle prestazioni massime** dei mezzi di trazione in caso d'istituzione di rallentamenti o di abbassamenti archetti programmati su tratti di linea particolarmente acclivi.

Il valore della **prestazione massima** delle locomotive è riportato in **apposite tabelle** suddivise in **sezioni di carico** e inserite nei **fascicoli linea**.

I **fascicoli linea** sono una pubblicazione di **RFI** (Rete Ferroviaria Italiana) e **RFF** (Rete Ferroviaria Francese - ora nuovamente **SNCF**) componente l'Orario di Servizio e destinata ad accogliere le **caratteristiche dell'infrastruttura ferroviaria** cui è riferito. La linea *Modane/Susa – Torino* è contenuta nel Fascicolo Linea 2 (d'ora in avanti *FL2*), la *Chambery – Modane* nel Renseignements Techniques 5133A, 5133B, 5133C (d'ora in avanti *RT5133 A, B, C*).

Messageries, ME 120, ME 100 et marchandises MA 100				
Série de machines	Sens impair			
	Parcours Chambéry - St Avre la Chambre	St Avre la Chambre - St Jean de Maurienne	St Jean de Maurienne - Modane	
26000	1450	1300 (6)	560	BB 36.000 - 1 LOC BB 36.000 - 2 LOC
36000 36300	1450	1300 (6)	600 (1)	
36000UM 36300UM	1895	1600 (5)	1150 (2)	
27000 27000-MIDI 37000 PRIMA3U-15B	1475	1290	570	
27000UM 27000- MIDIUM PRIMA3U-15BUM	1895	1600 (5)	950	
E402B	1150	740	390	
TRAXXF140-MS-KL	-			
Limite de ré- sistance des attelages standards	85t	1895	1600 (5)	1150 (2)
	135t	3120	2630	1960

(1) 620 t pour les trains dont la longueur est supérieure à 300 m  
 (2) 1250 t pour les trains de l'AFA tractés par une UM de 36000  
 (3) 620 t pour les trains composés entièrement de véhicules porte-autos chargés  
 (4) intensité moteur maximale 1500 A pour l'UM de tête  
 (5) 1800 t pour les trains dont la longueur ne dépasse 560 m. Toutefois, en cas d'arrêt entre les km 207,200 et 207,940, le conducteur doit, lorsque la masse de son train est supérieur à 1600 t :  
 - Soit monter le train en deux parties  
 - Soit demander le secours par l'arrière  
 (6) renfort obligatoire (le secours doit être demandé) en cas d'arrêt entre les km 207,200 et 207,940 lorsque la masse du train dépasse 1170 t  
 (7) 1000 t de Saint Jean de Maurienne à Saint Michel Valloire



TORINO P.N. - MODANE FX	E633	E652	BB36000	E464
TORINO P.N. - QUADRIVIO ZAPPATA	1990	2010	1910	1360
QUADRIVIO ZAPPATA - TO S. PAOLO	1600	1600	1420	1010
TO S. PAOLO - BIVIO PRONDA	1430	1500	1420	1010
ORBASSANO - B. PRONDA	1770	1850	1760	1250
BIVIO PRONDA- BUSSOLENO	1430	1500	1420	1010
BUSSOLENO- BARDONECCHIA	700	730	700	490
BARDONECCHIA - km 85.425 (km1)	650	700	650	410
km 85.425 (km1) - MODANE FX	3810	3960	3750	2960

MODANE FX - TORINO P.N.	E633	E652	BB36000	E464
MODANE FX - MODANE	1530	1600	1520	1080
MODANE - CONFINE FRANCESE	650	700	650	460
CONFINE FRANCESE-BUSSOLENO	4520	4700	4450	3190
BUSSOLENO-BIVIO PRONDA	2310	2410	2290	1640
BIVIO PRONDA- TO S. PAOLO	2310	2410	2290	1640
BIVIO PRONDA-TORINO ORBASSANO	1770	1850	1760	1250
TO S. PAOLO-QUADRIVIO ZAPPATA	1930	2010	1910	1360
QUADRIVIO ZAPPATA-TORINO P.N.	2310	2410	2290	1640

Figura 6

Nell'FL 2 RFI e RT5133 RFF sono contenute le **prestazioni massime** delle locomotive in uso sulla **tratta di Valico del Frejus**: in fig.6 vi è un **estratto** di tali **prestazioni** lato *Italia e Francia* dove in **giallo** è evidenziato il tratto di linea che **più penalizza** la **massa rimorchiata**.

Fatte salve tutte le **eccezioni** precedenti circa le varianti per la determinazione delle prestazioni, è possibile calcolare a quanto ammonta la **normale** prestazione massima di una locomotiva su una determinata linea.

Essa vale:

$$PR_{MAX} = \frac{1.000 \cdot ST_{CMAX}}{\Sigma R_{AVV}} - M_{LOC} = \frac{1.000 \cdot M_A \cdot f \cdot g}{\Sigma R_{AVV}} - M_{LOC} \quad [t]$$

dove:

$ST_{CMAX}$  = sforzo di trazione massimo ai cerchioni [kN],

$M_{LOC}$  = massa locomotiva [t],

$M_A$  = massa aderente locomotiva [t],

$f$  = coefficiente d'aderenza per rotaie umide  $f = 0,25$  per  $V = 0$  [adimensionale],

$\Sigma R_{AVV}$  = somma delle resistenze al moto all'avviamento [N/t].

La **somma delle resistenze al moto, all'avviamento**, è formata da:

$$\Sigma R_{AVV} = r_g + r_v + \rho + r_i \quad [N/t]$$

dove:

$r_g$  = resistenza unitaria dovuta alla gravità intesa come:  $r_g = g \cdot i \quad [N/t]$ ,

$r_v$  = resistenza unitaria dovuta ai veicoli  $[N/t]$ ,

$\rho$  = resistenza unitaria dovuta alle curve  $[N/t]$ ,

$r_i$  = resistenza d'inerzia  $[N/t]$ .

La **resistenza d'inerzia**, per una serie di considerazioni che **esulano** da questo elaborato, equivale a:

$$r_i = 1000 \cdot a \quad [N/t]$$

dove:

$a$  = accelerazione voluta  $[m/s^2]$

quindi:

$$PR_{MAX} = \frac{1.000 \cdot ST_{CMAX}}{\Sigma R_{AVV}} - M_{LOC} = \frac{1.000 \cdot M_A \cdot f \cdot g}{r_g + r_v + \rho + r_i} - M_{LOC} \quad [t]$$

Le **accelerazioni** sono assunte **arbitrariamente** in base **all'esperienza** e, **attualmente**, hanno valori notevolmente **più bassi** del **passato**. Questo perché le **moderne locomotive ad azionamento elettronico** non soffrono più del problema legato al **tempo d'esclusione del reostato**, evento che invece affliggeva in modo negativo le vecchie locomotive. **Indicativamente** i valori di " $a$ " vanno da 0,1 a 0,01  $m/s^2$ : i valori più **alti** sono per i **treni viaggiatori ordinari** quelli più **bassi** per i **merci**. Nulla vieta però, valutati materiali, linea, circostanze e quant'altro l'utilizzo di diversi valori di  $a$ , come ad esempio il Frecciarossa 1000 che presenta **all'avviamento** una  $a \geq 0,7 m/s^2$ .

► **In conclusione:**

la **prestazione massima** di una locomotiva è **direttamente proporzionale** allo **sforzo di trazione massimo** ai cerchioni all'avviamento  $ST_{CMAX}$  e **inversamente** alle forze **resistenti** dovute alla gravità  $r_g$ , all'avanzamento  $r_v$ , alle curve  $\rho$  e all'inerzia  $r_i$ . A **parità** degli altri parametri, quindi, la **prestazione dipende principalmente** dall'**accelerazione  $a$**  che si desidera **arbitrariamente** lasciare disponibile per l'avviamento.

## 4.2 ► Rapporto di trasmissione della locomotiva

La **rotazione** dei **motori** sui mezzi **elettrici** è **trasmessa** comunemente alle **ruote** per mezzo **d'ingranaggi**.

Il **rapporto** tra il numero dei **denti** del **pignone motore** e quello della **corona** **solidale all'asse** delle **ruote** è detto **rapporto di trasmissione**.

$$T = \frac{\text{denti pignone}}{\text{denti corona}} \quad [\text{adimensionale}]$$

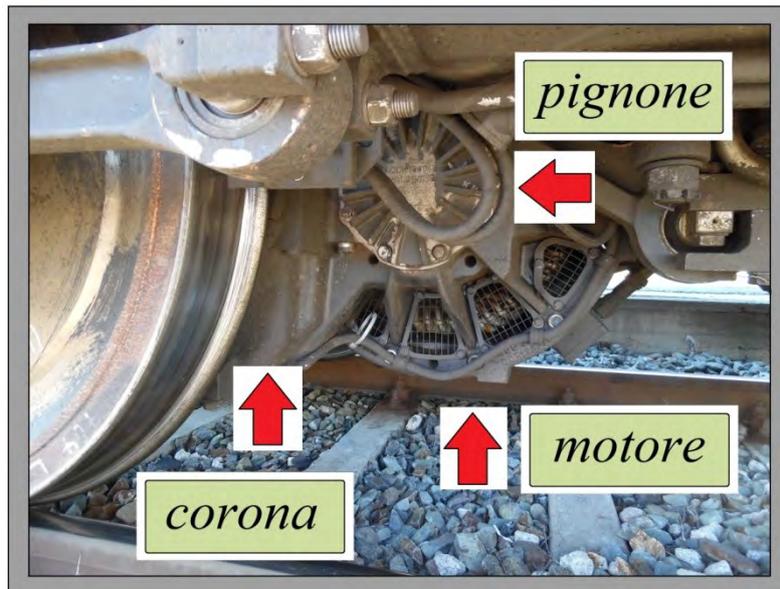


Figura 7

Nei **mezzi elettrici** questo **rapporto** è **fisso** grazie alle particolari caratteristiche di **coppia** del motore elettrico che **non richiede cambi marcia** come per i motori **termici** che invece necessitano di **variare** più volte la coppia tra **motori** e **ruote**. Esso, data una certa **potenza del mezzo**, è scelto in base allo **sforzo di trazione** al cerchione  $ST_c$  e la **velocità di marcia** desiderata.

Infatti:

$$V = \frac{2\pi}{60} \cdot R_R \cdot n_m \cdot T \quad [m/s]$$

dove:

$R_R$  = raggio delle ruote [m],

$n_m$  = giri del motore [giri/minuto],

$T$  = rapporto trasmissione [adimensionale],

Ricordando che:

$$ST_C = \frac{PW_{MC}}{V} \quad [kN]$$

è evidente che, a **parità di potenza**, se il **rapporto di trasmissione** fa **umentare** la **velocità**, di pari passo **diminuisce** lo **sforzo di trazione** (e viceversa).

Ricordando inoltre che:

$$PR = \frac{1.000 \cdot ST_C}{\Sigma R} - M_{Loc} \quad [t]$$

variando lo **sforzo di trazione**, a **parità di  $\Sigma R$** , varia anche la **prestazione**.

In particolare, se il **rapporto ingranaggi sale**, **umentano** lo **sforzo di trazione** e la **prestazione** mentre **scende** la **velocità di marcia** (e viceversa).

I rapporti di trasmissione sono normalmente compresi tra 1:2 e 1:3.

#### ► *In conclusione:*

- a **parità di potenza**, se il **rapporto di trasmissione diminuisce**, **umenta** la **velocità** ma di pari passo **diminuisce** lo **sforzo di trazione** (e viceversa),
- variando lo **sforzo di trazione**, a **parità di  $\Sigma R$** , varia la **prestazione**. In particolare se il **rapporto ingranaggi sale**, **umentano** lo **sforzo di trazione** e la **prestazione** ma **scende** la **velocità di marcia** (e viceversa).

### 4.3 ► La potenza della locomotiva

La **quantificazione della  $\Sigma R$**  è il primo passo per **determinare la potenza necessaria** al mezzo di trazione per **muovere il treno** alle condizioni volute e quindi, in ultima analisi, **l'energia consumata** in trazione oppure quella **recuperabile** in fase di **frenatura elettrodinamica**. Dal punto di vista **fisico** (per quanto riguarda specificatamente i mezzi di trazione se ne parlerà più avanti) la **potenza meccanica al cerchione**  $PW_{MC}$  per muovere un treno che presenti una data  $\Sigma R$  a una certa velocità costante  $V$  è:

$$PW_{MC} = \Sigma R \cdot V \quad [kW]$$

dove:

$\Sigma R$  = resistenza globale alla trazione [ $kN$ ]

$V$  = velocità [ $m/s$ ]

In **trazione** la **potenza meccanica** dei motori è ottenuta **a spese** di quella **elettrica** assorbita dalla linea mentre in fase di **frenatura elettrodinamica** avviene **l'inverso**. **Tralasciando** per ora la questione dei **rendimenti**, si può affermare che potenza elettrica assorbita/ceduta dalla catenaria  $PW_{EC}$  e meccanica al cerchione  $PW_{MC}$  **si eguagliano sempre tra di loro**.

Ricordando che la potenza elettrica vale:

$$PW_{ECT} = V_{CT} \cdot I_{CT} \quad [kW]$$

dove:

$V_{CT}$  = tensione della catenaria [ $kV$ ]

$I_{CT}$  = corrente da/verso la catenaria [ $A$ ]

si può scrivere:

$$V_{CT} \cdot I_{CT} = \Sigma R \cdot V$$

Dal **punto di vista** della **locomotiva**,  $\Sigma R$  non è altro che lo **sforzo di trazione richiesto** a livello di cerchione (ruote), in altre parole  $ST_C$ .

Quindi:

$$V_{CT} \cdot I_{CT} = ST_C \cdot V$$

**Tensione di linea, corrente di linea, velocità e sforzo di trazione** sono tutti parametri evidenziati tramite **appositi strumenti** a bordo delle moderne locomotive per consentire la **corretta** condotta del treno.

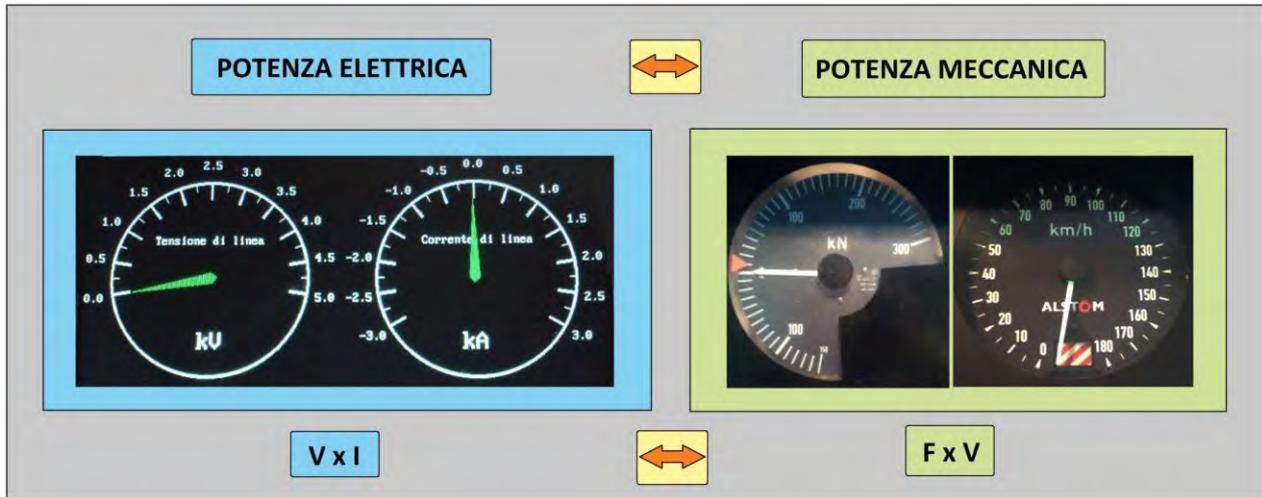


Figura 8

Si noti, dalla fig.8, che gli **strumenti** "corrente di linea **kA**" e "sforzo di trazione **kN**" presentano sia valori **positivi** sia **negativi**: quelli **positivi** si hanno nella fase di **trazione** della locomotiva, quelli **negativi** in fase di **frenatura elettrodinamica**.

**N.B.** ► Per **convenzione**, al solo fine di **distinguerli** agevolmente, la **corrente**, la **potenza** e l'**energia** sono assunti **positivi** in fase di **trazione** e **negativi** in fase di **frenatura elettrodinamica**.

In **movimento** vi sono **tre** condizioni di **funzionamento** della **locomotiva**:

- > **fuori trazione**:  $PW_{MC}$  e  $PW_{ECT}$  entrambe a zero,
- > **in trazione**: trasformazione  $PW_{ECT} \blacktriangleright PW_{MC}$ ,
- > **in frenatura elettrodinamica**: trasformazione  $PW_{MC} \blacktriangleright PW_{ECT}$ .

Le considerazioni sulle potenze  $P_{ECT}$  e  $P_{MC}$ , esaminate qui in veste teorica, a **bordo** delle locomotive sono **velocemente verificabili** semplicemente **moltiplicando** opportunamente a 2 a 2 i valori misurati dai 4 strumenti di bordo della fig.8 (i due valori  $PW_{ECT}$  e  $PW_{MC}$  in realtà differiranno **leggermente** a causa dei **rendimenti** del mezzo di trazione).

$$PW_{ECT} = PW_{MC} \quad \blacktriangleright \quad V_{CT} \cdot I_{CT} = F \cdot V \quad [kW]$$

con:

$V_{CT}$  = tensione catenaria [kV],

$I_{CT}$  = corrente catenaria [A],

$F$  = forza [kN],

$V$  = velocità [m/s] (dove  $m/s = Vkm/h : 3,6$ ).

Le **potenze** che caratterizzano una locomotiva sono **tre**. Dalla più alta alla più bassa:

- **avviamento**: potenza che si può richiedere solo in fase di avviamento,
- **oraria**: potenza che si può richiedere per un'ora partendo da una locomotiva a temperatura ambiente,
- **continuativa**: potenza che si può richiedere per un tempo indefinito.

Queste **potenze** sono dette "**al cerchione**", ovvero **al netto del rendimento della locomotiva**, per cui quelle **realmente disponibili** per la trazione e sono legate alla possibilità di **smaltimento del calore** delle macchine.

Nella tabella 5 sono riportate le potenze di alcuni mezzi di trazione, l'anno di costruzione, le tensioni di funzionamento, la tecnologia di controllo dei motori di trazione ecc..

Per i rotabili politensione le potenze possono variare in base alla tensione di catenaria.

MEZZO DI TRAZIONE	TENSIONI ESERCIZIO	MASSA [t]	ANNI COSTRUZIONE	TECNOLOGIA	MOTORI	POTENZA MECCANICA [kW]	SFORZO DI TRAZIONE MASSIMO [kN]	SFORZO F. ELETTRICA MASSIMO [kN]	POSTI A SEDERE	VELOCITA' MASSIMA [km/h]	UTILIZZO COMMERCIALE
E633	3 kVcc	102	1979-1987	Chopper	corrente continua	4.905 PMCO	285	80 Reostatica		130	merci
E652	3kVcc	106	1990-1996	Chopper	corrente continua	5.775 PMCO	285	85 Reostatica		160	merci
BB36.000	3kVcc 1,5kVcc 25kVca 25Hz	89	1996-2003	inverter trifase	trifase asincroni	5.600 PMCC	320	130 Reo 1,5-3kV Rec 25kV		120 omologata Italia 220 omologata Francia	merci
E464	3kVcc	72	1999-2015	inverter trifase	trifase asincroni	3.500 PMCO	200	85 Recupero		160	regionali
TGV réseau tritensione	3kVcc 1,5kVcc 25kVca 25Hz	386 vuoto 416 carico	1993-1995	inverter trifase	trifase sincroni	8.750 PMCA 25 kVca 50 Hz; 3.880 PMCA 3 kVcc e 1,5 kVcc	212 1,5-3kVcc; 220 25kVca	145 Reostatica	344 (in origine 377)	320	lunga percorrenza e AV
ETR 1000	3kVcc 1,5kVcc 25kVca 25Hz 15kV 16,7 Hz	454 vuoto 501 carico	dal 2103	inverter trifase	trifase asincroni	9.800 PMCA 25 kVca 50 Hz; 6.900PMCA 3 kVcc e 15 kVca; 3.050 PMCA 1,5kV	370	305 25kVca; 266 3kVcc	457	360 a 25kVca 300 a 3kVcc e 16kVca 220 a 1,5kV	lunga percorrenza e AV

Tabella 5

## **PARTE QUINTA**

### **POTENZA E ENERGIA DELLA TRAZIONE**

## 5.1 ► Potenza

In termini pratici, se abbiamo un convoglio **in trazione** che percorre una tratta in **salita a velocità costante**:

$$V = 90 \text{ km/h} ,$$

$$ST_C = \Sigma R = 100 \text{ kN}$$

la **potenza meccanica** sarà:

$$P_{MC} = ST_C \cdot V = 100 \cdot (90/3,6) = 2.500 \text{ kW}$$

[nota: la velocità in *km/h* va convertita in *m/s* dividendo per 3,6]

Poiché si è premesso che in questa fase di analisi si **trascurano i rendimenti**, la potenza meccanica di 2.500 *kW* **sarà la stessa** assorbita in **forma elettrica** dalla **catenaria**.

La **corrente** assorbita dalla linea varrà quindi:

$$I_{CT} = \frac{PW_{ECT}}{V_{CT}} = \frac{2.500.000}{3.600} = 694 \text{ A}$$

In queste condizioni di marcia la strumentazione di bordo riportata in precedenza presenterà:

TRAZIONE			
Volt	Ampere	kN	Km/h
3600	+ 694	+ 100	90

Nel caso invece che il convoglio viaggi a **velocità costante** in una tratta in **discesa** avvalendosi solo della **frenatura elettrodinamica**:

$$V = 72 \text{ km/h} ,$$

$$SF_C = \Sigma R = -100 \text{ kN}$$

la **potenza meccanica** sarà:

$$PW_{MC} = SF_C \cdot V = -100 \cdot (72/3,6) = -2.000 \text{ kW}$$

In questo caso, sempre in virtù dell'uguaglianza  $PW_{ECT} = PW_{MC}$  (tralasciando rendimenti e autoconsumi vari) questa **potenza meccanica** di  $-2.000 \text{ kW}$  **sarà ceduta in forma elettrica** alla **catenaria**, in altre parole **recuperata** oppure **dissipata** su **reostato** in conformità ai casi che saranno esposti più avanti.

Supponendo che esistano le condizioni per un **intero trasferimento** alla **linea**, la corrente ceduta varrà:

$$I_{CT} = \frac{PW_{ECT}}{V_{CT}} = \frac{-2.000.000}{3.600} = -555 \text{ A}$$

In queste condizioni di marcia la strumentazione di bordo riportata in precedenza presenterà:

FRENATURA ELETTRODINAMICA			
Volt	Ampere	kN	Km/h
3600	-555	-100	75

## 5.2 ► L'energia

L'**energia assorbita** o **ceduta** attraverso la **catenaria** dal mezzo di trazione, per far percorrere a un treno di **velocità costante**  $V$  una determinata linea di **spazio**  $s$  in un **tempo**  $t$ , può essere **quantificata** attraverso **due differenti strade** che, ovviamente, portano al **medesimo risultato**.

Poiché è **prassi** nei **sistemi elettrici** utilizzare come **misura dell'energia** i **kWh** invece dei *joule*, *kilojoule* e *megajoule*, anche qui ne sarà fatto uso (un *kilowattora* è l'energia necessaria per fornire una potenza di 1 *kilowatt* in 1 *ora* di tempo).

quindi:

$$kWh = \frac{MJ}{3,6}$$

>  $MJ = \text{Megajoule}$

### 5.3 ► Energia assorbita o ceduta alla catenaria

Ripartendo dai dati del punto precedente:

$$V = 90 \text{ km/h} ,$$

$$ST_C = \Sigma R = 100 \text{ kN}$$

$$PW_{ECT} = PW_{MC} = 2.500 \text{ kW}$$

volendo calcolare **l'energia di trazione**  $E_T$  di tale convoglio che viaggi di velocità costante  $V$  per  $t = 12 \text{ minuti}$ , si avrà:

> **1° caso:** partendo dalla **potenza elettrica**  $P_E$  e dal **tempo di percorrenza**  $t$

$$E_T = \frac{PW_{ECT}}{60} \cdot t \quad [kWh]$$

dove:

$$PW_{ECT} = \text{potenza elettrica assorbita dalla catenaria} \quad [kW]$$

$$t = \text{tempo di percorrenza} \quad [\text{minuti}]$$

sostituendo:

$$E_T = \frac{2.500}{60} \cdot 12 = 500 \text{ kWh}$$

> **2° caso:** partendo dalla **resistenza globale alla trazione**  $\Sigma R$  o **sforzo di trazione** della locomotiva al cerchione  $ST_C$  (si ricorda che a velocità costante i due parametri coincidono) e dallo **spazio percorso**  $s$ .

$$E_T = \frac{\Sigma R \cdot S}{3.600} = \frac{ST_C \cdot S}{3.600} \quad [kWh]$$

dove:

$$ST_C = \Sigma R = \text{resistenza globale alla trazione o sforzo di trazione della locomotiva al cerchione} \quad [kN]$$

$$s = \text{spazio percorso} \quad [m]$$

Lo spazio, che non è un dato fornito, si calcola tramite la formula

$$S = \frac{60 \cdot V \cdot t}{3,6} \quad [m]$$

dove:

$V$  = velocità costante del convoglio [km/h]

$t$  = tempo di percorrenza [minuti]

quindi:

$$S = \frac{60 \cdot 90 \cdot 12}{3,6} = 18.000 \text{ m}$$

per cui:

$$E_T = \frac{\Sigma R \cdot S}{3.600} = \frac{100 \cdot 18.000}{3.600} = 500 \text{ kWh}$$

Quindi, un **treno** che percorre a **velocità costante** di 90 km/h una **tratta** di 18 km di una data linea fra le stazioni di *A* e *B* con lo **sforzo** di **trazione** al cerchione di 100 kN, **consumerà** 500 kWh di **corrente elettrica**.

Nel caso della **frenatura elettrodinamica**:

$V = 72 \text{ km/h}$ ,

$SF_C = \Sigma R = -100 \text{ kN}$

$PW_{ECT} = P_{MC} = -2.000 \text{ kW}$

$S = 18.000 \text{ m}$

$$E_T = \frac{PW_{ECT}}{60} \cdot t \quad [kWh]$$

dove:

$PW_{ECT}$  = potenza elettrica ceduta dalla catenaria [kW]

$t$  = tempo di percorrenza [minuti]

Calcoliamo il nuovo  $t$  per percorrere 18.000 m a 72 km/h:

$$t = \frac{S}{V} = \frac{18.000}{(72/3,6)} = 900 \text{ secondi ovvero } 15 \text{ minuti}$$

per cui:

$$E_T = \frac{-2.000}{60} \cdot 15 = -500 \text{ kWh}$$

► *In conclusione l'energia di trazione assorbita da un treno può essere calcolata:*

- partendo dalla **potenza elettrica assorbita** dalla linea  $PW_{ECT}$ : quest'approccio è agevole dal punto di vista pratico ma non teorico,
- partendo dalla **resistenza globale alla trazione**  $\Sigma R$ : quest'approccio è migliore per un calcolo teorico.

Certe locomotive di **costruzione molto recente**, come le Bombardier TRAXX F140 MS, è possibile conoscere l'energia **consumata** (blu) e quella **prodotta a recupero o reostatica** (marrone) dalla **messa in servizio** della locomotiva.



Figura 9

## 5.4 ► Ripartizione energetica nelle fasi di trazione e frenatura elettrodinamica di un treno

Sinteticamente **le energie** riferite a un treno sono **tre**:

- **$E_c$  ► l'energia cinetica** è l'energia che possiede un treno per il movimento che ha o che acquista: equivale al lavoro necessario per portare il treno da una velocità nulla a una velocità nota. Quando il treno di massa  $m$  varia la sua velocità, con questa varia anche la sua energia cinetica. Il lavoro equivale a questa variazione di energia cinetica.

In termini pratici:

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad [J]$$

Questa energia può essere recuperata in fase di frenatura elettrodinamica.

- **$E_p$  ► l'energia potenziale** di un treno è l'energia che esso possiede in seguito alla sua posizione in termini di altezza: alla forza di gravità corrisponde l'energia potenziale gravitazionale. Si può vedere tale l'energia potenziale come la capacità di un treno di trasformare la propria energia potenziale in energia cinetica in fase di discesa. Quando un treno di massa  $m$  è sollevato di un dislivello  $\Delta h$ , esso acquisisce energia potenziale che vale:

$$E_p = mg\Delta h \quad [J]$$

Nella discesa del treno questa energia si trasforma nuovamente in energia cinetica e può essere recuperata in fase di frenatura elettrodinamica.

- **$E_{PERSA}$  ► l'energia persa** è l'energia che si spende per vincere la resistenza all'avanzamento di un treno sommata a quella delle curve della linea e vale:

$$E_{PERSA} = M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot Spostamento \quad [J]$$

Tale energia non è recuperabile ed è interamente dissipata.

**N.B. ►** Il nome "**energia persa**" è per sottolineare che non è recuperabile dal punto di **vista economico**. Ovviamente **dal punto di vista fisico non è persa** ma si trasforma in **calore** a causa dei vari **attriti** (principio di conservazione dell'energia).

Un **treno** per **muoversi** in **piano** oppure in **salita**, sviluppa **energia di trazione**  $E_T$  che preleva sotto forma di **energia elettrica** dalla **catenaria**. Questa energia sarà ripartita, secondo i momenti, tra:

- $E_C$  ► in fase di **accelerazione** va a incrementare **l'energia cinetica** del convoglio,
- $E_P$  ► nelle tratte in **salita** per vincere la **forza di gravità**,
- $E_{PERSA}$  ► presente in **entrambe le fasi precedenti** per vincere la **resistenza all'avanzamento** di un treno sommata a quella delle **curve della linea**.

In termini pratici quindi:

1) ottenuto il **permesso alla partenza**, un treno in **pianura** assorbe:

- $E_C + E_{PERSA}$  ► energia elettrica per aumentare l'energia cinetica in fase di accelerazione e vincere la resistenza all'avanzamento sommata a quella delle curve della linea,

2) **raggiunta la velocità di marcia** programmata  $V$ , un treno in **pianura** assorbe:

- $E_{PERSA}$  ► energia elettrica per vincere la sola resistenza all'avanzamento sommata a quella delle curve della linea,

3) se **raggiunta la velocità di marcia** programmata  $V$ , un treno incontra **una salita**, assorbe:

- $E_P + E_{PERSA}$  ► energia elettrica per vincere la forza di gravità e la resistenza all'avanzamento sommata a quella delle curve della linea.

E' evidente che, se **l'avviamento avviene in salita**, le fasi 1 e 3 si **sovrappongono** sino al raggiungimento della velocità  $V$ .

**N.B. 1** ► In realtà anche in **modesta discesa** sarà assorbita energia per la trazione fino a che non sarà  $r_g + (r_v + \rho) < 0$ .

**N.B. 2** ► Il treno è composto anche da **masse rotanti** che in fase di accelerazione **incamerano energia** (per esempio le sale delle ruote, i rotorii dei motori di trazione ecc..). Poiché l'apporto è solo di qualche punto percentuale nell'energia cinetica complessiva, in questo contesto **si trascura** tale energia aggiuntiva.

► *In conclusione, riassumendo le tre energie:*

- $E_C$  ► **l'energia cinetica** che acquisisce un **treno in movimento**, a spese dell'energia elettrica assorbita, dipende dalla **massa** e dalla **velocità del convoglio** e può essere recuperata in fase di frenatura elettrodinamica,
- $E_P$  ► **l'energia potenziale** che acquisisce un **treno con la sua altitudine**, a spese dell'energia elettrica assorbita, dipende dalla **massa** e **dall'altezza** e può essere recuperata in fase di frenatura elettrodinamica durante la discesa come energia cinetica,
- $E_{PERSA}$  ► **l'energia persa**, a spese dell'energia elettrica assorbita a causa della **resistenza all'avanzamento e delle curve della linea**, è in funzione anche della **lunghezza del percorso**. Tale energia è sempre presente, da sola o in aggiunta alle due precedenti.

Si noti che **l'unica energia** che dipende dalla lunghezza della **tratta percorsa** è quella **persa** per cui, **maggiore è la tratta, maggiore è l'energia economicamente sprecata**. Da questo punto di vista è evidente che all'atto **pratico** esistano **interessi contrapposti** che devono trovare un giusto equilibrio. In **salita**, ad esempio, essendo l'energia da sollevamento dovuta solo all'altezza, si avrebbe interesse a ridurre al **minimo la tratta percorsa** quindi con **elevate pendenze**. D'altro canto si è visto che **elevate pendenze** creano altri generi di problemi come **prestazioni ridotte** delle locomotive e **tenute** meccaniche dei tenditori. La tratta del tunnel di Base del Moncenisio è **più corta** di quella della tratta di Valico del Frejus per cui **più conveniente** dal punto di vista dell'energia **persa**.

► *In conclusione, circa l'energia persa:*

- **maggiore** è la **tratta percorsa** da un treno, **maggiore** è l'energia  $E_{PERSA}$  a causa della **resistenza all'avanzamento e delle curve della linea**,
- la **minore** tratta del **tunnel di Base del Moncenisio** rispetto alla **tratta di Valico del Frejus** permette di risparmiare energia **diminuendo** la  $E_{PERSA}$ .

Quanto esposto finora può essere riassunto in due figure. La prima, fig.10, mostra il calcolo **dell'energia complessiva assorbita dalla linea elettrica** da un treno che compia un determinato percorso di una certa pendenza con risultato **espresso in kJ**, la seconda, fig.11, invece è **in kWh**. Ovviamente al valore ottenuto vanno in seguito applicati i vari **rendimenti** dovuti alla locomotiva, perdite catenaria ecc..

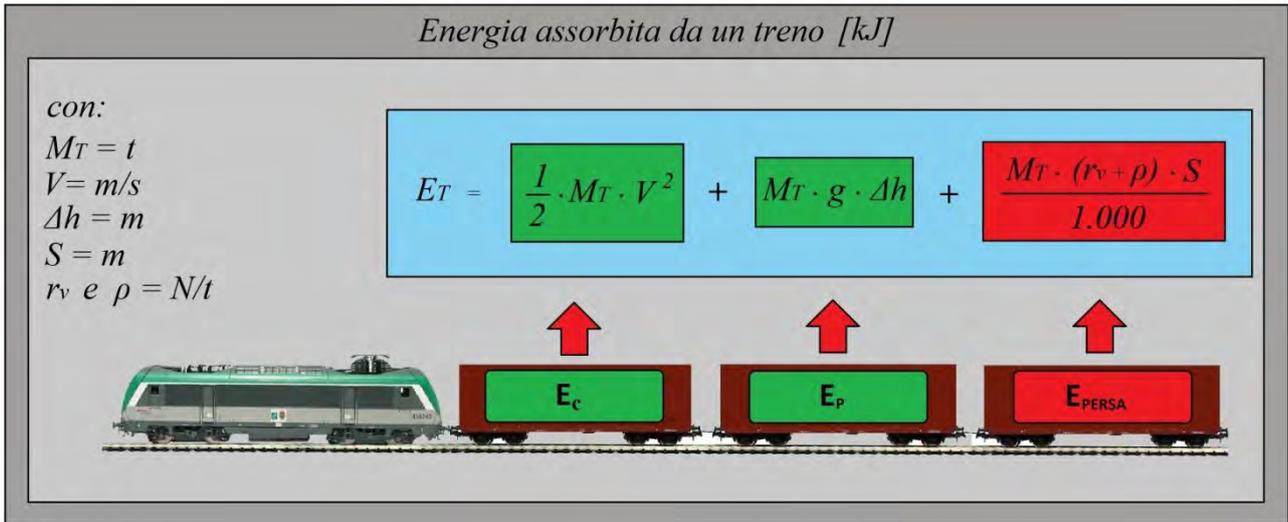


Figura 10

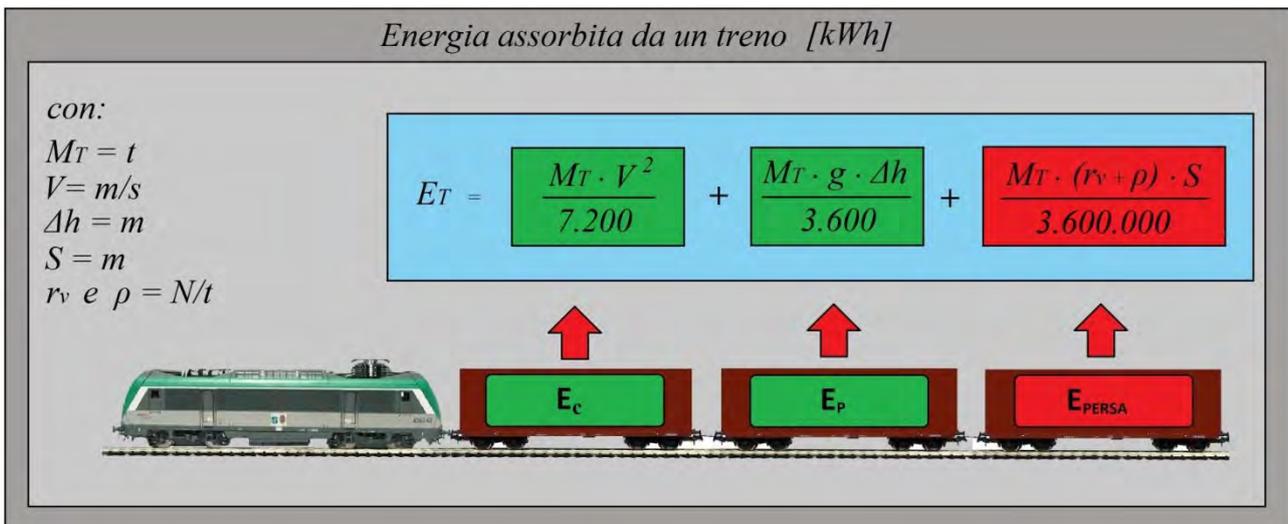


Figura 11

Le formule per il **calcolo** di  $E_T$  sono una **semplice derivazione** di quelle già analizzate per quanto concerne lo **sforzo di trazione**, ma messe in modo diverso per meglio evidenziare la **ripartizione** tra  $E_p$  e  $E_{PERSA}$  ai quali è **aggiunta** la  $E_c$ .

Infatti:

$$\Sigma R = M_T \cdot (r_v + g \cdot i + \rho) \quad [N]$$

$$E_{PP} = F \cdot S = \Sigma R \cdot S = M_T \cdot (r_v + g \cdot i + \rho) \cdot S \quad [J]$$

$$E_{PP} = M_T \cdot g \cdot i \cdot S + M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S \quad [J]$$

poiché:

$$i = \frac{\Delta h}{S} \cdot 1.000$$

Sostituendo:

$$E_{PP} = M_T \cdot g \cdot \Delta h \cdot 1.000 + M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S \quad [J]$$

$$E_{PP} = M_T \cdot g \cdot \Delta h + \frac{M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S}{1.000} \quad [kJ]$$

che, espresso in *kWh*:

$$E_{PP} = \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} + \frac{M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S}{3.600.000} \quad [kWh]$$

con:

$E_{PP}$  = energia potenziale e persa

$M_T$  = massa totale del treno [t],

$S$  = spostamento [m],

$i$  = pendenza della linea [‰],

$r_v$  = resistenza unitaria dovuta ai veicoli [N/t],

$\rho$  = resistenza unitaria dovuta alle curve [N/t].

Ora non rimane che aggiungere **l'energia cinetica** acquisita in fase di **accelerazione**. Sempre per un'espressione in *kWh* si ha:

$$E_T = \frac{M_T \cdot V^2}{7.200} + \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} + \frac{M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S}{3.600.000} \quad [kWh]$$

Nel caso della **discesa del treno** è possibile **recuperare l'energia potenziale** acquisita in **salita** che **ridiventa energia cinetica** e, nel caso di **arresto totale** del treno, anche **l'energia cinetica** utilizzata per **accelerarlo in partenza**.

## **PARTE SESTA**

### **RENDIMENTI DI SISTEMA**

## 6.1 ► Rendimenti di sistema

Stante le **diverse tecnologie** della tratta di Valico del Frejus e del tunnel di Base del Moncenisio, lo **scopo** di questa parte è **analizzare** se esiste una **differenza** nella **catena dei rendimenti** dei soggetti **frapposti** tra la **potenza sviluppata al cerchione** della locomotiva e la **rete primaria**. In questo modo, date le **energie necessarie** per muovere i treni sulle due differenti linee, è possibile quantificare **effettivamente** ciò che sarà **assorbito dalla linea primaria**, quindi l'energia **realmente consumata**, usando un **punto di riferimento comune**, cioè la **rete di Terna**.

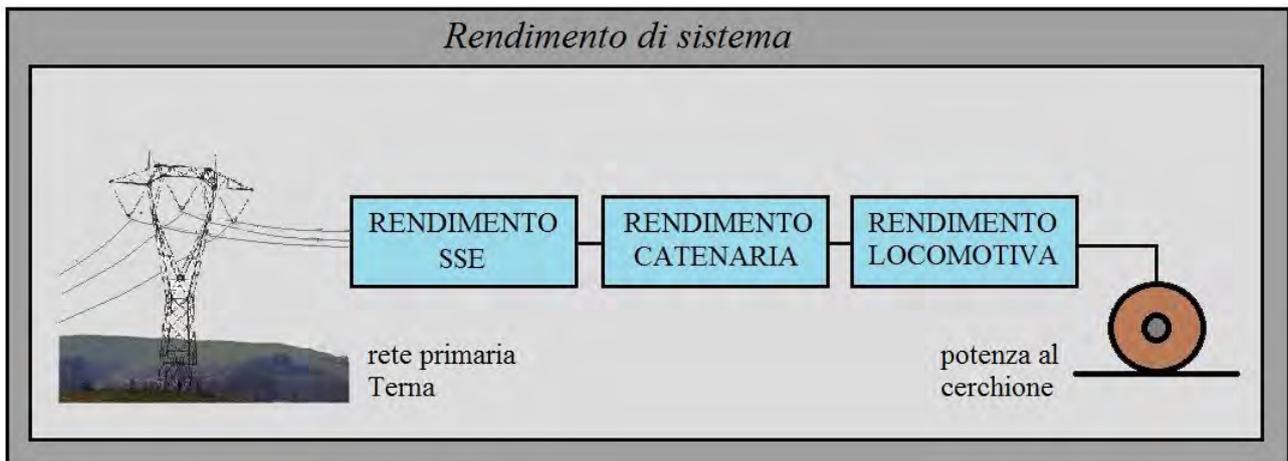


Figura 12

Ovviamente lo stesso discorso **vale alla rovescia**, quindi con la **potenza generata** in fase di **frenatura elettrodinamica** restando però inteso che, nel caso della **tratta di Valico del Frejus**, l'energia può essere scambiata **solo tra treni** mentre per il **tunnel di Base del Moncenisio**, in caso di linea **non ricettiva** (assenza di treni), essa può fluire anche **verso la rete primaria**.

## 6.2 ► Sottostazioni elettriche e catenarie

Si dice **catenaria** il filo d'alimentazione **sospeso sopra il locomotore** e lo strumento con il quale la locomotiva **capta** la corrente **pantografo** o **trolley**. Le catenarie **italiane** delle **linee tradizionali** sono alimentate a  $3\text{ kV}_{cc}$  mentre quelle delle **linee AV** a  $2 \times 25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$ . In **Francia**, invece, parte delle **linee tradizionali** è alimentata a  $1,5\text{ kV}_{cc}$  mentre il **restante** a  $25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$  oppure  $2 \times 25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$ .

Le catenarie della **tratta di Valico del Frejus** presentano quindi una tensione di  $3\text{ kV}_{cc}$  in **Italia** e  $1,5\text{ kV}_{cc}$  in **Francia** mentre quella del **tunnel di Base del Moncenisio** sarà a **tensione unica** col sistema **interoperabile**  $2 \times 25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$ . Dette catenarie sono **alimentate** dalle strutture denominate **Sottostazioni Elettriche (SSE)** che, dislocate a **opportuna distanza** lungo le linee, hanno il compito di **trasformare** l'alta tensione o media tensione dal gestore nazionale

(Terna per l'Italia, RTE per la Francia) in  $3\text{ kV}_{cc}$ ,  $1,5\text{ kV}_{cc}$  oppure  $2 \times 25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$  in base alla necessità della trazione ferroviaria.

La scelta della nuova alimentazione  $2 \times 25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$  rispetto a quelle tradizionali di  $3\text{ kV}_{cc}$  e  $1,5\text{ kV}_{cc}$  è dovuta al fatto che il tunnel di Base del Moncenisio fa parte di un corridoio europeo ed è previsto dalle *STI (Specifiche Tecniche di Interoperabilità)* che le nuove strutture facenti parte di tali corridoi adottino questo sistema d'alimentazione.

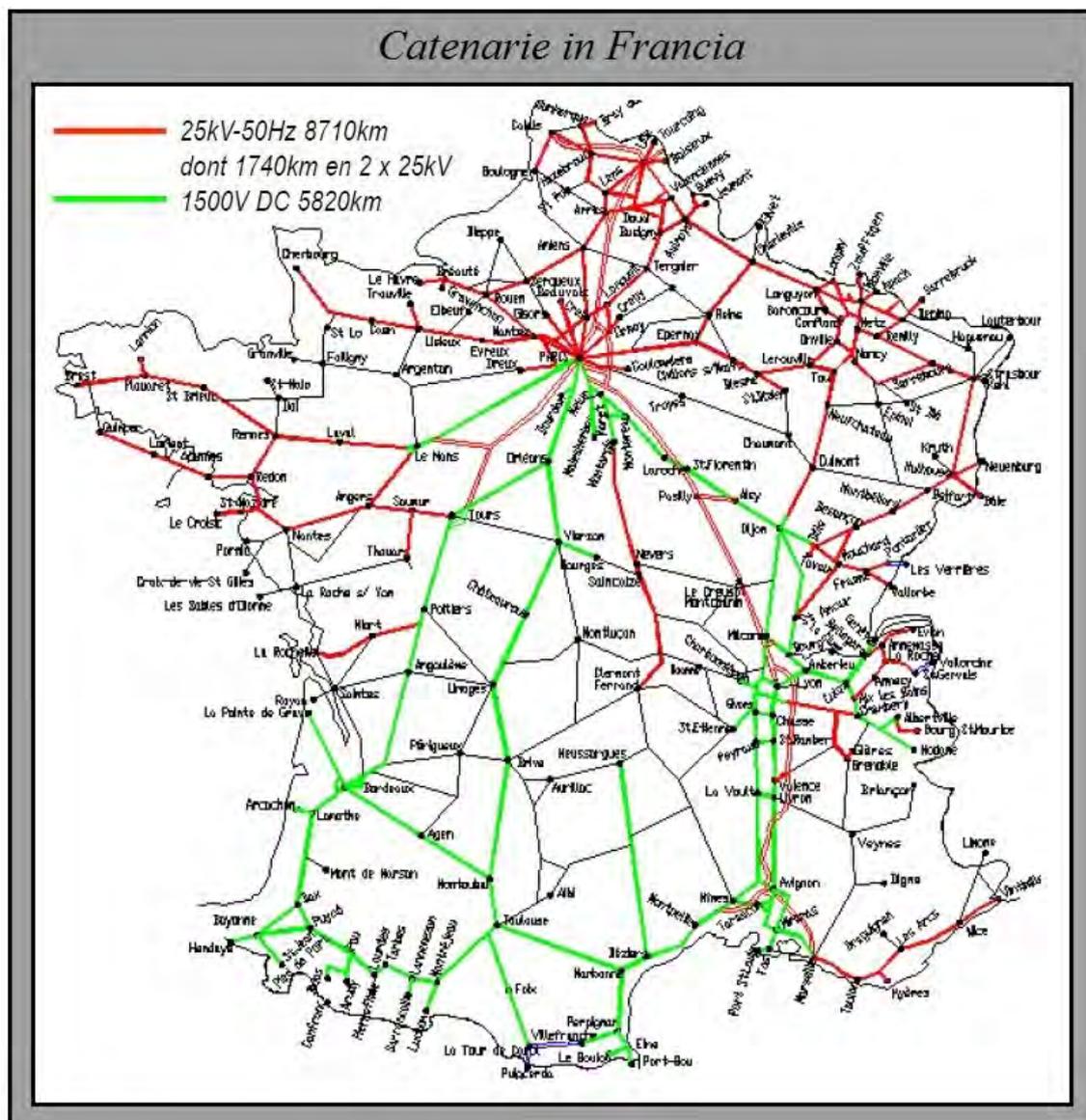


Figura 13

La nascita del  $2 \times 25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$  è legata all'alta velocità perché le tensioni tradizionali come  $3\text{ kV}_{cc}$  e  $1,5\text{ kV}_{cc}$  impongono forti correnti dovute alle elevate potenze dei mezzi di trazione e questo ne determina ad alta velocità una cattiva captazione da parte dei pantografi. Elevare la tensione di linea ha quindi permesso d'abbassare queste correnti e, come effetto contingente, anche le perdite rispetto alle linee tradizionali. Inoltre, l'abbassamento di corrente ha permesso anche di elevare considerevolmente la potenza specifica, quindi i  $\text{MW}/\text{km}$  che una linea

mette a **disposizione** dei treni. A tal proposito va evidenziato che la potenza specifica nelle linee di **pianura** è **distribuita uniformemente** tra i **due binari** mentre, ovviamente, su linee in **ascesa** essa si **concentra principalmente** sul binario a **maggiore assorbimento** che è quello di **salita**.

L'**elevata potenza specifica** ha fatto diventare il sistema  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca}$  50 Hz uno **standard** anche per le linee **interoperabili non AV**.

### 6.3 ► Differenze tra i sistemi a $3 \text{ kV}_{cc}$ e $1,5 \text{ kV}_{cc}$ della tratta di Valico del Frejus e il $2 \times 25 \text{ kV}_{ca}$ 50 Hz del nuovo tunnel di Base del Moncenisio

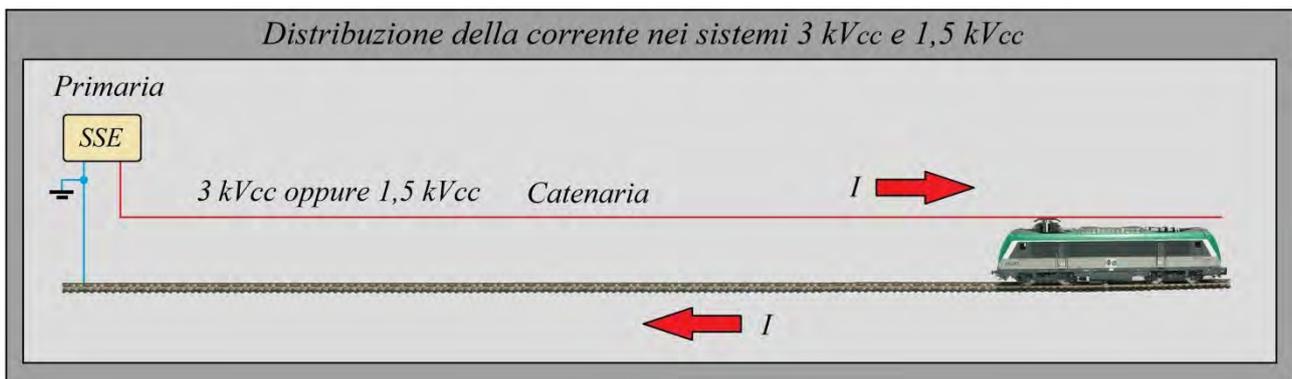


Figura 14

Le linee a  $3 \text{ kV}_{cc}$  e  $1,5 \text{ kV}_{cc}$  sono composte essenzialmente da **una sottostazione**, che **abbassa la tensione primaria** e la **trasforma in corrente continua**, a cui segue la **catenaria** che trasferisce il **polo positivo** alla locomotiva mentre la **rotaia** ha lo stesso compito per il **polo negativo**. La locomotiva **frapposta** chiude il circuito.

Le linee  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca}$  50 Hz sono decisamente diverse. Nella **sottostazione** il **primario** del **trasformatore** preleva la tensione **su due fasi** della **linea trifase** del **gestore nazionale** e la rende disponibile sul **secondario** sotto forma di **due tensioni**:  $+25 \text{ kV}_{ca}$  e  $-25 \text{ kV}_{ca}$  (cioè alla tensione nominale di  $25 \text{ kV}_{ca}$  ma in **opposizione di fase**) e un **terminale comune**.

La tensione  $+25 \text{ kV}_{ca}$  è collegata alla **catenaria**, quella  $-25 \text{ kV}_{ca}$  a un conduttore denominato **feeder** (alimentatore) che **corre parallelo** alla **linea** mentre il **terminale comune** è connesso al **binario** e quindi a **terra**.

Il **distanziamento** tra le **sottostazioni** sulle linee **AV** è di **50 km**. Tra una **SSE** e l'altra ci sono 3 posti di **auto trasformazione** (ed eventualmente **parallelo** tra i binari pari e dispari), posti a una distanza di circa **12 km**, che servono a **limitare le cadute di tensione** lungo la linea **distribuendo opportunamente** le **correnti** tra **catenaria** e **feeder** (e normalmente anche tra binario pari/dispari). Questo avviene creando delle **celle**: gli autotrasformatori del tunnel di Base del Moncenisio sono da **12 MVA** con perdite assolutamente trascurabili. L'architettura  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca}$  50 Hz

permette di **ridurre i disturbi** su impianti di **telecomunicazioni classici** ed eventuali linee **ferroviarie adiacenti** di tipo **tradizionale** limitando **alla sola cella** interessata uno **scorrimento di corrente** lungo il **binario**. Quest'ultimo, infatti, è una grande fonte di **propagazione dei disturbi** sia per **induzione** sia per **correnti vaganti**. Dal punto di vista delle **correnti indotte**, inoltre, nel caso  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca} 50 \text{ Hz}$  tali correnti che percorrono il **binario** (vedere frecce sotto il locomotore di fig.15) sono di **senso opposto** minimizzando quindi l'effetto su eventuali conduttori vicini.

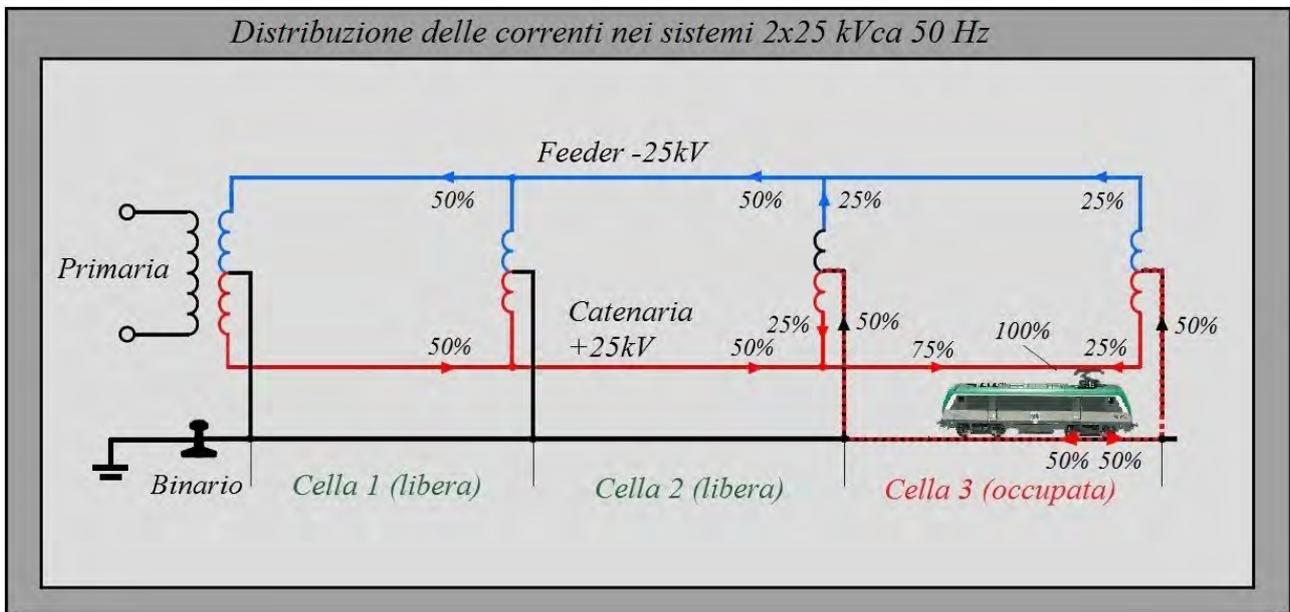


Figura 15

Le **correnti vaganti** sono ben note con l'alimentazione a **corrente continua** e sono quelle **correnti di ritorno** che **non percorrono** totalmente il **binario** ma passano nel **terreno** corrodendo le **parti metalliche**. Convogliare le correnti verso catenaria e feeder, inoltre, **riduce l'impedenza della linea** permettendo di avere **meno perdite** e **distanziare maggiormente** le sottostazioni.

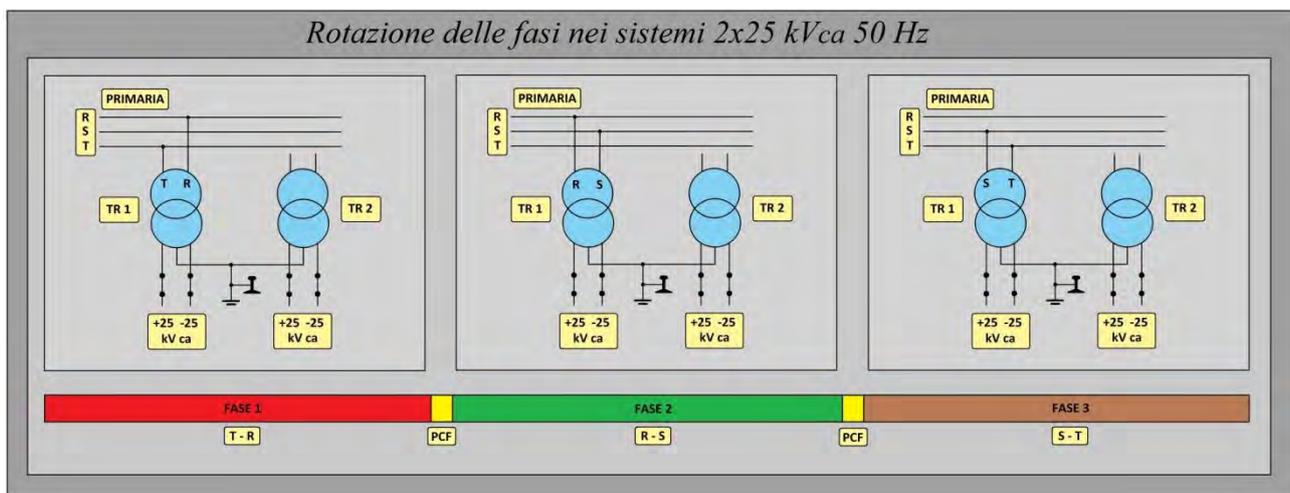


Figura 16

**Per contro**, il sistema di alimentazione  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca}$  50 Hz tende a **sbilanciare la rete trifase** per cui è necessario attuare degli **accorgimenti**.

Il **primo** è di **collegare direttamente** la *SSE* con **rete primaria dedicata** al sistema elettrico nazionale, in modo che lo **sbilanciamento diventi ininfluente** rispetto **all'assorbimento totale**.

Il **secondo** è a **livello di catenaria** dove, **periodicamente**, si esegue un **cambio di fase** ovvero le *SSE* che si **susseguono** prelevano a **rotazione** dalla linea primaria **due** delle **tre** fasi. Questo implica che la catenaria, seppure costantemente alimentata a  $+25 \text{ kV}_{ca}$ , abbia dei **tratti neutri di separazione** dovuti alle **fasi diverse** (detti *PCF* - posto cambio fase) ovvero **tratti non alimentati** che il treno percorre per **inerzia**.

**N.B.►** Il sistema appena descritto di **rotazione delle fasi** (sequenza **ordine 3**) determina una differenza di potenziale tra catenarie successive di  $42,5 \text{ kV}_{ca}$ . Per ridurre tale valore a  $25 \text{ kV}_{ca}$ , stesso valore della catenaria, si adottano anche configurazioni leggermente differenti (sequenza **ordine 6**). Il **principio di base resta lo stesso**.

Normalmente i **cambi fase** sono gestiti in **automatico** dai mezzi di trazione. Anche al **passaggio** dalla rete  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca}$  50 Hz a quelle **nazionali di sistema diverso** esiste un **tratto neutro** (detto *POC* - posto di confine o posto origine catenaria). I *POC* sono generalmente lunghi  $116 \text{ m}$ , i *PCF*  $147 \text{ m}$ .

**► In conclusione il sistema  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca}$  50 Hz rispetto ai sistemi  $3 \text{ kV}_{cc}$  o  $1,5 \text{ kV}_{cc}$  permette:**

- **maggiore distanza** tra le *SSE* ( $50 \text{ km}$  invece di  $20$ ),
- **migliore interazione** pantografo-catenaria per i treni *AV*,
- **riduzione delle perdite** in catenaria,
- **elevata potenza specifica** in catenaria.

## 6.4 ► Rendimento $SSE\ 3\ kV_{cc}$ e $1,5\ kV_{cc}$

Le  $SSE\ 3\ kV_{cc}$ , sinteticamente, sono composte di un **trasformatore** per **abbassare** la tensione della linea primaria a  $\approx 2.700\ V_{ca}$  a **vuoto**, un **raddrizzatore** per trasformare la corrente alternata in continua a  $\approx 3.800\ V_{cc}$  a **vuoto** ( $V_{cc} = V_{ca} \cdot 1,41$ ) e un **filtro** composto da **un'induttanza** con un **condensatore** (filtro correnti armoniche).

Un **regolatore** (variante di rapporto sotto carico), installato prevalentemente sui gruppi di **grande potenza**, completa il tutto mantenendo nei **limiti operativi** la **tensione** alla catenaria in conformità alla **maggiore/minore richiesta** di corrente dei mezzi di trazione.

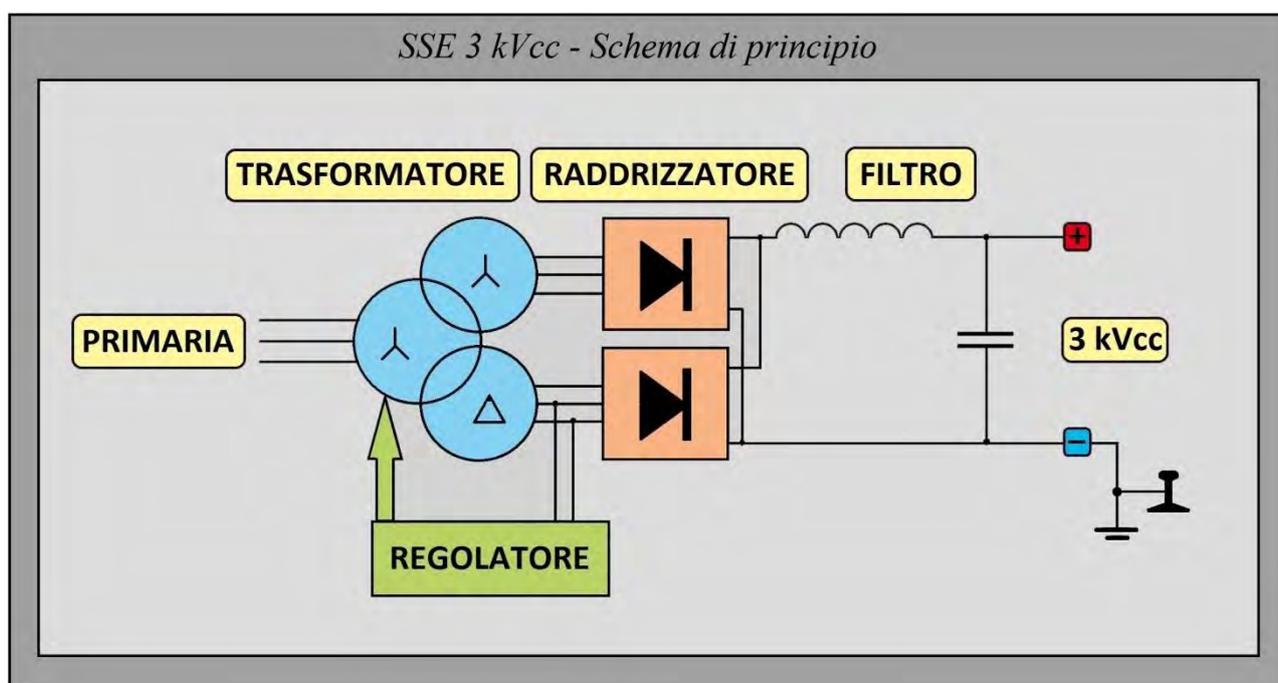


Figura 17

Oltre alle parti fondamentali appena elencate, le  $SSE\ 3\ kV_{cc}$  sono equipaggiate di apparecchiature necessarie al funzionamento dei **servizi ausiliari** e **strumenti di misura**. I **gruppi raddrizzatori** sono di potenza **unitaria** pari a  $2, 3,6$  o  $5,4\ MW$  e in una  $SSE$  possono esserci  $1, 2$  o  $3$  gruppi (esternamente, nel piazzale, contando il numero dei trasformatori è possibile sapere quanti gruppi ha all'interno la  $SSE$ ).

Nel tempo le  $SSE\ 3\ kV_{cc}$  si sono evolute passando dai **raddrizzatori a mercurio** a quelli a **semiconduttori**: prima con  $216\ diodi$  e ora con solo  $30\ diodi$ , **diminuendo** quindi le **perdite** dovute a tali componenti.

Le  $SSE\ 3\ kV_{cc}$  **non sono reversibili**, quindi in caso di **corrente a recupero** immessa in linea da una **locomotiva in frenatura elettrodinamica**, la stessa **non può essere riversata sulla linea primaria** ma va necessariamente **consumata** da un'altra **locomotiva in trazione** circolante **sulla stessa tratta**.

Normalmente la **potenza installata** di una sottostazione è **superiore** alle necessità per sopperire al **fuori servizio** delle sottostazioni limitrofe. Per quanto riguarda il

**rendimento** non è stato possibile reperire notizie al riguardo ma si può ugualmente eseguire una stima attendibile, valida anche per le  $SSE\ 1,5\ kV_{cc}$  (sostanzialmente simili), prendendo a riferimento le **apparecchiature analoghe** utilizzate a **livello industriale** (trasformatori, diodi, ecc..), per cui un  $\eta_{SSE_{CC}} = 0,97$  (97%).

► *In conclusione:*

$$\eta_{SSE_{CC}} = 0,97$$

## 6.5 ► Rendimento $SSE\ 2x25\ kV_{ca}\ 50\ Hz$

Le sottostazioni elettriche  $2x25\ kV_{ca}\ 50\ Hz$  sono **relativamente più semplici** delle  $SSE\ 3\ kV_{cc}$  perché esse sono **composte essenzialmente** da un **trasformatore erogante (TR1)** e uno di **riserva (TR2)**. **Non dispongono** quindi dei circuiti raddrizzatori, filtri armoniche e impianti di raffreddamento per i diodi.

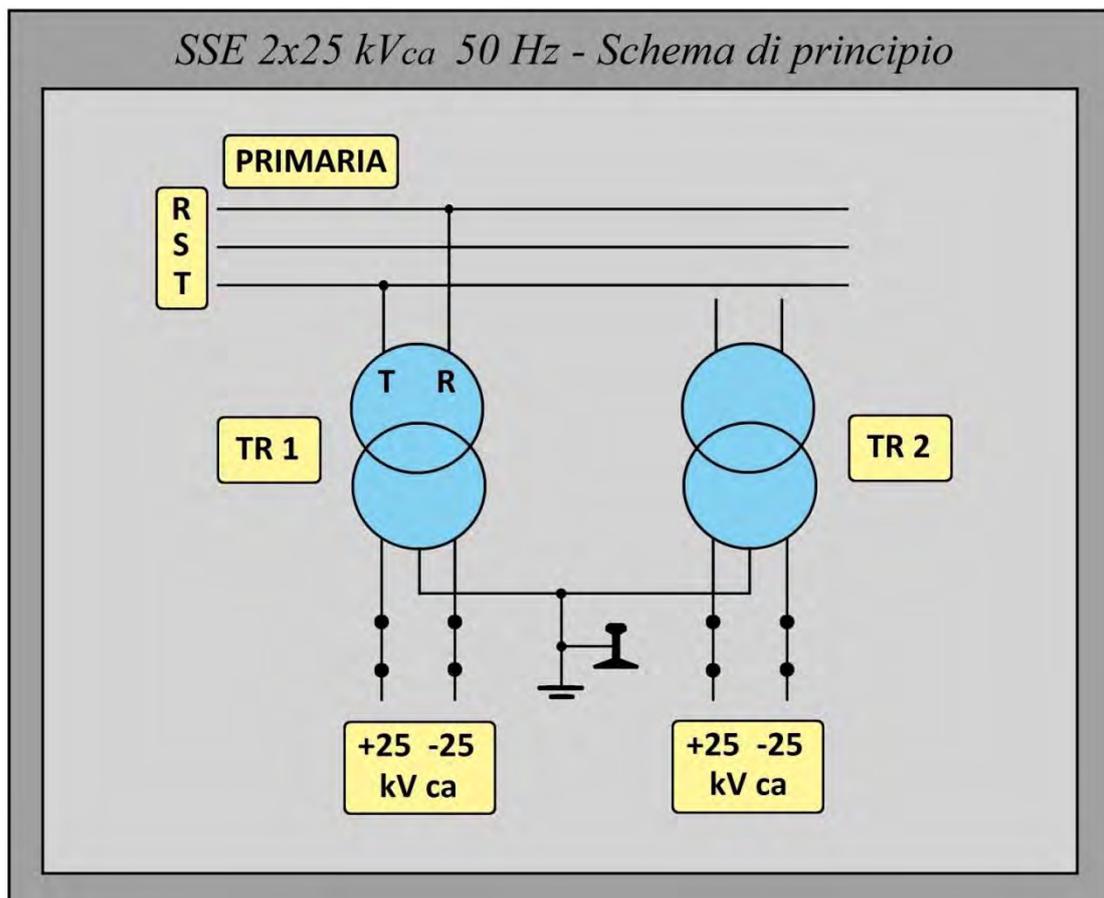


Figura 18

I trasformatori sulle **linee AV** sono da **60 MVA** mentre per il **tunnel di Base del Moncenisio** sono da **80 MVA** per sopperire a delle **criticità di cadute di tensione** dovute a **certe situazioni di esercizio**.

Questi trasformatori (*TR1, TR2* in fig.18), inoltre, sono **sovradimensionati** del 100% per garantire continuità in caso di **fuori servizio** della **SSE adiacente**. Il **rendimento** di tali trasformatori da 80 MVA, come desumibile dalle perdite riportate in **scheda tecnica LTF**, è  $\eta_{TR} = 0,99$ ; tale valore, molto alto, non deve stupire poiché **molto comune** ai trasformatori di **rilevanti potenze**.

*Specifiche trasformatore 80 MVA (da LTF prog.def.)*

Potenza nominale	Avvolgimento primario AT: 80 MVA Avvolgimento secondario MT1: 40 MVA Avvolgimento secondario MT2: 40 MVA
Tensione nominale	AT: 132 kV MT1: 27,5 kV MT2: 27,5 kV
Perdite a vuoto a $V_n$	48kW
Perdite a carico	Avvolgimento in corto circuito 1-2: $\leq 80$ kW 1-3: $\leq 80$ kW 2-3: $\leq 160$ kW

Tabella 6

Le sottostazioni  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca} 50 \text{ Hz}$  **sono totalmente e naturalmente reversibili** (essendo, per sua natura, il trasformatore una macchina reversibile) per cui, un'eventuale **energia recuperata** che **non sia assorbita** direttamente in catenaria, può essere **riversata all'indietro sulla primaria** e di conseguenza sulla **linea Terna** con la sola **perdita del trasformatore** (perdita che, come visto, è in sostanza insignificante).

Il **rendimento** di una  $SSE 2 \times 25 \text{ kV}_{ca} 50 \text{ Hz}$  è legato perciò **al solo trasformatore** da cui  $\eta_{SSE_{CA}} = 0,99$  (99%).

► **In conclusione:**

$$\eta_{SSE_{CA}} = 0,99$$

## 6.6 ► Le catenarie

La catenaria è quella **struttura area sospesa sopra il locomotore** composta di **due o più conduttori**; il suo scopo è **trasportare** dalla **SSE** la **corrente elettrica**, che sarà prelevata dal mezzo di trazione attraverso il **pantografo** (detto anche Trolley). Sia la **catenaria** sia il **pantografo**, per come sono costituiti, sono strutture a **sospensione elastica** in modo di coniugare la **migliore captazione di corrente** senza eccedere con la **forza meccanica** che deve obbligatoriamente avere lo strisciante del pantografo verso la catenaria per assicurare un **buon contatto**.

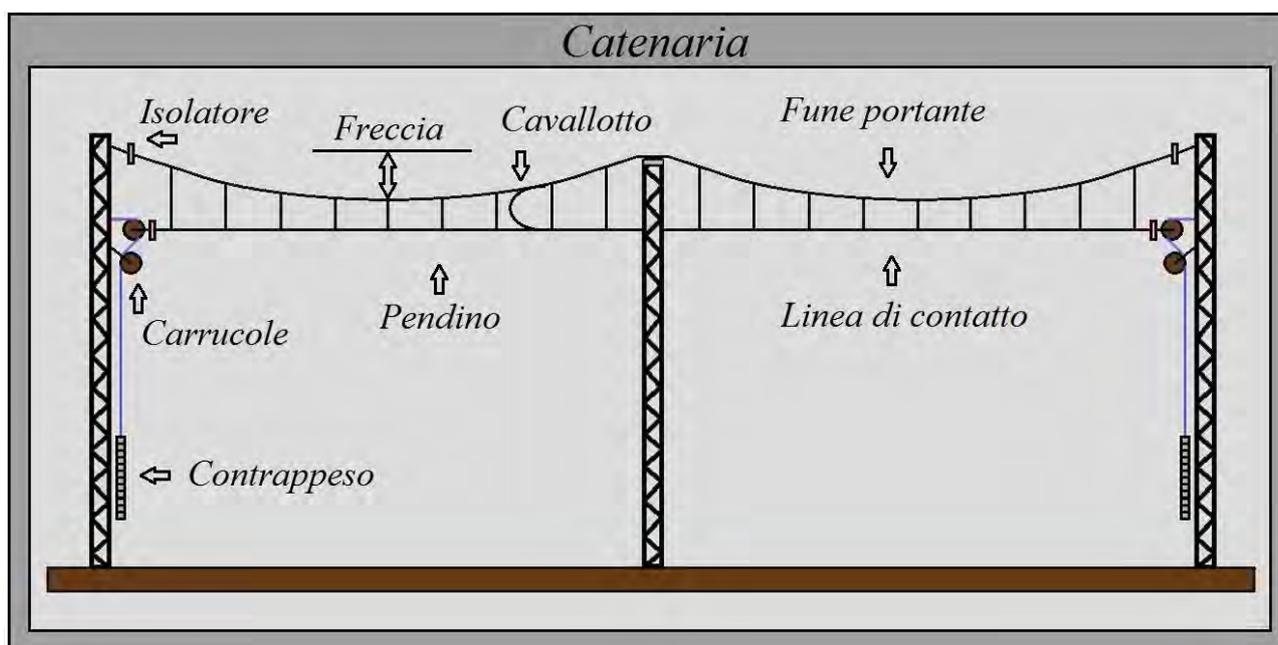


Figura 19

La **catenaria** è costituita da **uno o due conduttori di contatto** sostenuti, tramite collegamenti con **pendini** e **morsetti** ogni 8 metri circa, da **una o due funi dette portanti**. Per un sicuro **collegamento elettrico equipotenziale** tra linee di contatto e funi portanti ogni 120÷180 metri un conduttore, detto **cavallotto di continuità**, li unisce.

Le **funi portanti** sono ancorate **rigidamente ai pali di sostegno**, posti ogni 50÷65 metri circa, e **all'estremità** delle singole tratte lunghe circa 600 m (campate).

Le **linee di contatto**, invece, sono ancorate **solo ai collegamenti** con le funi portanti e alle **estremità** sono **mantenute tese** da un sistema di **carrucole** e **contrappesi**. Lo scopo è di mantenere sempre in **tensione la linea** al **variare della temperatura** che, come noto, agisce sulle **dimensioni** di un materiale e, nel caso di un **filo**, prevalentemente nel senso della **lunghezza**.

Per la lunghezza di campata di 600 metri l'allungamento vale circa 60 cm per una  $\Delta t$  di 60°C, la massima escursione termica normalmente presente. Anche la fune portante **risente** dell'allungamento ma, **essendo ancorata** ai pali dovendo assolvere lo scopo di sostegno, **provoca una freccia sul filo** di contatto positiva in estate e negativa in

inverno. Tale  $\Delta l$  vale in totale circa 15÷20 cm e **non presenta** problemi di **derivazione corrente** fino a velocità di 160 km/h: per **velocità superiori** è contrappesata **anche la fune portante**.

La linea di **contatto**, per evitare che **strisci** sempre nel **punto centrale** della **ciabatta del pantografo** causando un **consumo disomogeneo** di quest'ultimo, viene **poligonata** per mezzo di **tiranti** in modo che compia un percorso complessivo a zig-zag di  $\Delta d = 40$  cm. Nelle **curve** i pali di sostegno sono quindi opportunamente **ravvicinati** per permettere al meglio quest'operazione.

Nelle linee a **corrente continua** il **passaggio** da una campata di catenaria precedente alla campata di catenaria successiva avviene tramite **portali**, strutture che per un breve tratto **assicurano la concomitanza** delle due catenarie affiancate in modo che il **pantografo** passi dall'una all'altra **senza interruzione di corrente**.

Nei sistemi a **corrente alternata**, invece, il passaggio avviene **con interruzione di corrente** tramite i tratti neutri *PCF* visti in precedenza.

La **sezione** dei conduttori delle catenarie sono **dimensionate** col criterio di mantenere la **tensione al pantografo** entro **limiti prestabiliti** in base agli **assorbimenti massimi** sulla linea e alla lunghezza della stessa.

Lo scopo principale è quindi **prevenire cadute di tensione eccessive** che provocherebbero **malfunzionamenti** nei **locomotori** mentre il contenimento delle perdite energetiche è solo un aspetto secondario e conseguente.

Nella tab.7 sono riportati tali **limiti di tensione** come da norme *CEI EN 50388* (9 – 88) per le linee *STI AV* e linee convenzionali *STI* - linee classiche.

Norme antecedenti consentivano cadute di tensione maggiori.

<i>Tensione media utile</i>		
<i>Sistema di alimentazione elettrica</i>	<i>Linee STI AV</i>	<i>Linee convenzionali STI e linee classiche</i>
<i>c.a. 25 000 V 50 Hz [V]</i>	22 500	22 000
<i>c.a. 15 000 V 16,7 Hz [V]</i>	14 200	13 500
<i>c.c. 3000 V [V]</i>	2 800	2 700
<i>c.c. 1500 V [V]</i>	1 300	1 300

Tabella 7

Il tunnel di Base del Moncenisio, **pur non essendo AV**, è stato progettato per **rispettare** la *STI AV*.

Dal punto di vista **energetico** ciò che interessa è la **sezione complessiva** dei **conduttori** della **linea di contatto** e **del binario** in modo di poter calcolare la **resistenza** (corrente continua) o l'**impedenza della linea** (corrente alternata) in funzione della **distanza** tra la/le sottostazioni.

## 6.7 ► Le catenarie della tratta di Valico del Frejus 3 kV<sub>cc</sub> e 1,5 kV<sub>cc</sub>

Le **sezioni tipiche** delle **catenarie** per le linee a **3 kV<sub>cc</sub> italiane**, intese come somma di linee di contatto e fune portante, sono di **320 mm<sup>2</sup>** per lo **scarso traffico** (o brevi tronconi) mentre sale a **440 mm<sup>2</sup>** per **traffico ordinario**.

Per le linee a **grande assorbimento** della **rete fondamentale**, quelle **AV** di **prima costruzione** ancora alimentate a 3 kV<sub>cc</sub> (*Firenze – Roma*), **linee di valico** oppure in **certi nodi**, le sezioni sono **maggiori** secondo i casi: **540 mm<sup>2</sup>** o **610 mm<sup>2</sup>**.

Sulla **tratta di Valico del Frejus** è utilizzata una catenaria di **610 mm<sup>2</sup>** lato **Italia** mentre sul lato **Francia** è presente una **scelta tecnologica diversa**.

Un **ulteriore cavo alimentatore**, infatti, **corre** lungo i **pali** di **sostegno** della **catenaria** e ogni due-tre di questi è **collegato a essa**. Tale accorgimento garantisce una **ragionevole sezione complessiva** di conduttori **evitando** di **appesantire** troppo la linea aerea che, infatti, è di solo **480 mm<sup>2</sup>** pur raggiungendo una **sezione complessiva** di circa **1.000 mm<sup>2</sup>**. Per contro questo sistema rende **più complessa** la manutenzione o il ripristino a seguito d'inconvenienti. Anche tale cavo, avendo uno scopo simile, è denominato **feeder** come per le linee 2x25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz. Il motivo di tale scelta si vedrà più avanti quando si parlerà di **perdite** della catenaria lato Francia.

Le **linee in corrente continua** che trasportano la corrente dalla **SSE** ai convogli possono **essere alimentate**, secondo le necessità, in **due modi differenti**:

- **a sbalzo**
- **in parallelo**

Analizziamole in dettaglio.

## ► Alimentazione a sbalzo

Alimentazione a **sbalzo** significa che la catenaria è alimentata da **una sola SSE** posta a **un lato** della linea.

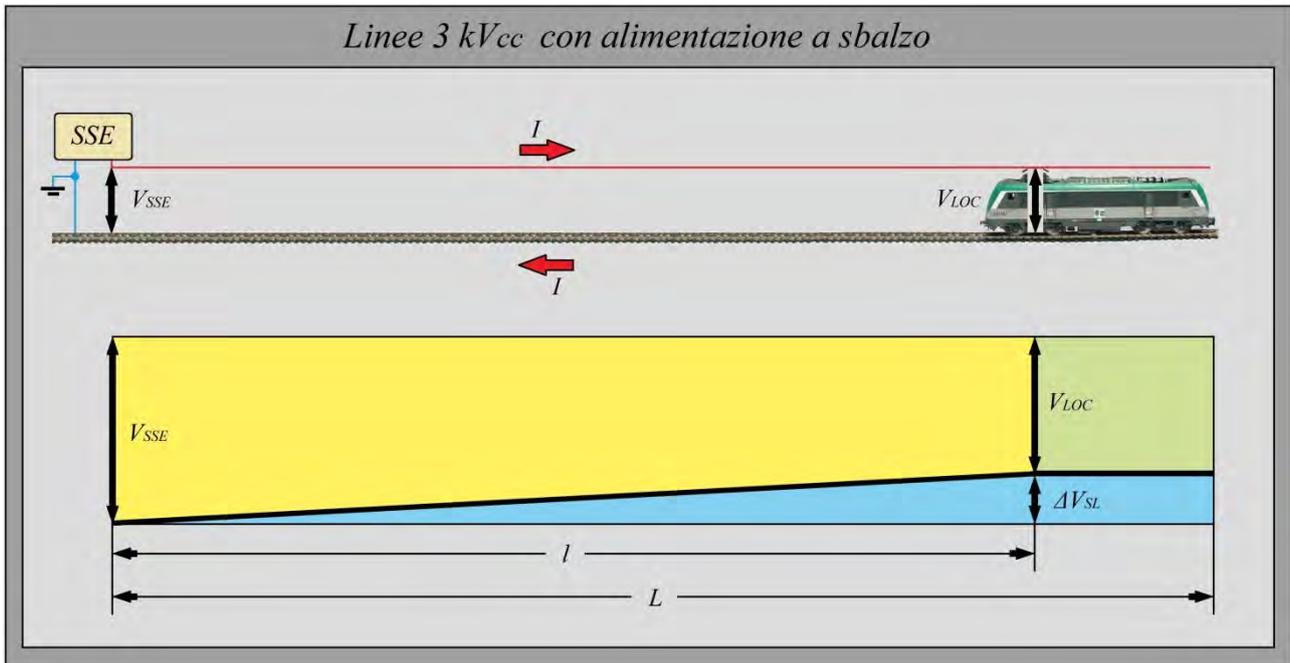


Figura 20

La **resistenza totale**  $R_{TLS}$  comprensiva di **catenaria** e **binario** sarà:

$$R_{TLS} = \rho_R \cdot \frac{L}{S_{CS}} + \rho_{ROT} \cdot \frac{L}{S_{ROT}} \quad [\Omega]$$

dove:

- $R_{TLS}$  = resistenza totale della linea a sbalzo  $[\Omega]$ ,
- $\rho_R$  = resistività del rame della catenaria  $[\Omega \cdot mm^2/km]$ ,
- $\rho_{ROT}$  = resistività della rotaia  $[\Omega \cdot mm^2/km]$ ,
- $S_{CS}$  = sezione totale dei conduttori in rame  $[mm^2]$ ,
- $S_{ROT}$  = sezione rotaia in acciaio  $[mm^2]$ ,
- $L$  = lunghezza della tratta  $[km]$ .

Nel caso di **un kilometro** di linea, quindi:

$$R_{TLS1km} = \rho_R \cdot \frac{1}{S_{CS}} + \rho_{ROT} \cdot \frac{1}{S_{ROT}} = 17 \cdot \frac{1}{S_{CS}} + 0,0125 \quad [\Omega/km]$$

poiché:

- la sezione del binario 60 UNI, normalmente utilizzato, vale  $15.200 \text{ mm}^2$  ( $7.600 \text{ mm}^2$  a rotaia),
- resistività del rame:  $\rho_R = 17 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ,
- resistività dell'acciaio:  $\rho_A = 190 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ .

La **caduta di tensione** lungo la **catenaria** ad una generica **distanza**  $x$  dalla **SSE** è data da:

$$\Delta V_{LX} = R_{TLS1km} \cdot x \cdot I_{LOC} \quad [V]$$

ovvero si è di fronte **all'equazione di una retta** con pendenza  $[R_{TLS1km} \cdot I]$ .

La **caduta di tensione massima** si avrà nel punto a **maggior distanza** dalla **SSE** mentre la **caduta di tensione media**, avendo andamento lineare, sarà **la metà** di quella **massima**.

Quindi:

$$\Delta V_{L_{MAX}_S} = R_{TLS1km} \cdot L \cdot I \quad [V]$$

$$\Delta V_{L_{MEDIA}_S} = \frac{\Delta V_{L_{MAX}_S}}{2} \quad [V]$$

## ► Alimentazione in parallelo

Per cercare di **contenere** le **cadute di tensione** (e quindi, di riflesso, le perdite in potenza delle catenarie), sulle **linee tradizionali** si adotta **correntemente** l'alimentazione in **parallelo**: in questa configurazione **due SSE** alimentano la **catenaria** dalle **opposte estremità**.

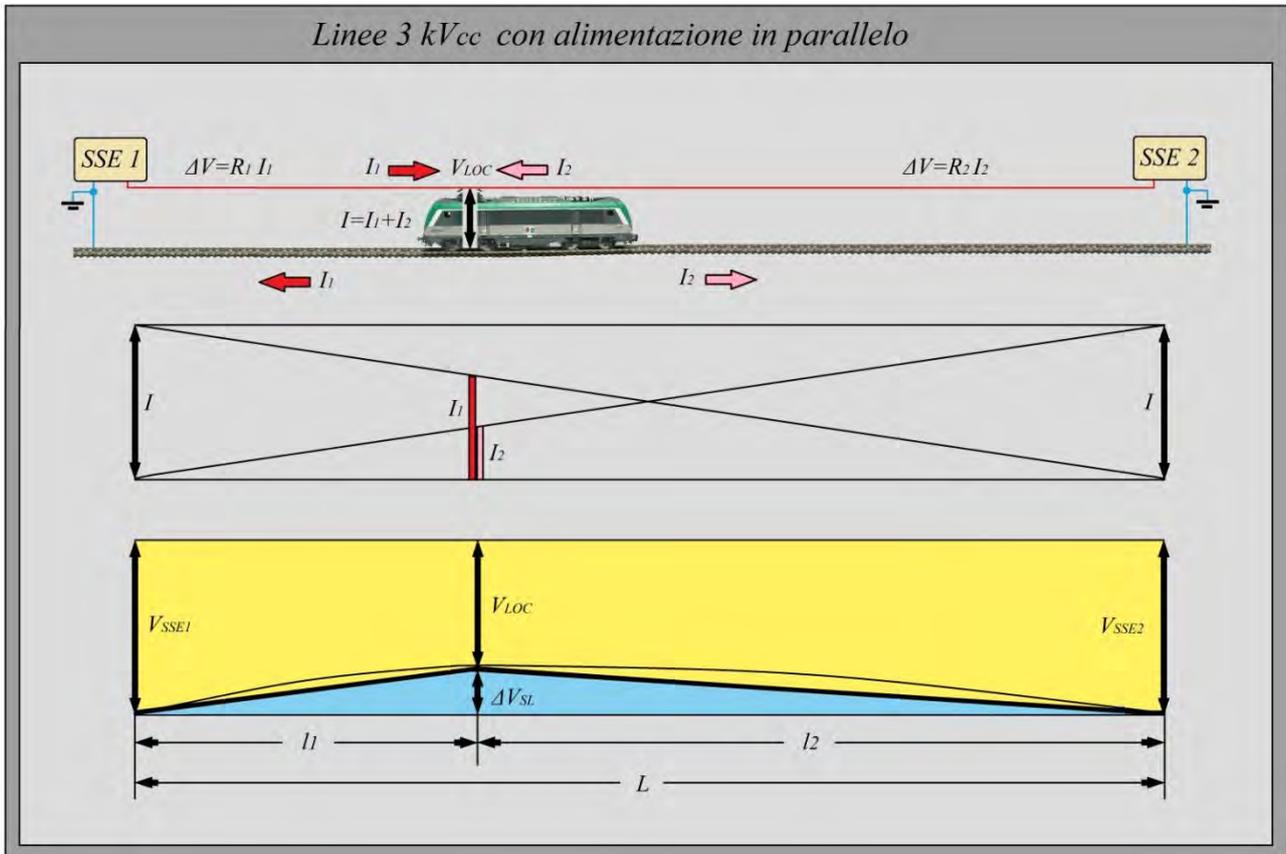


Figura 21

La **caduta di tensione** lungo la **catenaria** a una generica **distanza x** da **una** delle **due SSE** è data da:

$$\Delta V_{CATX} = R_{TLP1km} \cdot \left( x - \frac{x^2}{L} \right) \cdot I \quad [V]$$

che è l'equazione di **una parabola**. Per il calcolo di  $R_{TLP1km}$  vale quanto esposto per la linea a sbalzo.

La **caduta di tensione massima**, ad andamento **parabolico**, si ha nel punto a **media distanza** tra le due SSE e, assieme alla caduta di tensione media, valgono:

$$\Delta V_{L\_MAX\_P} = \frac{R_{TLP1km} \cdot L \cdot I}{4} \quad [V] \qquad \Delta V_{L\_MEDIA\_P} = \frac{2}{3} \cdot \Delta V_{L\_MAX\_P} \quad [V]$$

**Confrontiamo** le  $\Delta V_{L\_MAX}$  e  $\Delta V_{L\_MEDIA}$  di linea alimentata a **sbalzo** e in **parallelo**:

sbalzo:

$$\Delta V_{L\_MAX\_S} = R_{TLS1km} \cdot L \cdot I \quad [V]$$

$$\Delta V_{L\_MEDIA\_S} = \frac{\Delta V_{L\_MAX\_S}}{2} = \frac{R_{TLS1km} \cdot L \cdot I}{2} \quad [V]$$

parallelo:

$$\Delta V_{L\_MAX\_P} = \frac{R_{TLP1km} \cdot L \cdot I}{4} \quad [V]$$

$$\Delta V_{L\_MEDIA\_P} = \frac{2}{3} \cdot \Delta V_{L\_MAX\_P} = \frac{R_{TLP1km} \cdot L \cdot I}{6} \quad [V]$$

Com'è possibile constatare, a **parità** di  $(R_{TLP1km} \cdot L \cdot I)$ , nella linea alimentata in **parallelo** la **caduta di tensione massima** diventa **un quarto** e quella **media un sesto** della linea alimentata a **sbalzo**.

Per tale motivo sulle **linee tradizionali** l'alimentazione a **sbalzo** è utilizzata **solo per brevi estensioni** in tratte normalmente terminali (come la linea *Bussoleno – Susa* di 7 km) e spesso con **sezioni catenaria** di soli  $320 \text{ mm}^2$ .

L'alimentazione **in parallelo**, quindi, costituisce **la normalità** sulle linee a corrente continua con distanza tra **SSE italiane** di **circa 20 km** mentre per quelle **francesi** pressappoco la **metà**.

L'elevato **assorbimento di corrente** dovuto alle **doppie** e **triple trazioni** sulla tratta di Valico del Frejus implica però, **ambo i lati**, una distanza **più ravvicinata** delle **SSE** e **sezioni dei conduttori** della catenaria **maggiorati** onde contenere su livelli ragionevoli le **cadute di tensione**, le **perdite** per effetto *joule* e la **densità di corrente** ( $A/\text{mm}^2$ ).

Quindi:

**1) Tratta italiana:** binario **pari** (di **salita**) in zona a **maggiore estensione** (26 km) rispetto alla **pendenza** (26‰):

- SSE Bussoleno – SSE Chiomonte  $\approx 15$  km
- SSE Chiomonte – SSE Salbertrand  $\approx 11$  km

- ▶ la distanza media risulta di  $\approx 13$  km.
- ▶ sezione catenaria  $610$  mm<sup>2</sup>.

**2) Tratta Francese:** in Francia esiste un **ulteriore problema** perché, essendo la tensione di alimentazione la **metà** di quella italiana ( $1,5$  kV<sub>cc</sub> contro  $3$  kV<sub>cc</sub>), a **parità di potenza** la corrente in linea **raddoppia** causando in **quadruplicamento** delle perdite per effetto *joule*:

$$Perdite = r \cdot L \cdot I^2 \quad [W]$$

dove, genericamente:

- $r$  = resistenza di  $1$  km di linea  $[\Omega/km]$ ,
- $L$  = lunghezza della linea  $[km]$ ,
- $I$  = corrente assorbita dalla locomotiva  $[A]$ .

Ne consegue che se si vogliono **contenere** le **perdite** allo **stesso livello** della  $3$  kV<sub>cc</sub> **bisogna agire** su  $r$ , su  $L$  o su tutte e due. I Francesi, nella tratta di valico, hanno agito su tutte e due:

- **approssimativamente dimezzando** la  $r$  col **raddoppio** della sezione complessiva catenaria,
- **approssimativamente dimezzando** la  $L$ .

Infatti:

$$Perdite = r \cdot L \cdot I^2 = r \cdot L \cdot I \cdot I \quad [W]$$

se  $I$  raddoppia diventando  $2I$  ma si dimezza nello stesso momento  $r$  e  $L$ :

$$Perdite = \frac{r}{2} \cdot \frac{L}{2} \cdot 2I \cdot 2I = r \cdot L \cdot I^2 \quad [W]$$

le perdite diventano nuovamente **uguali** alla  $3$  kV<sub>cc</sub>, pur essendo la **potenza assorbita** la **stessa**.

In definitiva quindi: **tratta di valico francese**, in zona a **maggiore estensione** (11,6 km) rispetto alla **pendenza** (30‰):

- *SSE Saint Michel – SSE Bronsonnière*  $\approx 5,3$  km
- *SSE Bronsonnière – SSE Freney (Modane)*  $\approx 6,3$  km

- ▶ la distanza media risulta di  $\approx 6$  km.
- ▶ sezione catenaria  $1.000$  mm<sup>2</sup>.

Le sottostazioni **dell'intera tratta di Valico del Frejus** sono **9** delle quali **4** alimentano la tratta francese a  $1,5$  kV<sub>cc</sub> e **5** quella italiana a  $3$  kV<sub>cc</sub>.

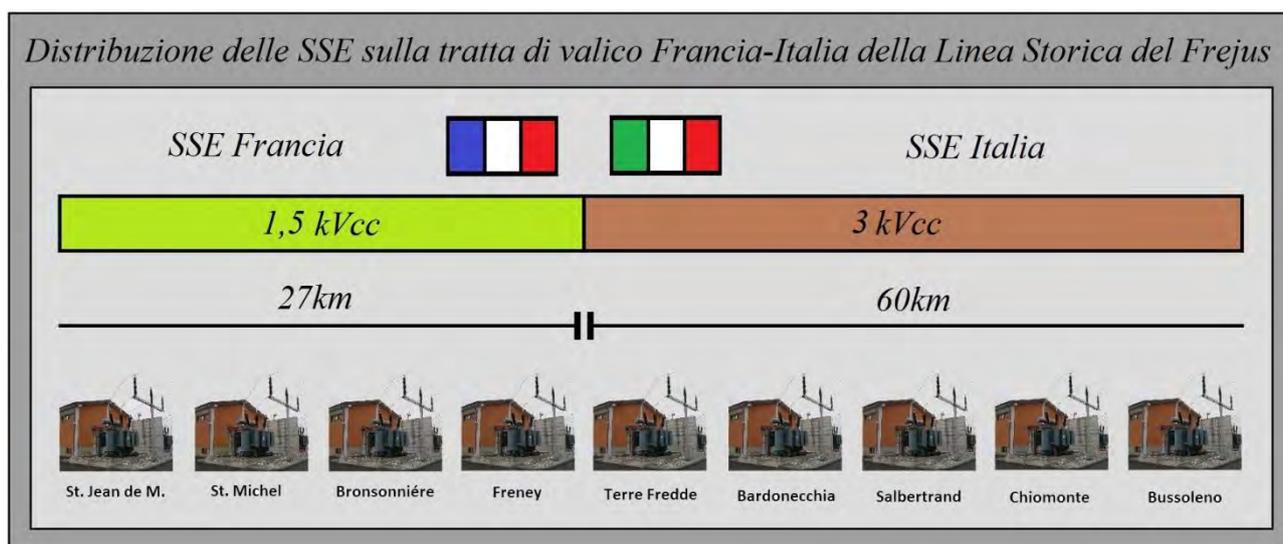


Figura 22

## 6.8 ▶ **Rendimento medio della catenaria sulla tratta di Valico del Frejus**

Per il calcolo del **rendimento medio** della **intera tratta di Valico Bussoleno – Saint Jean de Maurienne** (e viceversa) si è adottata la seguente ipotesi di lavoro:

- SSE tutte equipaggiate con 3 moduli da  $5,4$  MW come richiederebbe l'intenso traffico ipotizzato dai NoTav sulla tratta di Valico del Frejus,
- locomotive normalmente presenti tra 2 SSE: 4, comunque distribuite (un treno merci in tripla e uno in singola, due treni merci in doppia, un treno merci in tripla e un treno viaggiatori ecc..),

- corrente tipica per ogni locomotiva  $I_{LOC} = 1.100 A$ ,
- sezione totale catenaria in rame:  $S_{CP} = 610 mm^2$ ,
- tensione uscita  $SSE_1$  e  $SSE_2$ :  $3,6 kV_{CC}$  ( $3 kV_{CC}$  nominali),
- troncone di linea alimentato in parallelo con lunghezza pari alla media ( $L = 13 km$ ) fra  $SSE Bussoleno - SSE Chiomonte$  ( $15 km$ ) e  $SSE Chiomonte - SSE Salbertrand$  ( $11 km$ ),
- le  $SSE$  alimentano principalmente il binario di salita (essendo in discesa l'assorbimento molto basso, addirittura nullo con la frenatura elettrodinamica attiva).

Ogni  $SSE$  **alimenta** il tratto di **linea a valle** e **quello a monte** per cui erogherà, nelle condizioni ipotizzate, **metà potenza per lato**. Questo vuol dire che **ogni tratto**, da  $SSE$  a  $SSE$ , avrà a disposizione la potenza di **una  $SSE$** .

Prima di tutto occorre fare **due verifiche**.

► **Verifichiamo** che l'**ipotesi** di 4 locomotive **non vada oltre**, in termini di **potenza**, a quanto erogabile da **una  $SSE$**  con **tre moduli** da  $5,4 MW$ .

$$P_{SSE} = P_{MODULO} \cdot Moduli = 5,4 \cdot 3 = 16,2 MW$$

$$\text{corrente } I \text{ per } 4 \text{ loc} = I_{LOC} \cdot 4 = 1,1 \cdot 4 = 4,4 kA$$

$$P_{4,LOC} = V_{SSE} \cdot I = 3,6 \cdot 4,4 = 15,84 MW$$

→ La **potenza** è quindi, in prima approssimazione, **sufficiente**.

► **Verifichiamo** che la **tensione** non sia mai **inferiore** al limite **operativo** di  $2.700 V$ :

$$R_{TLP1km} = 17 \cdot \frac{1}{610} + 0,0125 = 0,0279 + 0,0125 = 0,04 [\Omega/km]$$

$$\Delta V_{L\_MAX\_P} = \frac{R_{TLP1km} \cdot L \cdot I}{4} = \frac{0,04 \cdot 13 \cdot 4,4}{4} = 572 V$$

$$V_{MIN} = V_{SSE} - \Delta V_{L\_MAX\_P} = 3.600 - 572 = 3.028 V$$

→ La **tensione in linea** rimane **comunque** sopra ai  $2.700 V$ , con un **margin**e di oltre  $300 V$ , in grado di **sopperire** anche a una caduta di **tensione sotto carico** della  $SSE$ .

Fatte le verifiche, calcoliamo ora:

► la **caduta di tensione media** della linea:

$$\Delta V_{L\_MEDIAP} = \frac{R_{TLP1km} \cdot L \cdot I}{6} = \frac{0,04 \cdot 13 \cdot 4,4}{6} = 381 \text{ V}$$

► la **tensione media ai locomotori**:

$$\Delta V_{LOC\_MEDIAP} = 3.600 - \Delta V_{L\_MEDIAP} = 3.600 - 381 = 3.219 \text{ V}$$

► la **potenza media ai locomotori**:

$$P_{MEDIALOC} = \Delta V_{L\_MEDIAP} \cdot I = 3,219 \cdot 4,4 = 14,164 \text{ MW}$$

A questo punto il **rendimento medio della linea** varrà:

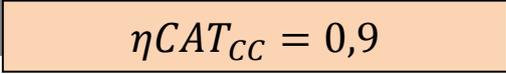
$$\eta\%_{LINEA} = \frac{P_{MEDIALOC}}{P_{4LOC}} \cdot 100 = \frac{14,164}{15,84} \cdot 100 = 89\%$$

che possiamo **approssimare** senza problemi al **90%** e ritenere **valido** anche per la **parte francese** considerato il raddoppio della sezione di catenaria e il dimezzamento delle distanze *SSE*.

Tale rendimento **specifico di questa linea** è **compatibile** con quanto riportano testi/pubblicazioni ferroviarie sull'argomento riferito alle **catenarie in generale**.

Assumeremo quindi con una  $\eta_{CAT_{CC}} = 0,9$  (90%).

► **In conclusione:**


$$\eta_{CAT_{CC}} = 0,9$$

## 6.9 ► La catenaria del tunnel di Base del Moncenisio 2x25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz

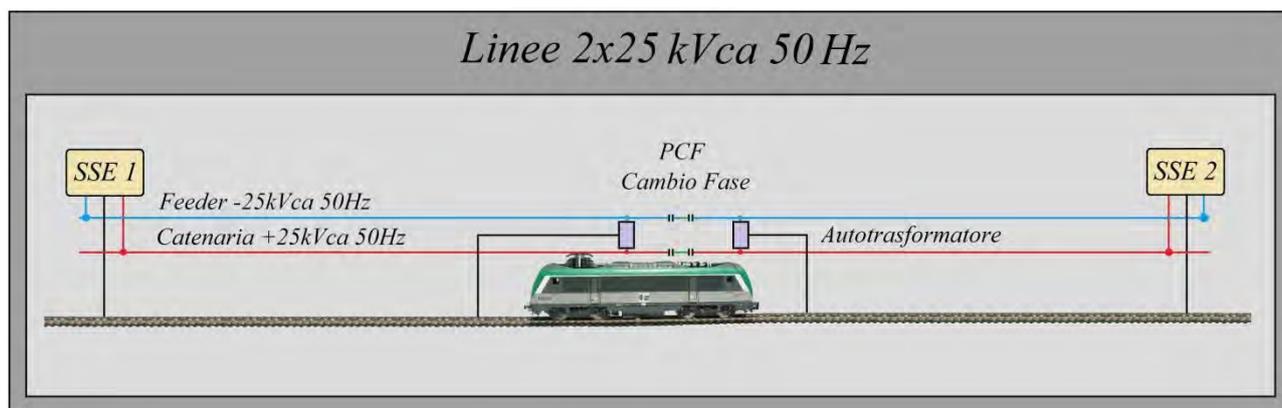


Figura 23

La **configurazione** 2x25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz della tratta inerente il **tunnel di Base del Moncenisio**, nello scenario infrastrutturale di **prima fase**, consta di:

- 3 SSE,
- 10 (5 per senso di percorrenza) posti di autotrasformazione singoli (PATS),
- 4 (2 per senso di percorrenza) posti di autotrasformazione doppi (PATD).

Nel caso specifico del **tunnel di Base del Moncenisio** il problema dello **squilibrio della rete trifase** è soddisfatto collegando tramite trasformatore la rete primaria dedicata (132 kV<sub>ca</sub> Italia - 225 kV<sub>ca</sub> Francia) **direttamente** alla 380 kV<sub>ca</sub> delle rispettive reti nazionali.

La **rotazione delle fasi** tra Susa e Saint Jean de Maurienne **sono 3** e ogni cambio fase avviene attraverso brevi **tratti neutri** della catenaria.

Allo **stato attuale** di progetto nel tunnel di Base del Moncenisio i tratti neutri sono:

- il **POC** 3 kV<sub>cc</sub> – 1° fase 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz nel tunnel d'interconnessione dell'*Orsiera*,
- il **PCF** 1° fase – 2° fase 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz presso l'*Area di Sicurezza Clarea*,
- il **PCF** 2° fase – 3° fase 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz presso la *Stazione di Modane*,
- il **POC** 3° fase 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz – 1,5 kV<sub>cc</sub> a 3 km circa dall'imbocco lato *Francia*.
- Un **PCF**, per ora **non attivo**, è previsto in prossimità dell'area di sicurezza *La Praz*.

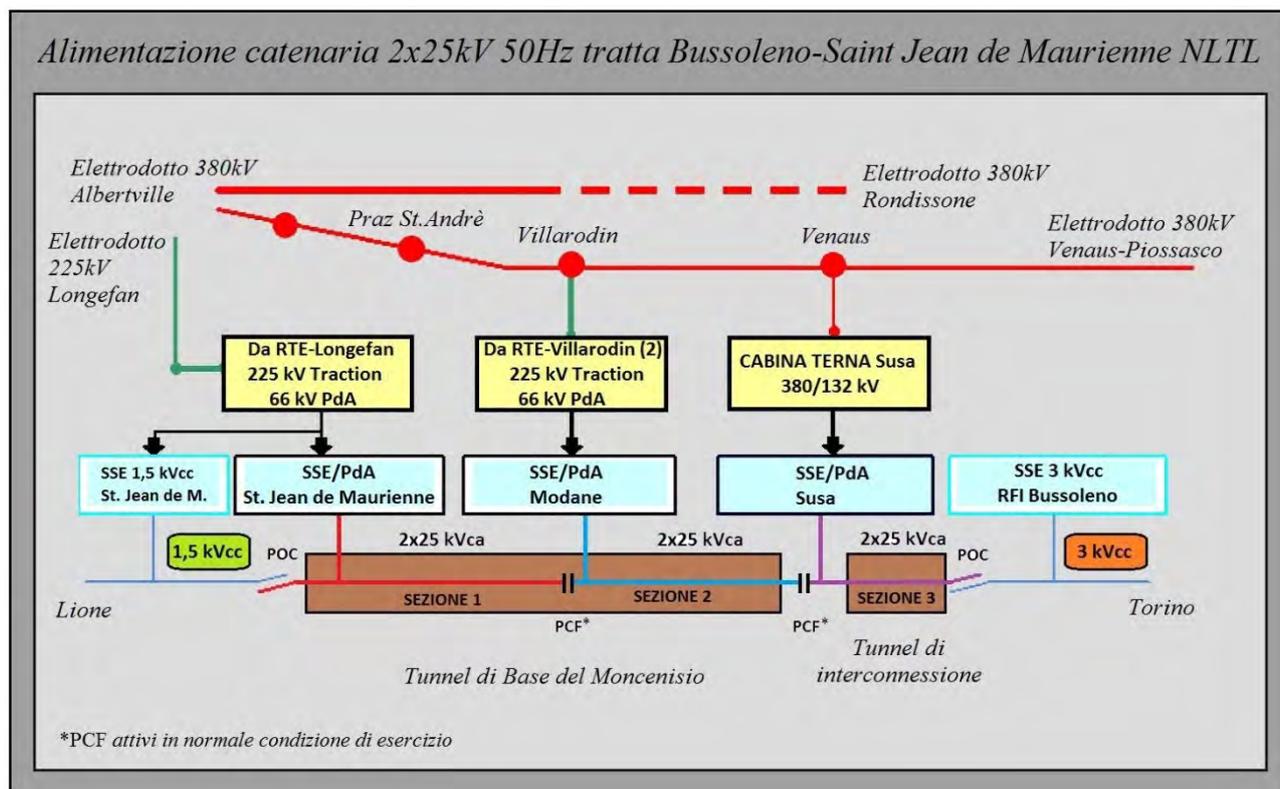


Figura 24

Il **parallelo delle catenarie** dei binari **pari/dispari**, almeno in questa **prima fase**, avviene a **livello di sottostazione** per evitare che la **mancanza di tensione**, per un **problema** su di un binario, **avvenga anche sull'altro**.

L'alimentazione delle linee  $2x25\text{ kV}_{ca}$  50 Hz avviene a **sbalzo in un solo punto**.

## 6.10 ► Rendimento medio della catenaria del tunnel di Base del Moncenisio

Lavorando in **corrente alternata** la determinazione del **rendimento** della catenaria è **molto complesso** a causa anche dei posti di **auto trasformazione** e **dell'induttanza** della linea.

E' comunque abbastanza **intuitivo** che l'**elevamento della tensione** a  $+25\text{ kV}_{ca}$  al pantografo (ma in realtà  $50\text{ kV}_{ca}$  a livello di distribuzione) e la **lunghezza delle tratte comparabili** a quelle della tratta di Valico del Frejus, crei la circolazione di correnti **molto inferiori**, anche con **grandi potenze**, determinando quindi **basse perdite** di linea.

*Catenaria 2x25kV<sub>ca</sub> 50 HZ Tunnel di base del Moncenisio (da LTF prog.def.)*

Elemento	Section / Sezione (mm <sup>2</sup> )	Matériau /Materiale
Portante	181,6	Rame puro
Filo di contatto	150 = 150*0,995 = 149.25 equivalente rame puro	Cu-Mg 0,5
Feeder negativo 25kV CA :	299	Rame

Tabella 8

*Circuiti di terra Tunnel di base del Moncenisio (da LTF prog.def.)*

Elemento	Section / Sezione (mm <sup>2</sup> )	Matériau /Materiale
>Nel Tunnel: 2 x Conduttori aerei di protezione per tunnel	147	Alluminio
>Fuori Tunnel: 1 x Conduttore di protezione aereo per binario principale	147	Alluminio
>Dentro e Fuori Tunnel: 1 x Conduttore di protezione terra interrato	95	Rame

Tabella 9

Nel **progetto definitivo LTF** del **tunnel di Base del Moncenisio**, vi è il calcolo di tale **rendimento** effettuato per mezzo di **software apposito** e, per la **normale** condizione di **esercizio**, il valore del **rendimento medio** della **linea** raggiunge il 99% ( $\eta_{CAT_{CA}} = 0,99$ ) per cui con **solo l'1% medio** di **perdita** a fronte del **10% medio** delle linee 1,5 e 3 kV<sub>cc</sub>.

► **In conclusione:**

$$\eta_{CAT_{CA}} = 0,99$$

## 6.11 ► Rendimenti in trazione e frenatura elettrodinamica delle locomotive elettroniche

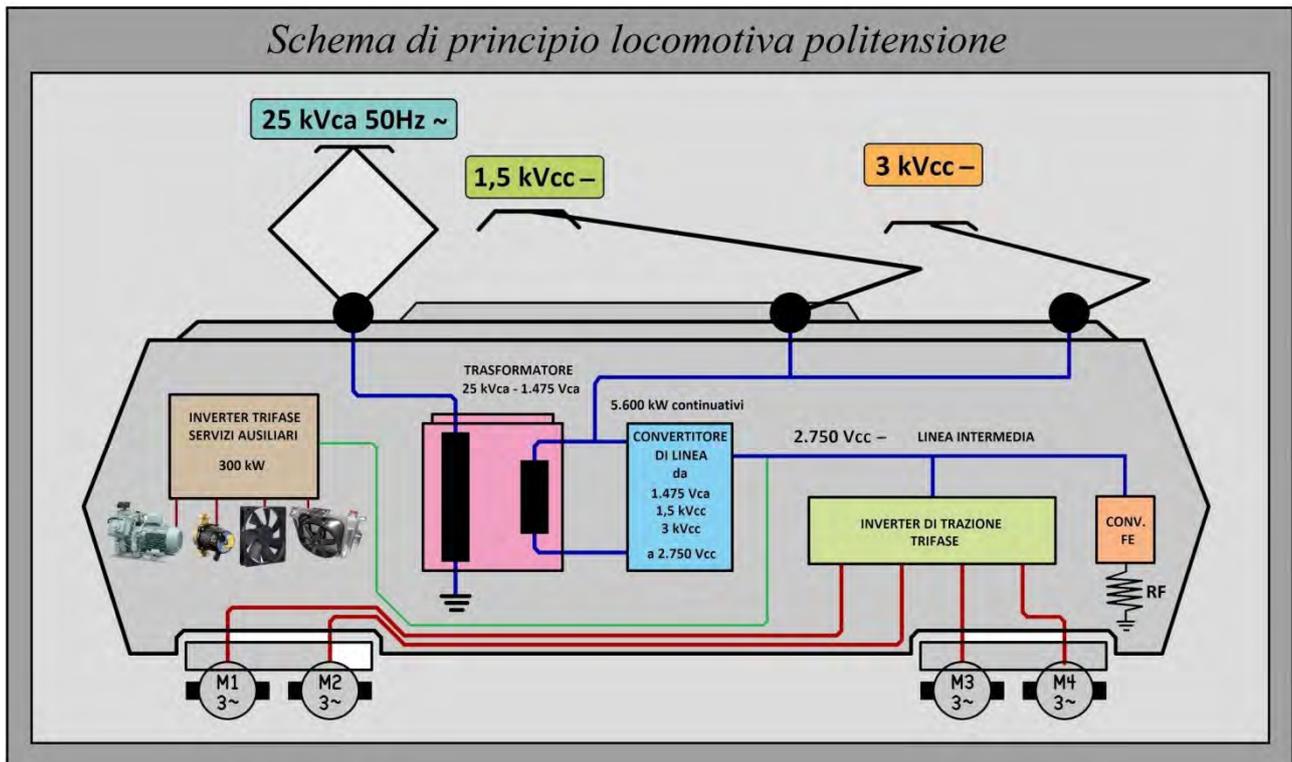


Figura 25

Le locomotive elettroniche per servizi merci delle varie imprese ferroviarie, operanti nel 2018 sulla tratta di Valico del Frejus, si dividono tra monotensione e politensione.

Le E633 e E652, monotensione, funzionano solo con 3 kV<sub>cc</sub> (1,5 kV<sub>cc</sub> a potenza limitata per i soli movimenti di manovra nell'ambito di Modane e Ventimiglia) mentre le BB36.000, politensione, possono operare a 1,5 kV<sub>cc</sub>, 3 kV<sub>cc</sub> e 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz.

Contrariamente al credere comune, grazie all'evoluzione tecnica, le moderne locomotive politensione non sono più complesse delle vecchie monotensione.

Il funzionamento di tali locomotive politensione è, dal punto di vista concettuale, molto semplice. In fig.25 è visibile lo schema di principio della BB36.000.

Nel caso del funzionamento a 1,5 kV<sub>cc</sub> e 3 kV<sub>cc</sub> la tensione è applicata direttamente al convertitore di linea mentre per la 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz è prima abbassata da un trasformatore a 1.475 V<sub>ca</sub> 50 Hz perché troppo alta. Lo scopo del convertitore di linea è porre a disposizione, alla sua uscita, una tensione intermedia (2.700 V<sub>cc</sub>) indipendente dal sistema d'alimentazione della locomotiva. Il convertitore, in base alla configurazione, funziona da raddrizzatore (con ingresso 1.475 V<sub>ca</sub> 50 Hz in

caso di alimentazione a  $25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$ ), **elevatore** ( $1,5\text{ kV}_{cc}$ ) o **abbassatore** ( $3\text{ kV}_{cc}$ ). **L'inverter di trazione** preleva la corrente dalla **linea intermedia** e la **converte in trifase per l'alimentazione dei motori**. Dalla linea intermedia del convertitore è **derivata** anche l'alimentazione per **l'inverter trifase dei servizi ausiliari**: esso serve quelle **apparecchiature accessorie** che permettono il funzionamento della locomotiva come i ventilatori dei motori, le pompe acqua dei raffreddamenti dell'elettronica di potenza, le pompe olio di raffreddamento del trasformatore, il compressore dell'aria ecc.. Sempre da tale **linea intermedia** si dirama il **circuito del convertitore della resistenza frenatura RF** che entra in gioco durante la fase di **frenatura elettrodinamica**.

Nel funzionamento **in trazione** la **corrente** dai pantografi **fluisce** verso il **convertitore di linea** e da qui **all'inverter trifase** che ne regola **l'entità** (variando tensione/frequenza) in base a quanto **voluta dal macchinista**: alla fine dell'intero processo essa è applicata ai **motori di trazione**.

Nel caso di **frenatura elettrodinamica**, invece, essendo i motori **reversibili** questi funzionano da **generatori** e riversano la **corrente prodotta** verso la **linea intermedia** tramite **l'inverter di trazione** che ora funziona da **raddrizzatore**.

A questo punto vi sono **due** possibilità di **frenatura elettrodinamica** dipendenti del **modello** di macchina in esame:

- **reostatica** ► attraverso il **convertitore di frenatura** la corrente è **dissipata** sulla **resistenza RF** per effetto joule, per cui **persa** (locomotive *BB36.000* funzionanti a  $1,5\text{ kV}_{cc}$  e  $3\text{ kV}_{cc}$  oppure a  $25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$  con linea non ricettiva),
- **a recupero** ► la corrente fluisce verso il **convertitore di linea** che, funzionando anch'esso **all'inverso**, la trasferisce al **trolley** e quindi in **catenaria**, recuperandola (locomotive *BB36.000* funzionanti a  $25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$ ). Perché quest'opzione sia possibile la linea deve però essere **ricettiva**, quindi è **necessario** un **assorbimento** da parte di qualche **utilizzatore** altrimenti la locomotiva riversa **la corrente in eccesso** nuovamente verso la **resistenza di frenatura**. E' evidente che, secondo i casi, la corrente prodotta al netto **dell'autoconsumo** della locomotiva, potrà essere immessa in catenaria dallo **0** al **100%**. La formazione di tale corrente, per opera del motore funzionante come generatore, è una **condizione assolutamente necessaria** per ottenere una **coppia frenante** altrimenti **non** si avrebbe **resistenza al moto**.

Allo stato attuale, **nessuna locomotiva merci** viaggiante sulla **tratta di Valico del Frejus** (politensione o meno) **permette il recupero** di energia in frenatura elettrodinamica. **L'unica** macchina che lo fa è la *E464* utilizzata per i treni **viaggiatori** regionali.

Dal punto di vista **energetico** i **consumi** in **trazione** sono la **somma** dell'energia di **trazione** e dei servizi **ausiliari** mentre in **frenatura elettrodinamica** l'energia **prodotta** alimenta **prima** i **servizi ausiliari** della locomotiva e del treno poi, **quello che avanza**, va in **catenaria** o sul **reostato**.

Il **bilancio** della **potenza elettrica** alla locomotiva è perciò riassumibile:

► **in trazione**: la potenza **prelevata** dalla **linea** è la **somma** di quella **meccanica** e delle **perdite** dovute al sistema di trazione (motori + ingranaggi riduttori + convertitore di linea + inverter di trazione ed eventuale trasformatore se in corrente alternata). A essa va **addizionato** il consumo dei **servizi ausiliari** delle locomotiva ed eventuali carrozze (riscaldamento, condizionamento ecc..),

► **in frenatura elettrodinamica**: la potenza **restituita** in **catenaria** (o **dissipata** dal **reostato**) è la **differenza** fra quella **meccanica prodotta** e le **perdite** dovute al sistema di frenatura (motori + ingranaggi riduttori + convertitore di linea + inverter di frenatura ed eventuale trasformatore se in corrente alternata). A essa va **sottratto** il consumo dei **servizi ausiliari** delle locomotiva ed eventuali carrozze.

Il rendimento, **variabile secondo le macchine**, si può considerare **di pari valore** sia in **trazione** sia in **frenatura elettrodinamica** e, **mediamente** molto alto, vale circa  $\eta_{LOC} = 0,87$  (87%).

► *In conclusione per le locomotive, sia in trazione sia in frenatura elettrodinamica:*

$$\eta_{LOC} = 0,87$$

I servizi ausiliari, **mediamente**, richiedono **100 kW** di consumo per macchina.

Come accennato, nel caso di convogli **viaggiatori** a carrozze, mezzi leggeri o *ETR*, esiste anche il **consumo** per il riscaldamento/condizionamento, illuminazione, carica delle batterie, gestione dei sistemi antincendio, gestione delle porte ecc.. Tale valore ammonta, in media, a circa **25 kW** per carrozze ordinarie, un po' di più per mezzi leggeri e circa il doppio per treni *AV*.

► *In conclusione, per i servizi ausiliari:*

$$\begin{aligned} Aux_{LOC} &\approx 100 \text{ kW} \\ AUX_{CARROZZE} &\approx 25 \text{ kW/carrozza} \end{aligned}$$

## 6.12 ► Rendimenti totali medi di sistema

Tirando le **somme**, i rendimenti **totali medi di sistema** per le **due** linee valgono:

- **tratta di Valico del Frejus:**  $\eta_{FREJUS} = 0,76$  (76%),
- **tunnel di Base del Moncenisio:**  $\eta_{TDBM} = 0,85$  (85%).

La **differenza** è di un **9%** a favore del **tunnel di Base del Moncenisio**: ragionando in termini di **perdite** queste ammontano al **24%** per la **tratta di Valico del Frejus** e **15%** per il **tunnel di Base del Moncenisio**.

A questi valori vanno **sommati** i consumi dei **servizi ausiliari**: mentre per i treni **merci** il contributo aggiuntivo è **basso**, per i treni **viaggiatori**, in particolare *ETR*, tale valore può diventare anche **rilevante**.

Ovviamente per i **servizi ausiliari** il valore è in funzione del **tempo di percorrenza** per cui la **tratta di Valico del Frejus**, dove i tempi sono **maggiori**, è certamente **svantaggiata**.

► *In conclusione, circa i rendimenti medi di sistema della tratta di Valico del Frejus e del nuovo tunnel di Base del Moncenisio:*

- **tratta di Valico del Frejus:**  $\eta_{FREJUS} = 0,76$  (76%) quindi con il 24% di perdite medie di sistema,
- **tunnel di Base del Moncenisio:**  $\eta_{TDBM} = 0,85$  (85%) quindi con il 15% di perdite medie di sistema,
- oltre i valori precedenti vanno considerati i **servizi ausiliari**: **basso contributo** per i treni **merci**, da **medio ad alto** per i treni **viaggiatori**. Più si **allungano** i tempi di **percorrenza**, più l'aggiuntivo dei servizi ausiliari **sale**.

## **PARTE    SETTIMA**

# **PRINCIPALI DIFFERENZE TRA LA TRATTA DI VALICO DEL FREJUS ED IL TUNNEL DI BASE DEL MONCENISIO**

## 7.1 ► Differenze sulla resistenza globale alla trazione

Ricordando quanto riportato nella "parte seconda - le forze resistenti", la **resistenza globale** alla **trazione**  $\Sigma R_{TM}$  per un treno merci varrà:

$$\Sigma R_{TM} = \frac{M_T \cdot (25 + 0,0030 V^2 + g \cdot i + 8.000/r)}{1.000} \quad [kN]$$

con:

$$r_{vTM} = 25 + 0,0030 V^2 \quad [N/t]$$

Partendo dalla formula precedente è possibile esaminare una **situazione reale** sulla **tratta di Valico del Frejus** tracciando le curve di **sforzo di trazione** di un treno **merci in singola trazione** su pendenze  $i$  : +30 ‰, 0 ‰, -30 ‰.

Le pendenze  $i$  ipotizzate si verificano nei tronconi:

- > +30 ‰ ► *Bardonecchia – km1* (salita),
- > 0 ‰ ► *km1 – culmine* (in realtà +1‰ , che poniamo 0‰ : l'errore è minimo),
- > -30‰ ► *Salbertrand – Chiomonte* (discesa).

Supponiamo che il treno **merci** ed il **tracciato** abbiano queste **caratteristiche tecniche**:

- $M_{Loc}$  = massa locomotiva 90 t
- $M_R$  = massa rimorchiata 650 t
- tracciato con 50% di curve con raggio di circa 600 m.

Considerato che:

$$M_T = M_{Loc} + M_R = 90 + 650 = 740 t$$

otteniamo i tre casi sostituendo ad  $i$  +30, 0, -30:

$$\Sigma R_{TM1} = \frac{740 \cdot (25 + 0,0030 V^2 + 9,8 \cdot i + 0,5 \cdot 8000/600)}{1.000} \quad [kN]$$

e li riportiamo sul grafico 17:

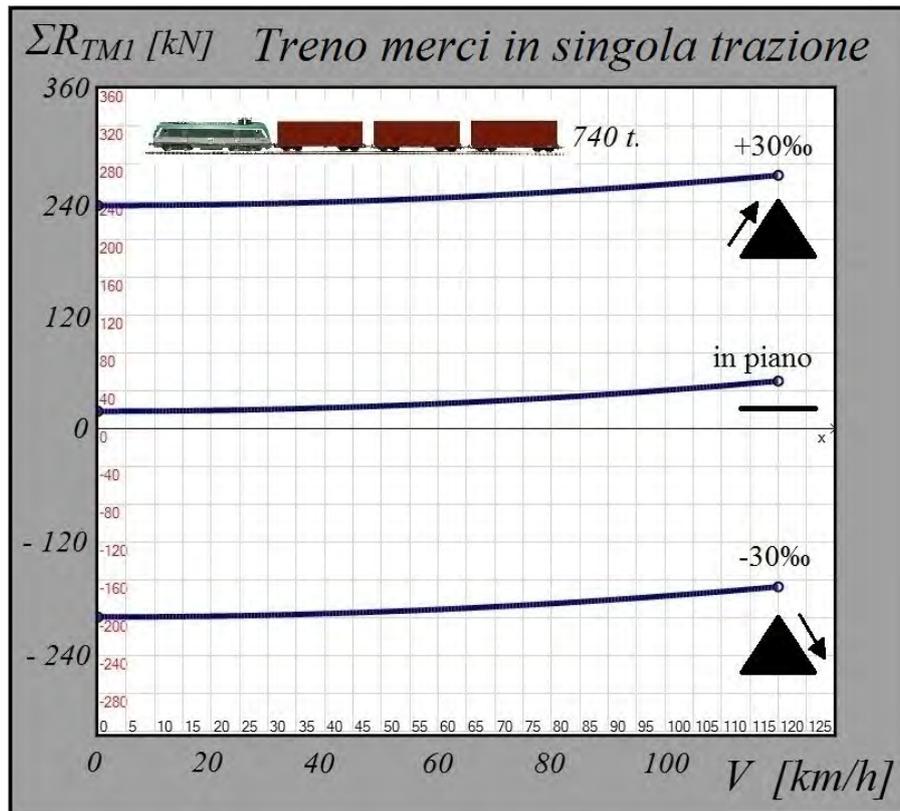


Grafico 17

Com'è possibile osservare, la **componente** riguardante la **gravità** fa sì che nel caso di pendenza in **salita** +30‰ vi sia una **grande**  $\Sigma R$  e che quindi si debba compiere un grande **sforzo** di **trazione**, rispetto alla **pianura**, mentre nel caso della **discesa**, -30‰, si debba esercitare un grande **sforzo** di **frenatura**.

Nei due grafici seguenti, il 18 e 19, sono riportate le  $\Sigma R$  delle tratte in **salita** riferiti ad alcuni **treni tipici** per **tratta di Valico del Frejus** (+30‰) e il futuro **tunnel di Base del Moncenisio** (+11‰).

**N.B.** ► La pendenza dell'11‰ nel **tunnel di Base del Moncenisio** è concentrata principalmente dal **lato italiano**. Nelle **tratte di adduzione** al tunnel, ambo i lati, vi è un picco di **breve estensione** al 12‰ che, per la sua **esiguità**, non viene considerato.

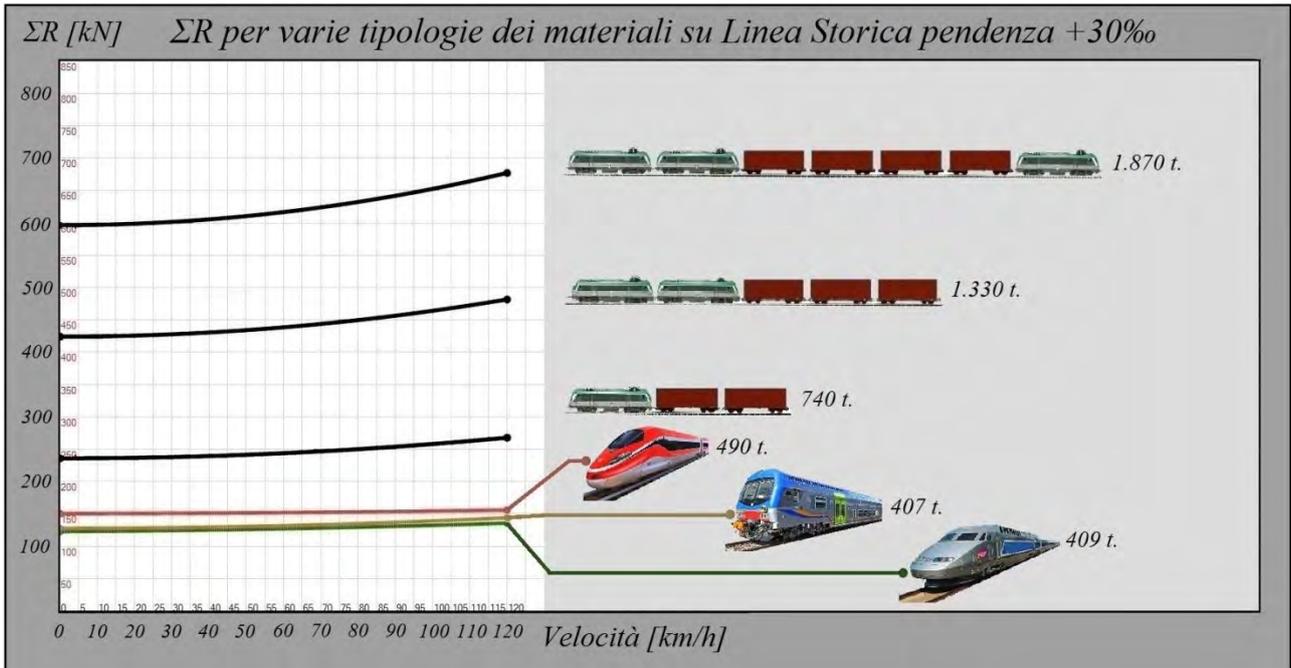


Grafico 18

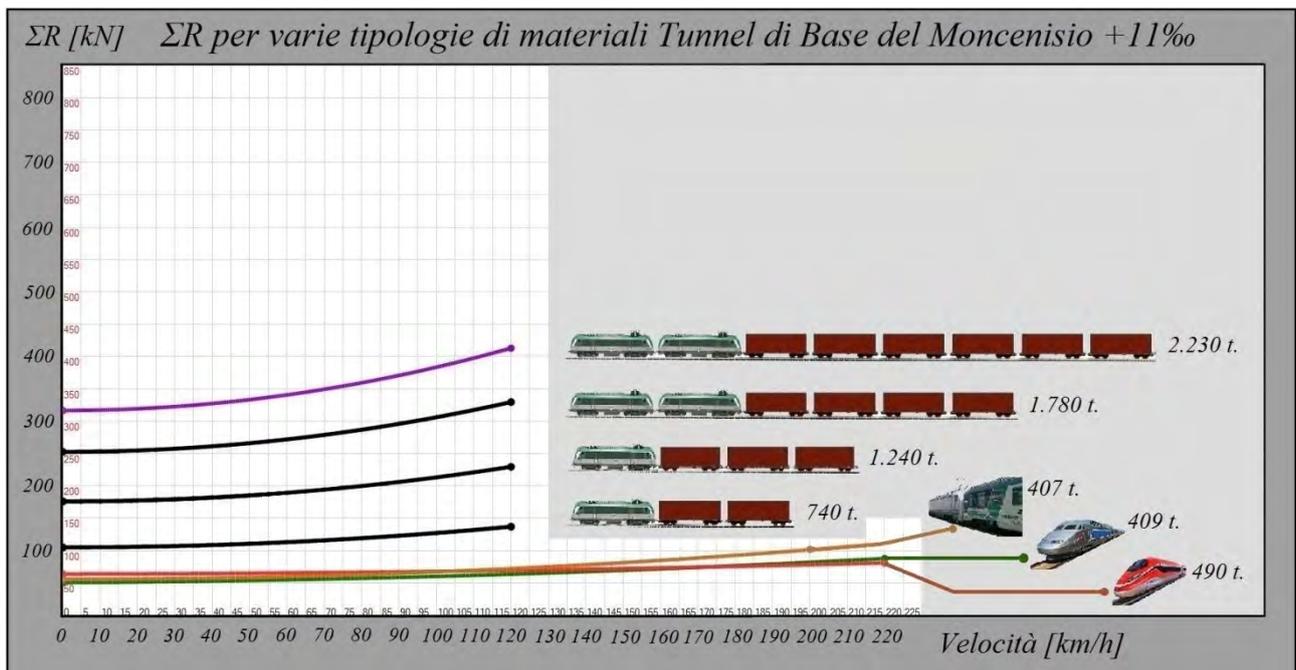


Grafico 19

I due grafici si commentano da soli: per consentire **l'avviamento** ad un treno merci di **1.600 t** di massa rimorchiata (1.870 t comprensivo di locomotori) sulla **tratta di Valico del Frejus** sono necessari **600 kN** di sforzo di trazione mentre per vincere la  $\Sigma R$  dello **stesso treno** nel **tunnel di Base del Moncenisio** occorrono solo **250 kN**.

Inoltre, sempre nel **tunnel di Base del Moncenisio**, è possibile con **320 kN** di sforzo di trazione avviare un treno merci di **2.050 t** di massa rimorchiata (2.230 t comprensivo di locomotori). In altre parole è possibile avviare tale treno merci, di circa **un terzo più pesante** di quello **massimo tecnicamente** possibile sulla **tratta di Valico del Frejus**, con **poco più della metà dello sforzo di trazione** necessario a quest'ultimo.

E di pari passo vanno gli altri convogli.

Poiché **all'avviamento**, in entrambi i tracciati, a **parità di convoglio** la  $r_v$  è molto minore di  $r_g$  e assumendo per **semplicità** uguale su entrambi l'influenza delle curve, si può affermare che la **differenza  $\Sigma R$**  è dovuta **approssimativamente** dal **rapporto** delle due  $r_g$  per cui:

$$\text{Rapporto } \Sigma R \approx \frac{r_{g30\text{‰}}}{r_{g12\text{‰}}} \approx 2,5 \quad [\text{adimensionale}]$$

La **resistenza globale alla trazione all'avviamento  $\Sigma R$**  è importante perché, come visto al punto 4.1, quantifica **lo sforzo di trazione all'avviamento** e quindi la **prestazione** e **numero di locomotori** necessari per il treno.

► *In conclusione per quanto riguarda le differenze sulla resistenza globale alla trazione:*

- la **resistenza globale alla trazione all'avviamento  $\Sigma R$**  della tratta di Valico del Frejus è di circa **2,5 volte superiore** a quella del tunnel di Base del Moncenisio. In altre parole la **resistenza globale alla trazione all'avviamento  $\Sigma R$**  del tunnel di Base del Moncenisio è il **40%** di quella della tratta di Valico del Frejus.
- **minore  $\Sigma R$**  permette una **maggiore massa rimorchiata** o un **numero minore di locomotori a parità di massa**.

## 7.2 ► Differenze Energetiche

Per la valutazione delle **differenze energetiche** si sono analizzati alcuni treni **tipici merci**: per la tratta di Valico del Frejus quelli **realmente operanti**, per il tunnel di Base del Moncenisio quelli **previsti**.

Per completezza, e anche per **verificare** certe **affermazioni Notav**, si è pure **aggiunto** un treno **viaggiatori lunga percorrenza con materiale AV**, in altre parole un **ETR1000**: si è **supposto** che tale convoglio percorra **entrambe le linee**.

Ovviamente, **non essendo** il troncone **Torino – Lione AV**, esso sfrutterà al massimo le sue capacità solo nel **resto del percorso** proseguendo quindi sulle linee AV (es. *Torino – Milano, Lione – Parigi*).

Si è preso in considerazione **l'ETR1000** perché rappresenta lo **standard del futuro** sia come **tecnologie costruttive** sia come **apparecchiature di sicurezza (ERTMS/ETCS L2, in cosiddetto "blocco radio")**.

Nelle tab.10 e 11 sono riportati, in sintesi, i dati di tali convogli.

Trazione	Tipologia treno tipico Linea di Valico del Frejus	Massa lorda t	Massa totale
singola		650	740
doppia		1.150	1.330
trippla		1.600	1.870
ETR1000		454	501

Tabella 10

Trazione	Tipologia treno tipico Tunnel di Base del Moncenisio	Massa lorda t	Massa totale
doppia		1.600	1.780
doppia		2.050	2.230
ETR1000		454	501

Tabella 11

► Per quel che concerne il calcolo delle **energie del convoglio**, su **entrambe** le **linee** si sono adottate le seguenti ipotesi di lavoro dando per assodato che i treni **marcino** già in velocità sia in **ingresso** sia in **uscita** dalle **tratte in esame**:

↑ **in salita**

- determinazione dell'energia **assorbita** dalla **catenaria** con i criteri del punto 5.4 **sommando** successivamente i **servizi ausiliari** di cui al punto 6.10 (100 kWh per locomotiva, 230 kWh per l'ETR1.000),
- determinazione dell'energia **assorbita** dalla **linea primaria** tenendo conto dei **rendimenti di sistema** riportati al punto 6.11 ( $\eta_{FREJUS} = 76\%$ ,  $\eta_{TDBM} = 85\%$ ),

↓ **in discesa**

- determinazione dell'energia **generata** al **pantografo** in fase di **frenatura elettrodinamica** con i criteri del punto 5.4 cui sono **sottratti** prima i **consumi** dei **servizi ausiliari** di cui al punto 6.11,
- determinazione dell'energia **restituita** alla **linea primaria** oppure **scambiata treno/treno** tenendo conto dei **rendimenti di sistema** del punto 6.12 e della **ricettività della linea**. In accordo al punto 6.5 per cui le **SSE 2x25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz** sono **sempre reversibili**, la linea del **tunnel di Base del Moncenisio** si considera **sempre ricettiva** ( $\eta_{TDBM,FE} = 85\%$ ) mentre in accordo al punto 6.4 per cui le **SSE 3 kV<sub>cc</sub>** **non sono reversibili**, si tiene conto della **penalizzazione** dovuta alla non costante ricettività della linea ( $\eta_{FREJUS,FE,NO,SSE} = 30\%$ ).  
In **quest'ultimo caso** si sono anche supposte delle **ipotetiche SSE 3 kV<sub>cc</sub>** **reversibili**, per cui con le **sole perdite di sistema** a 3 kV<sub>cc</sub>, al fine di verificare se vi fossero **differenze sostanziali** rispetto al caso precedente ( $\eta_{FREJUS,FE,SI,SSE} = 76\%$ ).

Del punto 5.4 pag.57 si applica la seguente **formula ridotta** in quanto il treno si ritiene già in **velocità**. In caso contrario andrebbe applicata quella **completa** poiché vi sarebbe da **aggiungere** l'energia assorbita nella fase di **accelerazione**.

$$E_{assorbita} = \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} + \frac{M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S}{3.600.000} \quad [kWh]$$

con:

$E_{assorbita}$  = energia assorbita netta,

$M_T$  = massa totale del treno in esame [t],

$S$  = spostamento (vedere punto seguente alle voci "lunghezza tratta") [m],

$r_v$  = resistenza unitaria dovuta ai veicoli in base alle formule di pag.10 [N/t],

$\rho$  = resistenza unitaria delle curve (vedere punto seguente alla voce "curve") [N/t].

► Per quel che concerne le **linee**, si sono adottate queste ipotesi:

- per la **tratta di Valico del Frejus** si sono supposte la **salita** e la **discesa** lato **Italia**: salita da *Bussoleno* al *Culmine* (lunghezza tratta 50.351 m)- discesa dal *km1 Tunnel del Frejus* fino a *Bussoleno* (lunghezza tratta 42.259 m),
- per il nuovo **tunnel di Base del Moncenisio**, si sono supposte la **salita** e la **discesa** lato **Italia**, *Bussoleno – Culmine* e viceversa (lunghezza tratta 33.731 m),
- le scelte precedenti sono giustificate da una questione di **reperimento dati**. Al fine del **risultato finale** la scelta operata è comunque **irrilevante** considerato che esiste una sostanziale **simmetria** dei **versanti** al lato del **culmine**. La discesa della **tratta di Valico del Frejus** inizia nel punto **effettivo** di **acclività**.
- per le **curve** si adotta un aggiuntivo  $\rho$  di 3 N/t per la tratta di Valico del Frejus e 1 N/t per tunnel di Base del Moncenisio.

► Per quel che concerne le **velocità dei convogli**, si sono adottate queste ipotesi:

- in **salita tratta di Valico del Frejus**: 100 km/h per qualunque convoglio,
- in **salita tunnel di Base del Moncenisio**: 100 oppure 120 km/h per i treni merci e 200 km/h per l'*ETR1000*. La velocità effettiva prevista da LTF è 220 km/h, si è intenzionalmente lasciato un certo margine.
- in **discesa tratta di Valico del Frejus**: 80 o 55 km/h per i treni merci, in base all'efficienza frenante, e 100 km/h per l'*ETR1000*,
- in **discesa tunnel di Base del Moncenisio**: 100 oppure 120 km/h per i treni merci e 200 km/h per l'*ETR1000*. La velocità effettiva prevista da LTF è 220 km/h, si è intenzionalmente lasciato un certo margine.

► Si specifica inoltre che:

- sulla **discesa** della **tratta di Valico del Frejus**, per consentire maggiore accuratezza del calcolo sul recupero di energia, si è provveduto alla **suddivisione** della stessa in **tre** spezzoni omogenei. Tale accorgimento non è necessario nel tunnel di Base del Moncenisio.
- Tutti i **risultati energetici** ottenuti dai vari calcoli sono stati **divisi** per le rispettive **tonnellate di massa del treno** in modo di avere gli assorbimenti formulati come **energia specifica "ass/t"** (*assorbimento/tonnellate*) ed espressi come unità di misura in **kWh/t** riferiti **all'estensione** delle tratte **Valle – Culmine – Valle** delle singole linee.

CONFRONTO ENERGIE													
Treni					NO FE			Valico Frejus				TdB Moncenisio	
					NO FE			SI FE				SI FE	
					Eprim ass/t	Eprim ass/t	Eprim ass/t media	Eprim ass/t	Eprim ass/t media	Eprim ass/t	Eprim ass/t media	Eprim ass/t	Eprim ass/t media
Linea	Treno	Velocità salita	Velocità discesa	Massa treno	η76%	η85%	Eprim ass/t media	η76%		η30%		η85%	
Cl. 1	Cl. 2	Cl. 3	Cl. 4	Cl. 5	Cl. 6	Cl. 7	Cl. 8	Cl. 9	Cl. 10	Cl. 11	Cl. 12	Cl. 13	Cl. 14
		km/h	km/h	t	kWh/t	kWh/t	kWh/t	kWh/t	kWh/t	kWh/t	kWh/t	kWh/t	kWh/t
Valico Frejus	Merci	100	80	740	4,22			3,25		3,84			
		100	80	1330	4,23		4,23	3,17	3,28	3,81	3,86		
		100	55	1870	4,24			3,43		3,92			
	ETR1000	100	100	501	3,81			2,40		3,26			
Tunnel di Base	Merci	120	120	1780		1,80	1,72					1,66	1,53
		100	100	2230		1,65						1,40	
	ETR1000	200	200	501		1,57						1,27	

Tabella 12

Nella tab.12 sono **riassunti** i **risultati** che si possono trovare in **dettaglio** nell'allegato A.

Nelle **prime colonne** della tab.12 sono riportati: il tipo di **linea** (cl. 1), il **treno** (cl. 2), la **velocità** tipica di **salita** (cl.3), la **velocità** tipica di **discesa** (cl.4) e infine la **massa** del treno in esame (cl. 5).

Le **colonne successive**, da **sinistra** a **destra**, hanno il seguente significato:

- **Eprim η76% NO FE (cl.6): energia specifica assorbita** dalla rete primaria in assenza di recupero di energia sulla **tratta di Valico del Frejus**,
- **Eprim η85% NO FE (cl.7): energia specifica assorbita** dalla rete primaria in assenza di recupero di energia nel **tunnel di Base del Moncenisio**,
- **Eprim media NO FE (cl.8): media dell'energia specifica assorbita** dalla rete primaria dalle varie tipologie di **treni merci** in **assenza** di recupero di energia **entrambe le linee**,
- **Eprim η76% SI FE (cl.9): bilancio energetico specifico finale** eseguendo la **differenza** tra l'energia specifica assorbita della rete primaria e il recupero di energia specifica in discesa in fase di frenatura elettrodinamica sulla **tratta di Valico del Frejus** supponendo le **SSE 1,5 kV<sub>cc</sub> e 3 kV<sub>cc</sub> reversibili**,
- **Eprim η76% SI FE (cl.10): media del bilancio energetico specifico finale** delle varie tipologie di **treni merci** eseguendo la **differenza** tra l'energia specifica assorbita della rete primaria e il recupero di energia specifica in

discesa in fase di frenatura elettrodinamica sulla **tratta di Valico del Frejus**, supponendo le **SSE 1,5 kV<sub>cc</sub> e 3 kV<sub>cc</sub> reversibili**,

- **Eprim  $\eta_{30\%}$  SI FE (cl.11): *bilancio energetico specifico finale* eseguendo la **differenza** tra l'energia specifica assorbita della rete primaria e il recupero di energia specifica in discesa in fase di frenatura elettrodinamica sulla **tratta di Valico del Frejus** nel caso **reale di SSE 1,5 kV<sub>cc</sub> e 3 kV<sub>cc</sub> non reversibili**,**
- **Eprim  $\eta_{30\%}$  SI FE (cl.12): *media del bilancio energetico specifico finale* delle varie tipologie di **treni merci** considerando la **differenza** tra l'energia specifica assorbita della rete primaria e il recupero di energia specifica in discesa in fase di frenatura elettrodinamica sulla **tratta di Valico del Frejus** nel caso **reale di SSE 1,5 kV<sub>cc</sub> e 3 kV<sub>cc</sub> non reversibili**,**
- **Eprim  $\eta_{85\%}$  SI FE (cl.13): *bilancio energetico specifico finale* eseguendo la **differenza** tra l'energia specifica assorbita della rete primaria e il recupero di energia specifica in discesa in fase di frenatura elettrodinamica nel **tunnel di Base del Moncenisio** (catenaria sempre ricettiva),**
- **Eprim  $\eta_{85\%}$  SI FE (cl.14): *media del bilancio energetico specifico finale* delle varie tipologie di **treni merci** eseguendo la **differenza** tra l'energia specifica assorbita della rete primaria e il recupero di energia specifica in discesa in fase di frenatura elettrodinamica nel **tunnel di Base del Moncenisio** (catenaria sempre ricettiva).**

I **numeri** con la **percentuale**, ovviamente, si riferiscono ai **rendimenti di sistema applicati** al calcolo in oggetto. Nel caso del "**bilancio energetico finale**" riferito alle colonne "Eprim  $\eta_{30\%}$  SI FE", il rendimento considerato per la salita è  $\eta = 76\%$ .

**Confrontando** le varie **energie specifiche** si evince che:

- **Caso 1)** il rapporto tra l'**energia specifica assorbita** dalla **rete primaria** della **media** dei **treni merci** percorrenti la tratta di Valico del Frejus (4,23 kW/t) e quello rispettivo del bilancio energetico specifico del tunnel di Base del Moncenisio (1,53 kW/t) è di **2,76:1 (36%)** [cl.8/cl.14].  
*(tratta di Valico del Frejus percorsa da locomotive non attrezzate con la frenatura elettrodinamica a recupero di energia mentre le locomotive del tunnel di Base del Moncenisio frenano a recupero sotto la catenaria 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz - **caso reale**).*
- **Caso 2)** il rapporto tra il **bilancio energetico specifico finale** della **media** dei **treni merci** percorrenti la tratta di Valico del Frejus con **SSE 1,5 kV<sub>cc</sub> e 3 kV<sub>cc</sub> non reversibili** (3,86 kW/t) e quello rispettivo del tunnel di Base del Moncenisio (1,53 kW/t) è di **2,52:1 (40%)** [cl.12/cl.14].  
*(tutte e due le linee supposte percorse da locomotive attrezzate con la frenatura elettrodinamica a recupero di energia - **caso ipotetico**).*

- **Caso 3)** il **rapporto** tra il **bilancio energetico specifico finale** della **media** dei **treni merci** percorrenti la tratta di Valico del Frejus con **SSE 1,5 kV<sub>cc</sub> e 3 kV<sub>cc</sub> supposte reversibili** (3,28 kW/t) e quello rispettivo del tunnel di Base del Moncenisio (1,53 kW/t) è di **2,14:1 (47%)** [cl.10/cl.14].  
*(tutte e due le linee supposte percorse da locomotive attrezzate con la frenatura elettrodinamica a recupero di energia - **caso ipotetico**).*
- **Caso 4)** il **rapporto** tra l'**energia specifica assorbita** dalla **rete primaria** dal **più pesante treno merci** percorrente la tratta di Valico del Frejus (1.870 t – 4,24 kW/t) e il bilancio energetico specifico finale del **più pesante treno merci** del tunnel di Base del Moncenisio (2.230 t – 1,40 kW/t) è di **3,03:1 (33%)** [cl.6/cl.13].  
*(tratta di Valico del Frejus percorsa da locomotive non attrezzate con la frenatura elettrodinamica a recupero di energia mentre le locomotive del tunnel di Base del Moncenisio frenano a recupero sotto la catenaria 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz - **caso reale**).*
- **Caso 5)** il **rapporto** tra il **bilancio energetico specifico dell'ETR1000** percorrente la tratta di Valico del Frejus a **100 km/h** (3,26 kW/t) e quello rispettivo del tunnel di Base del Moncenisio percorso a **200 km/h** (1,27 kW/t) è di **2,57:1 (39%)** [cl.11/cl.13]  
*(l'ETR1000 frena elettrodinamicamente sotto entrambe le catenarie - **caso reale**).*

**Analizzando i risultati si conclude** che:

- il **rapporto** tra le **energie specifiche** della tratta di Valico del Frejus e il tunnel di Base del Moncenisio per i **treni merci** spazia, **secondo i casi**, tra **3,03:1** e **2,52:1** (quindi il passaggio nel tunnel di Base del Moncenisio richiede solo dal **33%** al **40%** dell'energia utilizzata per lo stesso passaggio sulla tratta di Valico del Frejus),
- il **rapporto** tra le **energie specifiche** tra la tratta di Valico del Frejus e il tunnel di Base del Moncenisio per i **treni viaggiatori** con materiale tipo **ETR1000** vale **2,57:1**, ma la **velocità** nel tunnel di base del Moncenisio è **doppia**, quindi **200km/h** contro **100km/h** (quindi il passaggio nel tunnel di Base del Moncenisio richiede solo il **39%** dell'energia utilizzata per il passaggio sulla tratta di Valico del Frejus),
- il **rapporto** tra le **energie specifiche** della tratta di Valico del Frejus **supposta** con **SSE reversibili** e le corrispondenti nel tunnel di Base del Moncenisio per i **treni merci** vale **2,14:1**, quindi un valore **non molto** dissimile da quello di normale esercizio che vale **2,52:1** (in termini percentuali una differenza del solo **7%**) In altre parole **rendere le SSE reversibili non muterebbe sostanzialmente la situazione energetica**. Nel caso d'ipotesi **d'accumulo a supercondensatori** la condizione finale sarebbe **intermedia** alla due prospettate perché le **SSE 1,5 kV<sub>cc</sub> e 3 kV<sub>cc</sub> reversibili** rappresentano la soluzione a **rendimento maggiore**,

- nonostante il **raddoppio** della **velocità** di un convoglio tipo **ETR1000**, il **rapporto** delle due **energie specifiche** è di ben **2,57:1** (quindi il passaggio nel tunnel di Base del Moncenisio richiede solo il **39%** dell'energia utilizzata per il passaggio sulla tratta di Valico del Frejus).

Se il tunnel permettesse i **300 km/h**, e tenendo conto di una **maggiorazione** di assorbimento in catenaria del 10% (poiché la resistenza aerodinamica aggiuntiva della galleria si fa sentire a quella velocità) il risultato sarebbe di **2,7 kWh/t**. In altre parole **ancora inferiore** a quello della tratta di Valico del Frejus che vale **3,26 kWh/t**, con un rapporto **1,21:1** (quindi il passaggio nel tunnel di Base del Moncenisio richiederebbe solo l'**83%** dell'energia utilizzata per il passaggio sulla tratta di Valico del Frejus).

Anche se l'effetto **aerodinamico** della galleria sul treno fosse **maggiore**, portando addirittura il rapporto energetico a **1:1**, sulle due linee si consumerebbe la **stessa energia** per andare da **Bussoleno a Saint Jean de Maurienne** (e viceversa). Ma va considerato che in un caso si viaggia a **100km/h**, impiegando circa **78 minuti**, mentre nell'altro caso, a **300 km/h**, il tempo di percorrenza diventa **16 minuti**.

In altre parole, **consumando la stessa energia**, si **risparmierrebbe** più di **un'ora**.

In **realtà** i **treni viaggiatori** con materiale tipo **ETR1000** sono previsti nel tunnel di Base del Moncenisio a **220 km/h**, per limite dell'infrastruttura, quindi il tempo di percorrenza è **24 minuti** con un risparmio di **quasi un'ora** (54 minuti). E tutto questo impiegando circa il **40%** di **energia** rispetto alla tratta di Valico del Frejus.

Analizzando le **tabelle dell'allegato A** è possibile osservare, per le tratte in **discesa**, una colonna che si riferisce all'energia da **smaltire col freno pneumatico**: tale colonna presenta valori **positivi** e **negativi**.

Dal punto di vista della **condotta del treno** i valori **positivi** si riferiscono all'energia **realmente** da smaltire **pneumaticamente** poiché il treno **non può** in quella tratta essere **trattenuto** dalla sola **frenatura elettrodinamica**. I valori **negativi**, invece, indicano che il treno può essere **trattenuto** dalla **frenatura elettrodinamica** per cui non vi è **nulla** da smaltire **pneumaticamente**.

Com'è possibile osservare, per la tratta di Valico del Frejus (tranne la tratta *Beaulard – Salbertand* che è meno acclive) **parte** dell'energia della discesa dei **treni merci** deve essere smaltita per via **pneumatica**. Nel caso del tunnel di Base del Moncenisio, invece, **tutti treni sono sempre trattenuti** elettrodinamicamente; va da sé, inoltre, che considerata l'**esiguità** della **massa l'ETR1000** è **sempre trattenuto** su **entrambe** le linee.

Al riguardo, circa l'**importanza** della **trattenuta** del **treno**, se ne parlerà diffusamente nel punto seguente 7.3.

I **dati** della **tab.12** permettono anche un **rapido calcolo** quantitativo **dell'energia** effettivamente **consumata** dalla **sottostazione** da un **treno** di un certo **tonnellaggio**, in una certa **modalità operativa** e con determinata **velocità uniforme** che vada da **Bussoleno a Saint Jean de Maurienne** (o viceversa).

Ad esempio, se si considera un treno in **doppia trazione** di **massa totale**  $M_T = 1.330 t$  sulla **tratta di Valico del Frejus** senza recupero di energia, basterà prendere il **relativo dato** della cl.6 ( $4,23 kWh/t$ ) e **moltiplicarlo** per la **massa**.

Quindi:

$$4,23 \cdot 1.330 = 5.626 kWh$$

Moltiplicando **ulteriormente** il risultato per il **rendimento di sistema**, è possibile sapere **l'energia netta** richiesta al locomotore/ri. Nel caso della tratta di Valico del Frejus esso vale  $\eta = 76\%$  per cui 0,76.

Quindi:

$$5.626 \cdot 0,76 = 4.290 kWh$$

Un treno di massa totale  $M_T = 2.230 t$  nel **tunnel di Base del Moncenisio** con recupero di energia in frenatura elettrodinamica, invece, consumerà dalla **linea primaria**  $3.122 kWh$  mentre quella netta al locomotore sarà  $2.653 kWh$  (cl.13,  $1,40 kWh/t$ ,  $\eta = 85\%$ ).

Lo **stesso principio** è applicabile negli altri contesti. Per le masse dei treni merci **diverse** dai valori in tabella basta attingere ai **valori medi** (in questo caso, ovviamente, il risultato è approssimato).

Il metodo sopra descritto è valido, chiaramente, per questi valori standard pre-calcolati.

Nel caso s'intenda utilizzare **dati molto diversi**, vale la formula ridotta del punto 5.4 pag.57, quindi:

$$E_{assorbita} = \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} + \frac{M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S}{3.600.000} \quad [kWh]$$

con:

$E_{assorbita}$  = energia assorbita netta,

$M_T$  = massa totale del treno [t],

$S$  = spostamento [m],

$r_v$  = resistenza unitaria dovuta ai veicoli in base alle formule di pag.10 [N/t],

$\rho$  = resistenza unitaria dovuta alle curve [N/t].

Applichiamo in pratica tale formula.

Supponiamo di voler calcolare **l'energia** assorbita dalla **linea primaria** da due treni di massa rimorchiata  $M_R = 1.150 t$  che percorrono la tratta **Torino Orbassano – Bussoleno** e poi si diramano: uno sulla **tratta di Valico del Frejus** e l'altro nel **tunnel di Base del Moncenisio** per ricongiungersi alla fine a **Saint Jean de Maurienne**.

Per semplicità **non vi è** recupero di energia.

Dati:

- $\Delta h$  Torino Orbassano – Culmine tratta di Valico del Frejus: 1.035 m (855 + 180 m),
- $\Delta h$  Torino Orbassano – Culmine tunnel di Base del Moncenisio: 490 m (310 + 180 m),
- $S_{LS}$ : linea Storica del Frejus, *To Orb – Culmine*: 93.950 m,
- $S_{NLTL}$ : NLTL, *To Orb – Bussoleno* 43.598 m, *Bussoleno – Culmine* 33.731 m,
- velocità convoglio: 100 km/h,
- rendimento di sistema tratta di Valico del Frejus  $\eta = 76\%$ ,
- rendimento di sistema tunnel di Base del Moncenisio  $\eta = 85\%$ ,
- rendimento di sistema *Torino Orbassano – Bussoleno*  $\eta = 76\%$ ,
- per la salita della tratta di Valico del Frejus occorrono due locomotive per cui la massa totale del treno diventa  $M_T = 1.330 t$ ,
- per la salita nel tunnel di Base del Moncenisio occorre una sola locomotiva per cui la massa totale del treno diventa  $M_T = 1.240 t$ ,
- influenza curve  $\rho$ : tralasciata, per semplicità,
- $r_v$ : quella di un treno merci data dalla formula:  $r_{vTM} = 25 + 0,0030 V^2$  [N/t] ,
- le tratte in discesa sono affrontate solo con l'assorbimento dei servizi ausiliari che per semplicità trascuriamo. La frenatura è quindi esclusivamente pneumatica.

Svolgendo i calcoli si ottiene:

- **Torino Orb. – Saint Jean de Maurienne** via tratta di Valico del Frejus:
  - energia necessaria **5.656 kWh**,
  - energia assorbita dalla linea primaria **7.468 kWh**.
- **Torino Orb. – Saint Jean de Maurienne** via tunnel di Base del Moncenisio:
  - energia necessaria **3.119 kWh** (1.685 + 1.434 kWh – monte/valle),
  - energia assorbita dalla linea primaria **3.869 kWh** (1.982 + 1.887 kWh – monte/valle).

Esaminando i risultati, è possibile evincere che lo stesso treno di  $M_R = 1.150 t$  nell'intero percorso **Torino Orbassano – Saint Jean de Maurienne**, se instradato via tunnel di Base del Moncenisio, consuma **la metà** rispetto alla tratta di Valico del Frejus.

**N.B.** ► La sola tratta *Torino Orbassano – Saint Jean de Maurienne* via tunnel di Base del Moncenisio, come calcolo, è spezzata in due a *Bussoleno* perché i rendimenti di sistema da applicare sono diversi. *Torino Orb. – Bussoleno*  $\eta = 76\%$ , *Bussoleno – Culmine*  $\eta = 85\%$ .

Qualora s'intenda conoscere quanto assorbirà un treno comprensivo di locomotive di massa totale da  $M_T = 2.230 t$  ( $M_R = 2.050 t$ ), il **massimo previsto** nel tunnel di Base del Moncenisio, basterà rifare i calcoli con la nuova massa (velocità sempre 100 km/h).

I risultati saranno:

- **Torino Orb. – Saint Jean de Maurienne** via tunnel di Base del Moncenisio:
  - energia necessaria **5.608 kWh** (3.031 + 2.577 kWh – monte/valle),
  - energia assorbita dalla linea primaria **6.956 kWh** (3.566 + 3.390 kWh – monte/valle).

Confrontiamo i due dati:

- Treno  $M_R = 1.150 t$  → assorbimento linea primaria **7.468 kWh**,
- Treno  $M_R = 2.050 t$  → assorbimento linea **6.956 kWh**.

Com'è possibile osservare, nella tratta **Torino Orb. – Saint Jean de Maurienne** un **treno merci** di una **determinata massa** che percorra la **tratta di Valico del Frejus** e uno di **massa quasi doppia** che percorra (alla stessa velocità) il **tunnel di Base del Moncenisio**, presentano un **assorbimento dalla linea primaria poco dissimile**.

In realtà, per la questione del **recupero di energia con frenatura elettrodinamica**, il **consumo** risulta **inferiore** per il convoglio instradato via **tunnel di Base del Moncenisio**.

**In altre parole si trasporta di più consumando di meno**

► **In conclusione circa le differenze energetiche:**

- un treno **merci** percorrente il **tunnel di Base del Moncenisio** consuma dal **33% al 40%** di **energia** rispetto al suo passaggio sulla **tratta di Valico del Frejus**, secondo i casi di bilancio energetico,
- l'**ETR1000** percorrente il **tunnel di Base del Moncenisio** a **200 km/h** consuma (tenendo conto del recupero di energia in frenatura elettrodinamica) il **39%** di **energia** rispetto al suo passaggio sulla **tratta di Valico del Frejus** percorsa a **100km/h**. In altre parole si **risparmia** circa **un'ora** di percorrenza **consumando molto di meno**,
- se per assurdo l'**ETR1000** potesse correre a **300km/h** nel **tunnel di Base del Moncenisio**, avrebbe lo **stesso consumo di energia** (tenendo conto del recupero di energia in frenatura elettrodinamica) del suo passaggio sulla **tratta di Valico del Frejus** a **100 km/h**. Però, invece di impiegare **78 minuti** fra **Bussoleno a Saint Jean de Maurienne**, impiegherebbe solo **16 minuti**.
- qualora s'intendesse **ottimizzare il bilancio energetico** della **tratta di Valico del Frejus** rendendo le **SSE reversibili** si avrebbero dei benefici **minimi**, con un miglioramento del **bilancio energetico** solamente del **7%**.
- se si volesse **ottimizzare il bilancio energetico** della **tratta di Valico del Frejus** utilizzando un sistema di **accumulo di energia a Supercondensatori** non è possibile sperare in **rendimenti superiori** al sistema delle **SSE reversibili**.

## 7.3 ► Differenze sulla frenatura

### ► Frenatura elettrodinamica

Come accennato al punto 3.2, il solo **arresto spontaneo** dovuto alle **resistenze  $\Sigma R$** , tranne il caso particolare in salita per certi treni e certe pendenze, **non è in grado** di rispettare gli **spazi di fermata** richiesti da un convoglio per cui si deve **ricorrere** all'operazione di **frenatura**.

Nelle linee con il blocco elettrico automatico attrezzato con la ripetizione dei segnali in macchina come la *Modane*, lo spazio è di circa **2.700 m** e rappresenta la distanza nel momento della captazione a bordo del codice che annuncia l'arresto e il segnale fisico disposto al rosso.

Tale **spazio di frenatura  $S_F$**  può essere **attendibilmente calcolato** attraverso una formula ricavata dai bilanci energetici in gioco tenendo conto che **l'energia cinetica  $E_C$**  del treno è **integralmente assorbita** dalla **forza deceleratrice  $F_D$** :

$$E_C = F_D \cdot S_F \quad \blacktriangleright \quad \frac{1}{2} \cdot M_T \cdot V^2 = (\Sigma R + F_F) \cdot S_F \quad \blacktriangleright \quad S_F = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_T \cdot V^2}{\Sigma R + F_F}$$

quindi:

$$S_F = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_T \cdot V^2}{\frac{M_T}{1.000} \cdot (r_g + r_v + \rho) + F_F} \quad [m]$$

dove:

$S_F$  = spazio di frenata [m],

$V$  = velocità del convoglio antecedente la frenatura [m/s],

$F_F$  = forza frenante supposta costante pneumatica o elettrodinamica o entrambe (**ai fini della formula si considerano col segno positivo**) [kN],

$\Sigma R$  = resistenza globale alla trazione [kN],

$M_T$  = massa totale del treno [t],

$r_g, r_v, \rho$  = resistenze unitarie di gravità, veicoli e curve [N/t].

Nella tab.12 sono riportati gli **spazi di fermata a velocità commerciale** con un **convoglio viaggiatori** e un **treno merci** in alcune tratte significative.

Per semplicità si supporrà **costante** lo **sforzo** di frenatura elettrodinamico alle varie velocità anche se, in realtà, per la locomotiva *E464* lo sforzo **diminuisce sensibilmente** alle **alte velocità** mentre per la *BB36.000* avviene lo stesso però alle **basse velocità**. Le distanze con frenatura elettrodinamica, per questo motivo, sono da ritenersi **indicative**.

Treno	Tratta		$i$ [%]	V [km/h]	Spazio di fermata [km]	
					senza FE	con FE
Viaggiatori	Bussoleno	Salbertrand	26	105*	≈ 1,3	≈ 0,8
	S.Ambrogio	Avigliana	-4	155*	≈ 19**	≈ 3,6
	Avigliana	S.Ambrogio	4	155*	≈ 7,3**	≈ 2,6
Merci	Bussoleno	Salbertrand	26	100*	≈ 1,3	≈ 0,9
	S.Ambrogio	Avigliana	-4	100*	≈ 25**	≈ 3
	Avigliana	S.Ambrogio	4	100*	≈ 4,1**	≈ 1,9
* Velocità commerciale in quella tratta.						
** Spazio teorico perché quello reale tra le due località è inferiore (3,7 km).						

Tabella 12

Dati:

► **treno viaggiatori:**

- 5 carrozze *Vivalto*,
- locomotiva *E464*,
- massa totale del treno compresa loc. e viaggiatori a pieno carico  $M_T = 407 t$ ,
- frenatura elettrodinamica massima locomotiva  $FE = -85 kN$ ;

► **treno merci:**

- doppia trazione *Avigliana – S. Antonino* e viceversa,
- tripla trazione *Bussoleno – Salbertrand*,
- massa totale del treno  $M_T = 1.780 t$  e  $1.870 t$ ,
- 2 o 3 locomotive *BB36.000*,
- frenatura elettrodinamica massima complessiva delle 2 locomotive di testa  $FE = -200 kN$ .

L'esame della tab.12 consente alcune considerazioni interessanti:

- **entrambi** i convogli in salita *Bussoleno – Salbertrand* **si fermano** entro lo **spazio richiesto**, a **velocità commerciale**, senza l'apporto di alcuna frenatura: in altre parole esclusivamente togliendo la trazione (e ovviamente, a maggior ragione, con la frenatura elettrodinamica),
- per **entrambi** i convogli in **salita** nella tratta *Avigliana – S.Ambrogio* il rispetto si ha solo con **almeno** l'apporto della **frenatura elettrodinamica**,

- in **tutti** gli **altri** casi per ottenere **l'arresto** nello spazio concesso **oltre** alla **frenatura elettrodinamica** è necessaria la **sovrapposizione** della **frenatura pneumatica**.

Dall'esame della **formula** della  $S_F$  si evince invece che **in discesa**:

- quando  $r_g + (r_v + \rho) \leq 0$  **non** è possibile **l'arresto spontaneo** (con  $F_F = 0$ ),
- quando  $\frac{M_T}{1.000} \cdot (r_g + r_v + \rho) + F_F \leq 0$  **non** è possibile, oltre **all'arresto spontaneo**, **neanche** quello con la sola **frenatura elettrodinamica** (in questo caso si suppone che  $F_F$  sia di **sola** frenatura elettrodinamica).

**E' però possibile raggiungere una velocità costante di equilibrio**

► **Riassumendo, circa la frenatura elettrodinamica:**

- nelle tratte in **salita** può, secondo i casi, **fermare** un convoglio nel prescritto **spazio di frenatura**. Per certi treni può anche **non rendersi** necessaria perché questi sono in grado di rispettare lo spazio di frenatura anche solo **togliendo la trazione**,
- nelle tratte in **pianura** e in **discesa**, **difficilmente** permette **l'arresto** del convoglio nel prescritto **spazio di frenatura**. E' quindi utilizzata in **sovrapposizione** alla **frenatura pneumatica**,
- nelle tratte in **discesa** può essere utilizzata, entro **certi limiti operativi**, per **trattenere** il **convoglio** a **velocità costante**. Tale pratica permette il **non utilizzo** della **frenatura pneumatica** con **evidenti vantaggi** e consente al treno la **migliore marcia possibile**.

Per un determinato **treno** di **massa**  $M_T$  e di **resistenza specifica**  $r_v$ , quindi, è possibile tracciare un **grafico** che permetta di conoscere a quanto ammonta lo **sforzo** di **frenatura elettrodinamico**  $S_{F_C}$  in **funzione** della **pendenza** per consentire la **discesa** del **convoglio** a **velocità costante** ( $V = k$ ) **senza l'uso del freno pneumatico**.

Tale grafico è uno **step successivo** del grafico 2 pag.13 in cui si tiene conto anche della **massa** del treno e della **resistenza**  $r_v$  alla **velocità costante** di convoglio desiderata. Per semplicità si considera la resistenza delle curve compresa nella  $r_v$ .

$$S_{T_C} \text{ oppure } S_{F_C} = \frac{M_T \cdot (r_v + g \cdot i)}{1.000} \quad [kN] \quad \blacktriangleright \text{ con } V = k$$

Il grafico 20 è un **esempio** tracciato per un treno **viaggiatori reale** con:

- materiale con 6 carrozze media distanza (quelli che fanno servizio attualmente fino a *Modane*),
- locomotiva *E464*,
- massa  $M_T = 351 t$ ,
- massimo  $SF_C$  della locomotiva *E464* =  $-85 kN$ ,
- velocità di marcia  $95 km/h$  (quindi:  $r_v \approx 45 N/t$  e  $R_v \approx 16 kN$ ).

La velocità di **95 km/h** è quella **massima ammessa** in **discesa** per questa tipologia di treno considerata **l'efficacia frenante pneumatica** sulle tratte più acclivi della tratta di Valico del Frejus lato *Italia*.

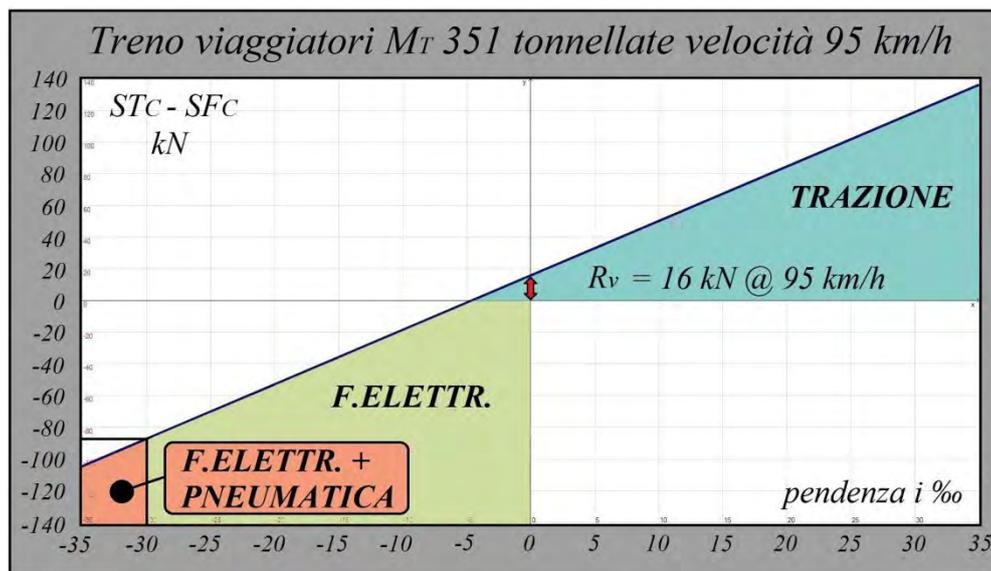


Grafico 20

Com'è possibile evincere dal grafico 20, alla pendenza  $-30\%$  l' $SF_C$  richiesto al locomotore è di  $-85 kN$  che coincide il **massimo fornibile** dal locomotore *E464* in servizio al treno in oggetto: per pendenze inferiori necessitano  $SF_C$  anch'essi inferiori.

Questo vuol dire che il convoglio dell'esempio può **scendere** dalla **tratta di Valico del Frejus** alla **velocità di marcia** costante di **95 km/h** senza alcun contributo della **frenatura pneumatica**, se non in caso di **fermata**.

Tale apporto, come visibile dal grafico 20, sarebbe invece **necessario** per **pendenze superiori**. Si noti che **a causa** della  $R_v$  intorno al  $-5\%$ , pur essendo in **discesa**, il locomotore deve **passare** dalla **frenatura** alla **trazione** per vincere tale forza altrimenti il treno si **fermerebbe** (se i veicoli **non** presentassero resistenza  $R_v$  la retta passerebbe per **l'origine degli assi**). Sulla parte destra del grafico, inoltre è possibile quantificare lo sforzo di trazione per la **salita**. La retta è tracciata in **discesa** per una  $r_v$  di  $95 km/h$ , a causa dell'efficienza frenante pneumatica, mentre in salita la velocità commerciale è sensibilmente superiore,  $105 km/h$ . In realtà, essendo contenuto lo **scarto** tra i due valori, **tale retta** si può **considerare attendibile** per entrambi.

Analizzando la **retta** nel settore "**trazione**" è possibile constatare che nella tratta *Bussoleno – Salbertrand* con  $i = +26\%$ , lo **sforzo di trazione**  $ST_C$  richiesto al **locomotore** per trainare il treno a **105 km/h** è di poco superiore ai **100 kN**.

Discorso diverso è per un **treno merci**. Nel **caso tipico** di un treno di  $M_R = 1.600 t$  che sale la tratta di Valico del Frejus, la trazione avviene con **tre locomotive attive** mentre per la discesa la **frenatura elettrodinamica** è attiva solo sulle due macchine di testa. Inoltre, le **specifiche istruzioni** sulla **frenatura (IEFCA)** nel caso di **discese continuate**, fig.26, prescrivono alle imprese di trasporto che lo **sforzo complessivo** non possa superare i **-200 kN** anche se le stesse permettono un **valore maggiore** ( $-130 kN @ 55 km/h$  per ogni BB36.000).

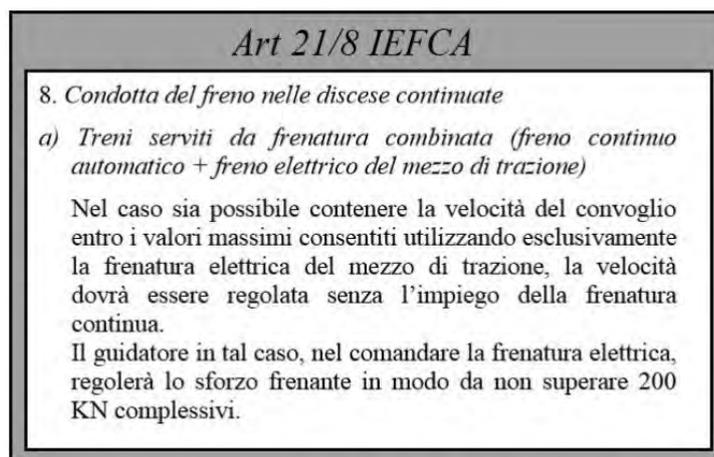


Figura 26

Esaminiamo il **caso reale** di un **treno merci Francia – Italia** cui è stata **sganciata** a *Salbertrand* la macchina di **spinta** in coda utilizzata per la **salita** da *Modane* a *P.C. Frejus*.

Il treno di  $M_T = 1.780 t$  **prosegue** con le **due** macchine di **testa** BB36.000 con  $FE = -200 kN$ . La sua **velocità** è comunque **limitata** a  $V_{MAX} = 55 km/h$  dall'efficienza **frenante pneumatica** (ricordo che la velocità massima è sempre calcolata in base all'efficienza della frenatura **pneumatica** che è **prioritaria**, a prescindere dall'azione di quella elettrodinamica).

E' possibile osservare nel grafico 21 che per **pendenze in discesa superiori** al  $-15\%$  le locomotive **non** sono più in grado di **trattenere** il convoglio poiché si richiederebbe uno  $SF_C$  **superiore** ai  $-200 kN$  e quindi alla frenatura elettrodinamica diventa necessario **sovrapporre** quella pneumatica. Nella parte destra del grafico, dove compare lo sforzo di trazione necessario alla salita con tre locomotive, esiste una **discontinuità** alla retta nel punto di **ascissa zero**. Questo perché la velocità commerciale di **salita** è di  $V_{MAX} = 100 km/h$  (3 locomotive BB36.000 garantiscono uno sforzo di  $600 kN @ 100 km/h$ ) e quindi la  $R_v$  è **differente** da 55 a 100 km/h (in altre parole non è possibile utilizzare una sola retta come grafico 20).

Si noti che in **trazione** 600 kN portano sul grafico 21 a una **pendenza max**  $i = 28\%$ . Considerato che, tolta la tratta *Bardonecchia – km1* con  $i = 30\%$ , che comunque è **limitata** a 75 km/h dalla **velocità di linea**, la tratta in salita presenta al massimo un  $i = 26\%$  con la conseguenza che la **velocità commerciale** di **100 km/h** è possibile in **intera tratta** (si ricorda che la retta di **trazione** è tracciata per una  $r_v$  a 100km/h).

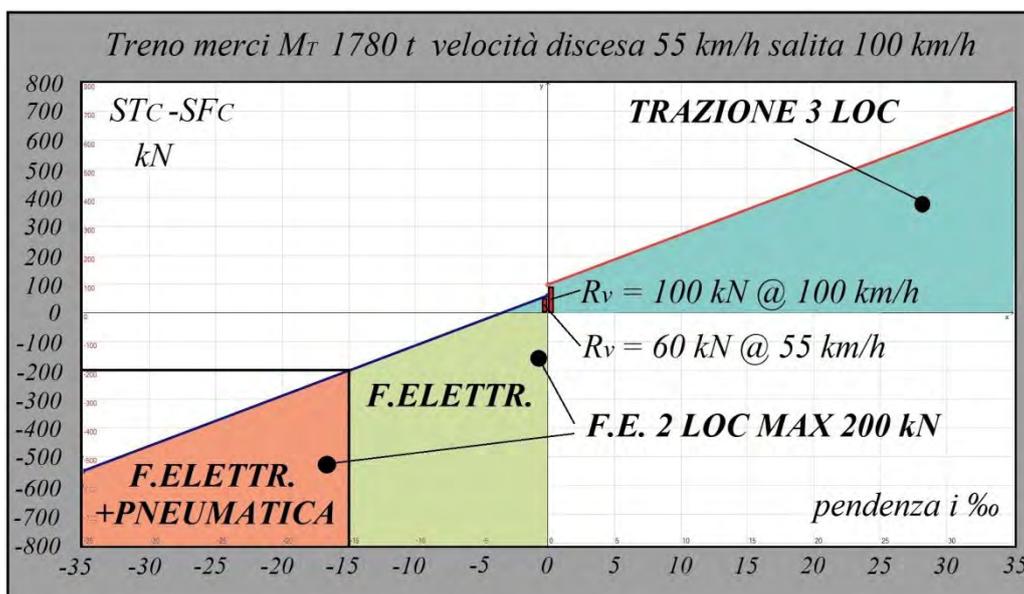


Grafico 21

Nel grafico 22 è possibile osservare la **pendenza massima di trattenuta** del convoglio con la sola **frenatura elettrodinamica** per **tre tipici merci** trainati da locomotive **BB36.000**, tenuto conto delle **velocità massime** permesse dall'**efficacia frenante pneumatica**  $\%P_f$ . I treni riportati in tab.13, e le **rispettive rette** del grafico 22, hanno il **medesimo colore**.

Tipologia di treni:

Colore		Tipologia di treno Linea Storica	Massa lorda t	Velocità massima km/h	%Pf
	marrone		650	80	95
	verde		1.150	80	95
	grigio		1.600	55	60

Tabella 13

Pendenza massima di **trattenuta** del convoglio con la sola frenatura elettrodinamica:

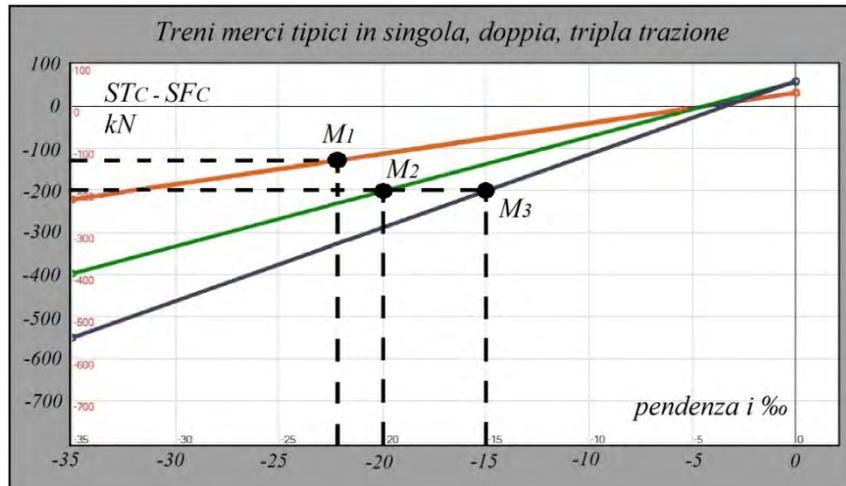


Grafico 22

E' evidente che per **nessuno** di questi convogli le locomotive sono in grado di **trattenere** il rispettivo treno fino al  $-30\text{‰}$  (si ricorda che anche in tripla trazione le locomotive frenanti elettrodinamicamente sono solo le due di testa). In tab.14, ultima colonna, sono riportate le **pendenze massime di trattenuta**:

Colore retta	Tipologia di treno Linea Storica	Massa lorda t	Punto M	Pendenza trattenuta MAX ‰
marrone		650	M1	-22,5
verde		1.150	M2	-20
grigio		1.600	M3	-15

Tabella 14

**N.B. 1** ► In singola trazione la locomotiva BB36.000 a 80 km/h ha uno  $SF_c$  di  $-130$  kN.

**N.B. 2** ► Si ricorda che sia in doppia sia tripla trazione frenano elettricamente solo le due locomotive di testa con  $SF_c$  **limitato**, per prescrizione RFI, a  $-200$  kN complessivi.

La **situazione di frenatura elettrodinamica** presentata in precedenza può essere vista anche in **altra ottica** ovvero tramite una **curva** che mette in **relazione** la **massa** totale del treno  $M_T$  con la **pendenza**  $i$  di **discesa**.

**Questa permette di determinare, per una determinata velocità costante, la massima massa  $M_T$  del treno che può essere trattenuta con l'apporto della sola frenatura elettrodinamica.**

Nel caso dei **treni merci**, poi, **sottraendo** dalla suddetta massa  $M_T$  quella delle locomotive  $M_{Loc}$ , si ottiene la **massa lorda del treno**.

Quindi:

$$M_T = \frac{1000 \cdot SF_C}{r_g - r_v} \quad [t] \quad \blacktriangleright \text{ con } V = k$$

dove:

$SF_C$  = sforzo frenante al cerchione in frenatura elettrodinamica [kN],

$r_v$  = resistenza unitaria dei veicoli, per semplicità comprensivo curve [N/t],

$r_g$  = resistenza unitaria dovuta alla gravità [N/t].

Di tali **grafici** ne sono stati elaborati **due**, uno per la **tratta di Valico del Frejus** e uno per il nuovo **tunnel di Base del Moncenisio**.

A quello della **tratta di Valico del Frejus** è stato **aggiunto** in rosso il **treno viaggiatori regionale** utilizzato per l'esempio del grafico 20.

Il **TGV** non compare perché con  $SF_C = -145 \text{ kN@}100 \text{ km/h}$  e composizione bloccata di 550 t a pieno carico, la frenatura elettrodinamica di trattenuta è **sempre sufficiente**.

**► tratta di Valico del Frejus**

→ Tipologie di treni in esame per la tratta di Valico del Frejus:

Colore	Tipologia di treno Linea Storica	Massa lorda t	Velocità massima km/h	%Pf
marrone		650	80	95
verde		1.150	80	95
grigia		1.600	55	60
rossa		351	95	120

Tabella 15

→ **Curve di relazione** con  $V = k$  della **massa** totale del treno  $M_T$  rispetto alla **pendenza  $i$**  di **discesa** della tratta di Valico del Frejus:

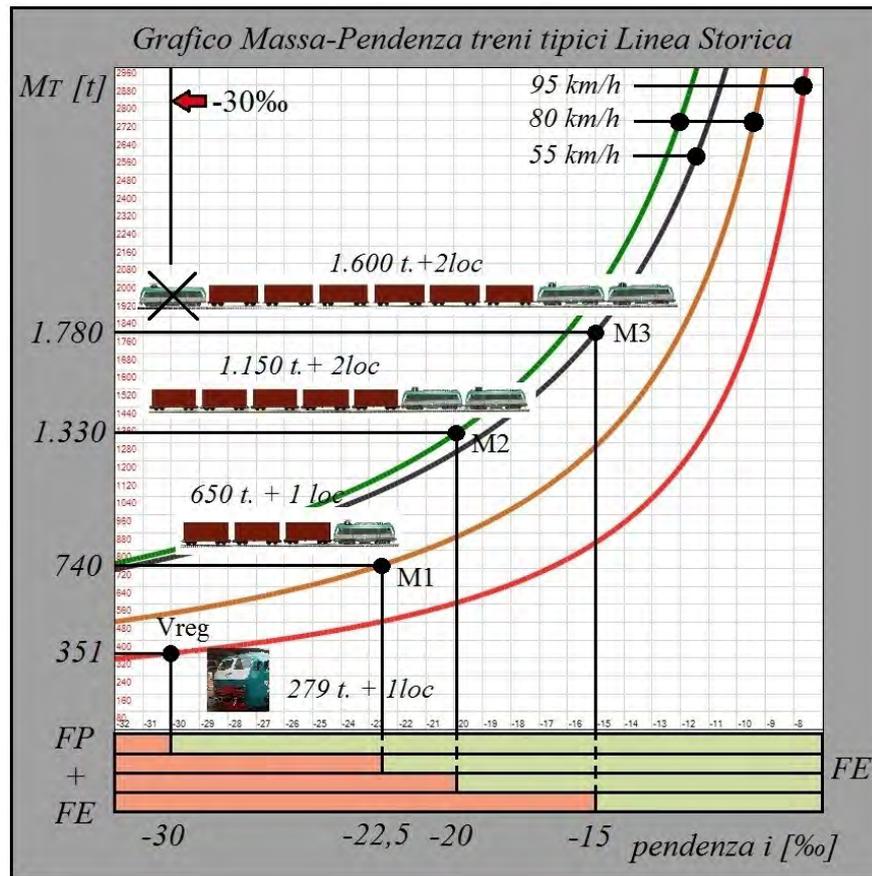


Grafico 23

→ Pendenze massime di trattenuta dei treni in esame sulla tratta di Valico del Frejus ricavate dal grafico 23:

Colore curva	Tipologia di treno Linea Storica	Massa lorda t	Punto M	Pendenza trattenuta MAX %
marrone		650	M1	-22,5
verde		1.150	M2	-20
grigia		1.600	M3	-15
rossa		351	Vreg	-30

Tabella 16

Poiché la **pendenza massima in discesa della tratta di Valico del Frejus** è del **30 ‰**, dalla tab.16 è possibile evincere che, **tranne il treno regionale**, tutti **gli altri convogli** in esame **devono ricorrere** in tutto o in parte del percorso alla **frenatura mista** poiché la sola frenatura elettrodinamica **non è sufficiente**.

► **tunnel di Base del Moncenisio**

Per quel che riguarda il nuovo tunnel di Base del Moncenisio sono analizzati **due** convogli tipici **previsti da LTF** in "PD2\_C2B\_0575\_30-01-00\_10-01\_SSE-Relazione tecnica generale di dimensionamento\_B\_F" (curva colore viola) ai quali per completezza ho **aggiunto due** treni **merci** in singola trazione (colori giallo e rosso). Anche qui non compare il *TGV* perché se la frenatura elettrodinamica di trattenuta è sufficiente sulla tratta di Valico del Frejus a maggior ragione lo è nel tunnel di Base del Moncenisio.

**N.B.1** ► La  $\%P_f$  non è specificata perché nel tunnel di Base il distanziamento avviene col blocco radio per cui il sistema *ERTMS/ETCS Livello 2* concede le "autorizzazioni al movimento" per distanze di frenatura che tengono conto della velocità richiesta in quel momento e dell'efficienza frenante.

**N.B.2** ► I tonnellaggi dei due treni aggiunti, non previsti dallo studio *LTF* (curve gialla e rossa), sono calcolati per permettere la velocità di marcia prevista in base allo sforzo di trazione di una loc. sull' 11‰.

→ Tipologie di treni in esame per il tunnel di Base del Moncenisio:

Colore	Tipologia di treno Tunnel di Base del Moncenisio	Massa lorda t	Velocità massima km/h	%Pf
viola		2.050	120	
viola		1.600	120	
rosso		1.140	100	
giallo		850	120	

Tabella 17

→ **Curve di relazione** con  $V = k$  della **massa** totale del treno  $M_T$  rispetto alla **pendenza  $i$**  di **discesa** tunnel di Base del Moncenisio:

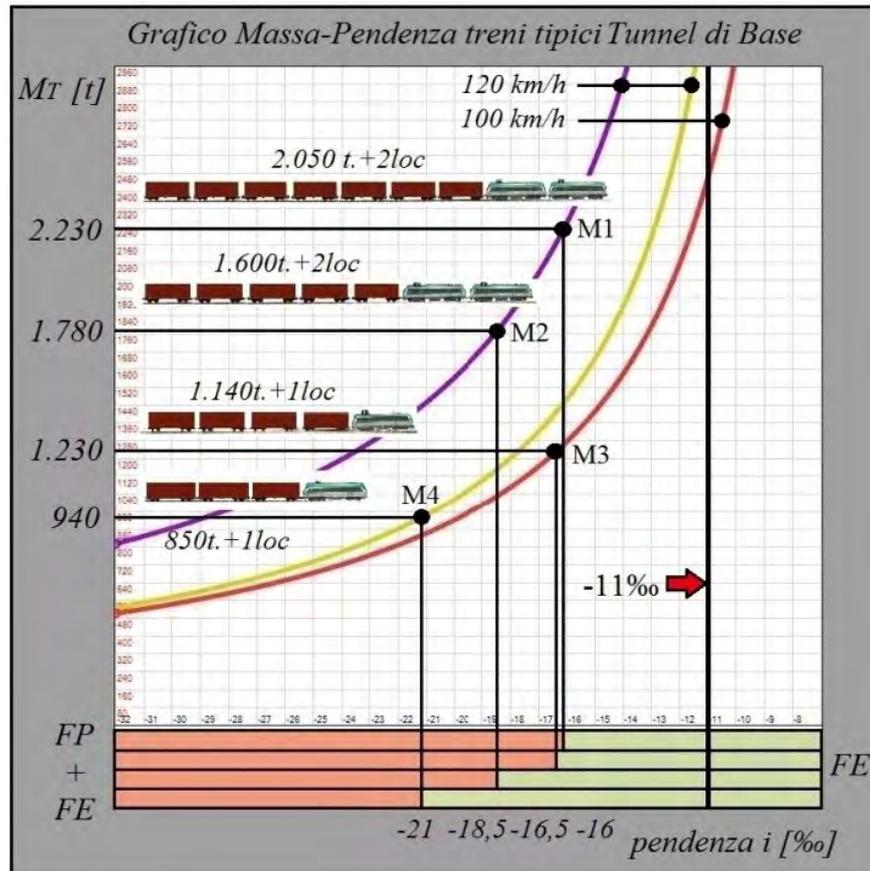


Grafico 24

→ Pendenze massime di trattenuta dei treni in esame nel tunnel di Base del Moncenisio ricavate dal grafico 24:

Colore curve	Tipologia di treno Tunnel di Base del Moncenisio	Massa lorda t	Punto M	Pendenza trattenuta MAX ‰
viola		2.050	M1	-16
viola		1.600	M2	-18,5
rossa		1.140	M3	-16,5
gialla		850	M4	-21

Tabella 18

Poiché la pendenza massima in discesa del tunnel di Base del Moncenisio è del 11 ‰ dalla tabella è possibile evincere che **tutti i convogli** in esame possono essere **trattenuti per l'intero percorso** con la **sola frenatura elettrodinamica**.

### ► **Frenatura pneumatica**

Come visto, una variazione **abbastanza modesta** della **pendenza** in linea, da +4‰ a -4‰, porta invece a una **cospicua variazione** degli **spazi di frenatura** o di **arresto spontaneo**.

Questo comportamento sta alla base del fatto che la **forte discesa** della tratta di Valico del Frejus porta, per i **treni merci pesanti** che hanno **scarsa efficienza frenante**, a grandi **riduzioni di velocità** per garantire gli **spazi di arresto**.

L'**infrastruttura**, invece, permetterebbe velocità **all'incirca analoghe** sia per la **salita** sia per la **discesa**.

Il **tunnel di Base del Moncenisio**, fortunatamente, grazie alla **ridotta pendenza** rispetto alla tratta di Valico del Frejus **non soffre** di questi problemi. Inoltre, grazie al **blocco radio**, qualunque spazio di frenatura può teoricamente essere concesso.

► *In conclusione per quanto riguarda le differenze sulla frenatura:*

- sulla **tratta di Valico del Frejus** solo i **treni regionali** e il **TGV** possono compiere la discesa della tratta italiana con il **solo apporto** della **frenatura elettrodinamica**, la situazione è analoga sul lato *Francia*.
- **nessuna tipologia** attualmente prevista di **treno merci**, a pieno carico, è in grado di scendere nell'intera **tratta di Valico del Frejus** con la **sola frenatura elettrodinamica**,
- nel nuovo **tunnel di Base del Moncenisio** tutte le tipologie di treno **possono essere trattenuti** alla velocità di marcia dalla **sola frenatura elettrodinamica**. L'uso di tale tipo di frenatura permette ai convogli di scendere a **velocità costante** certamente in **modo migliore** che non con l'uso della **frenatura pneumatica**,
- la possibilità di **utilizzo** della **sola frenatura elettrodinamica** relega la **frenatura pneumatica** con freni ad attrito, soggetti a rapida usura, solo a eventuali fermate **evitando** quindi il deterioramento delle rotaie, delle ruote, dei ceppi e dei ferodi **diminuendo** perciò fortemente i costi di manutenzione,
- il **non utilizzo** dei freni ad attrito **riduce fortemente** gli inconvenienti d'esercizio dovuti a essi **aumentando considerevolmente** il già elevato **livello di sicurezza** previsto nel **tunnel di Base del Moncenisio**,
- una **variazione** tutto sommato **abbastanza modesta** della **pendenza** in linea porta invece a una **cospicua** variazione degli spazi di frenatura o di arresto spontaneo. La **ridotta pendenza** del **tunnel di Base del Moncenisio** e il **blocco radio** consentono velocità di marcia **senza alcuna penalizzazione**, al contrario della **tratta di Valico del Frejus** che, a causa della pendenza, costringe i convogli in discesa a muoversi con **velocità ridotta** rispetto a quello che **permetterebbe l'infrastruttura**,
- la possibilità di affrontare la tratta di **discesa** alla **stessa velocità** di quella di **salita** rendendo, di fatto, **perfettamente simmetrico** il percorso, permette uno **sfruttamento intensivo** del **tunnel di Base del Moncenisio** al **contrario** della **tratta di Valico del Frejus** che, soprattutto per i **treni merci**, presenta una forte **dissimmetria di velocità commerciale** a causa della **ridotta velocità** dei convogli in **discesa**.

## **PARTE OTTAVA**

### **AFFERMAZIONI E CREDENZE NOTAV**

## 8.1 ►1, 2, 3, 4 e chi più ne ha ne metta: ma quante locomotive sono realmente necessarie per i futuri treni previsti nel tunnel di Base del Moncenisio?

E sì, su quest'argomento si è sentito di tutto: si va dai numeri frutto di **pura fantasia** a tentativi, più o meno tecnici, che alla fine esordiscono con convogli trainati da locomotive *E633* che nel tunnel di Base del Moncenisio non ci andranno mai perché, a parte che ormai sono in **accantonamento**, **non funzionano** a  $25\text{ kV}_{ca}$   $50\text{ Hz}$ .

Quantifichiamo perciò nel **tunnel di Base del Moncenisio** la **massima massa trainabile** (detta anche "**prestazione massima**") per una **data locomotiva**.

Al punto 4.1 pag.41 si è visto che la **prestazione** si calcola con la formula (tralasciamo l'influenza delle curve):

$$PR_{MAX} = \frac{1000 \cdot M_A \cdot f \cdot g}{r_g + r_v + r_i} - M_{LOC} \quad [t]$$

e che l'unico **parametro arbitrario** è l'**accelerazione** che porta a  $r_i$  (ricordiamo che  $r_i = 1000 \cdot a \quad [N/t]$ ).

Il valore di  $a$  per le **locomotive elettroniche** vale generalmente  $0,04\text{ m/s}^2$  per i treni **viaggiatori ordinari** e  $0,03\text{ m/s}^2$  per i **merci**.

Determiniamo la **prestazione** per un treno **viaggiatori** e uno **merci** sulla **tratta di Valico del Frejus**:

### ► Viaggiatori:

- locomotiva: *E464*,
- massa aderente:  $72\text{ t}$ ,
- accelerazione:  $0,04\text{ m/s}^2$ ,
- tratta *Bussoleno – Salbertrand*: pendenza  $26\%$ .

$$PR_{MAX} = \frac{1.000 \cdot M_A \cdot f \cdot g}{r_g + r_v + r_i} - M_{LOC} = \frac{1.000 \cdot 72 \cdot 0,25 \cdot 9,8}{255 + 20 + 40} - 72 = 488\text{ t}$$

Per la locomotiva *E464* il fascicolo orario *FL 2* nella stessa tratta ci fornisce  $490\text{ t}$ .

### ► Merci:

- locomotiva: *E633*,
- massa aderente:  $102\text{ t}$ ,
- accelerazione:  $0,03\text{ m/s}^2$
- tratta *Bussoleno – Salbertrand*: pendenza  $26\%$ .

$$PR_{MAX} = \frac{1.000 \cdot M_A \cdot f \cdot g}{r_g + r_v + r_i} - M_{LOC} = \frac{1.000 \cdot 102 \cdot 0,25 \cdot 9,8}{255 + 25 + 30} - 102 = 704 \text{ t}$$

Per la locomotiva *E633* il fascicolo orario *FL 2* nella stessa tratta ci fornisce 700 t.

Come si vede, con le **accelerazioni imposte**, le **prestazioni calcolate** sono **quasi identiche** a quelle **ufficiali** di *RFI*.

A questo punto non rimane che compiere lo **stesso calcolo** per il **tunnel di Base del Moncenisio**. Sarà presa in considerazione solo la locomotiva *BB36.000* per i **merci** poiché, essendo i treni viaggiatori molto più leggeri, il problema non si pone.

► **Merici:**

- locomotiva: *BB36.000*,
- massa aderente: 90 t,
- accelerazione: 0,03 m/s<sup>2</sup>
- pendenza: 12‰.

**N.B.** ► La pendenza del 12‰ si ha solo brevemente nei due tratti d'ingresso al tunnel, a *Susa* e *Saint Jean de Maurienne* ma va considerata in questo caso; per il resto della tratta la pendenza è inferiore.

$$PR_{MAX} = \frac{1.000 \cdot M_A \cdot f \cdot g}{r_g + r_v + r_i} - M_{LOC} = \frac{1.000 \cdot 90 \cdot 0,25 \cdot 9,8}{118 + 25 + 30} - 90 = 1.185 \text{ t}$$

La **prestazione massima** sul 12‰ di una locomotiva **BB 36.000** risulta quindi di **1.185 t** per cui **due macchine** trainano **2.370 t**.

**N.B.** ► L'accelerazione considerata di 0,03 m/s<sup>2</sup> è per lo spunto sul 12‰: per pendenze inferiori è chiaramente maggiore. Nel caso di un treno in piano, ad esempio, per 2.230 t vale circa 0,07 m/s<sup>2</sup>.

Facciamo ora **due verifiche sull'effettiva applicabilità** della **prestazione massima calcolata**: la **velocità massima raggiungibile** e la **resistenza degli organi di aggancio**.

► **Velocità massima raggiungibile**

Come già detto, parlando della frenatura elettrodinamica, per quel che riguarda il nuovo **tunnel di Base del Moncenisio** (nella sua relazione generale di dimensionamento) *LTF* prevede **due convogli tipo** ai quali, per **completezza**, ho aggiunto **due treni merci in singola trazione**:

Colore	Tipologia di treno Tunnel di Base del Moncenisio	Massa lorda t	Velocità massima km/h
viola		2.050	120
viola		1.600	120
rosso		1.140	100
giallo		850	120

Tabella 19

Per verificare la **pendenza massima in salita** alla quale il convoglio può essere trainato alla **velocità commerciale prevista**, basta disegnare le **curve** che mettono in **relazione** la **massa totale del treno  $M_T$**  con la **pendenza  $i$  di salita**, **analogamente** a quanto già visto a pag.109 per la **discesa**.

Ci avvarremo quindi della formula:

$$M_T = \frac{1000 \cdot ST_C}{r_g + r_v} \quad [t] \quad \blacktriangleright \text{ con } V = k$$

dove:

$ST_C$  = sforzo di trazione al cerchione [kN],

$r_v$  = resistenza unitaria dei veicoli, per semplicità comprensivo curve [N/t],

$r_g$  = resistenza unitaria dovuta alla gravità [N/t].

A questo punto, **riportando sul grafico** le **masse  $M_T$**  dei **treni ipotizzati**, è possibile ricavare la **massima pendenza** per la quale può essere **garantita** la **velocità commerciale prevista**.

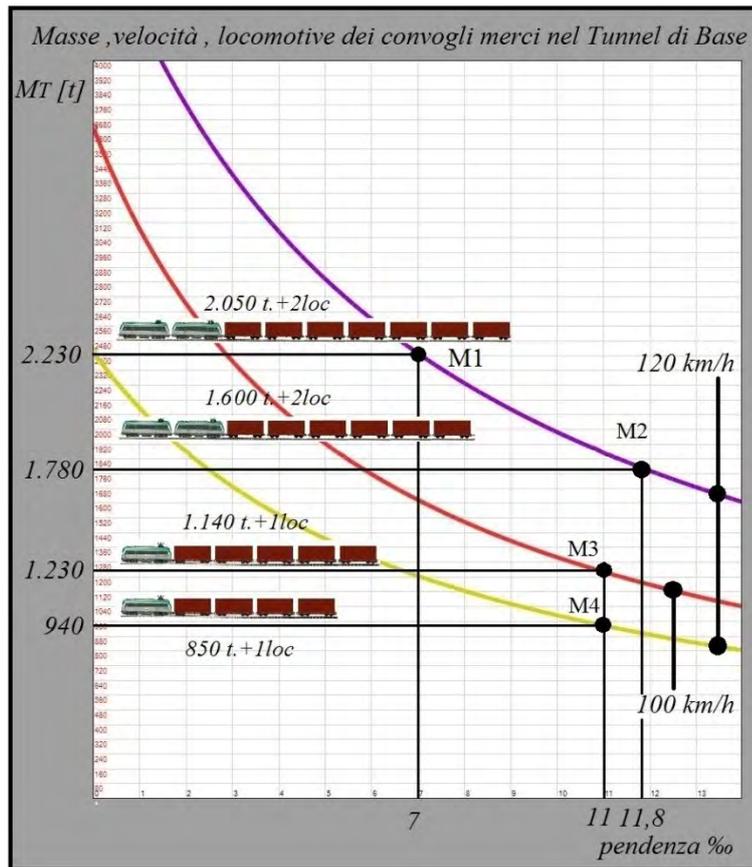


Grafico 25

**N.B. 1** ► La simulazione di *LTF* risale al 2012 ed è eseguita ipotizzando l'uso di locomotive *E402B*. Tali locomotive **non sono più in servizio** ai merci ma utilizzate per i treni viaggiatori a lunga percorrenza. Per rimanere nel campo realistico ho quindi utilizzato la *BB36.000*, attualmente in servizio, che ha caratteristiche **equivalenti** sotto la catenaria  $2 \times 25 \text{ kV } 50 \text{ Hz}$ .

**N.B. 2** ► La simulazione *LTF* è sviluppata interamente sotto catenaria  $2 \times 25 \text{ kV } 50 \text{ Hz}$ , ovvero dal *POC* di *Saint Jean de Maurienne* al *POC* di *Susa*. I *POC* **non coincidono** con gli **ingressi** del tunnel di Base del Moncenisio.

**N.B. 3** ► Nei disegni seguenti i **grafici di LTF** sono riportati in **alto** mentre in **basso** è stato riportato il **profilo della pendenza** del tunnel di Base del Moncenisio per una migliore comprensione degli stessi. Le frecce **blu** indicano il **senso** del treno, quelle **verdi** le **variazioni di velocità**.

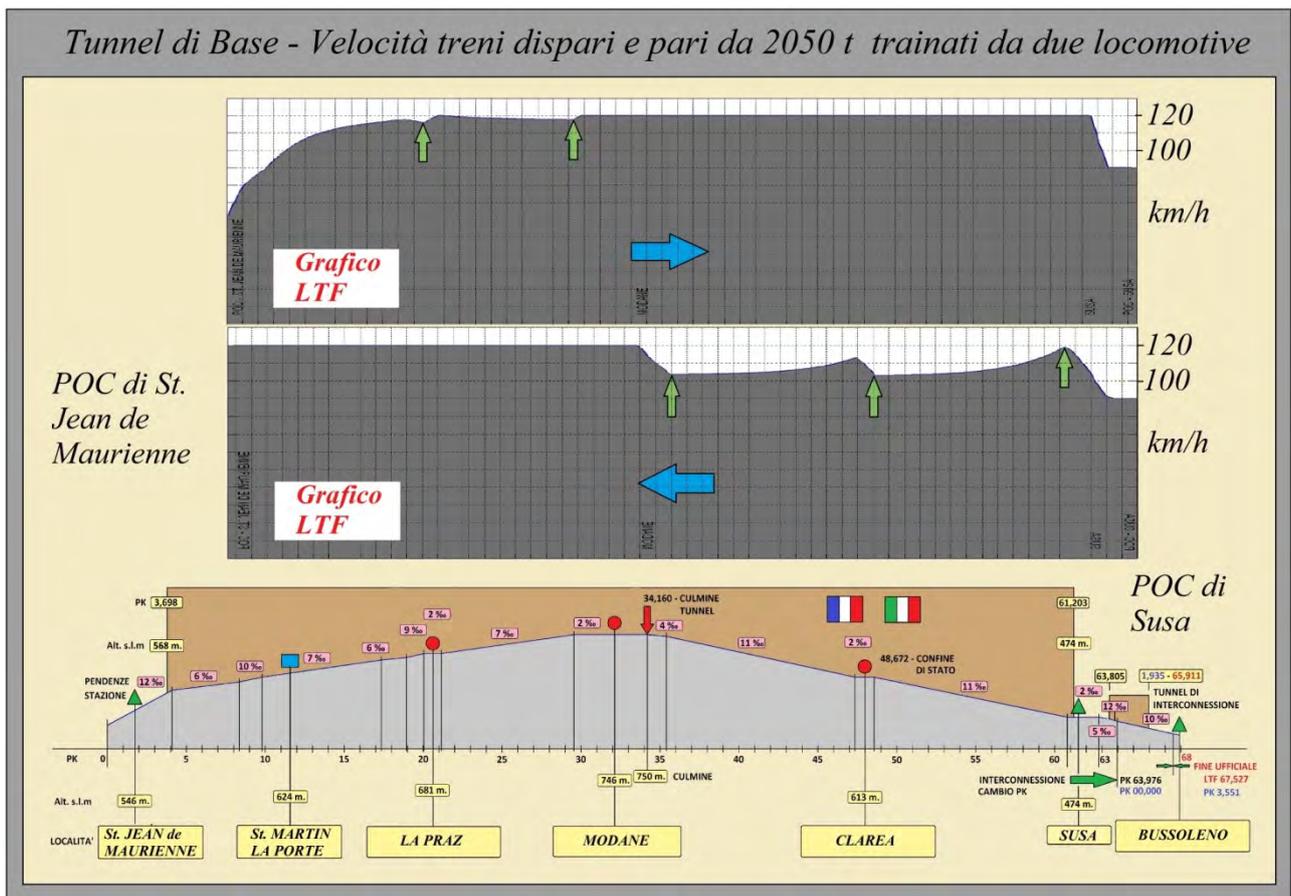
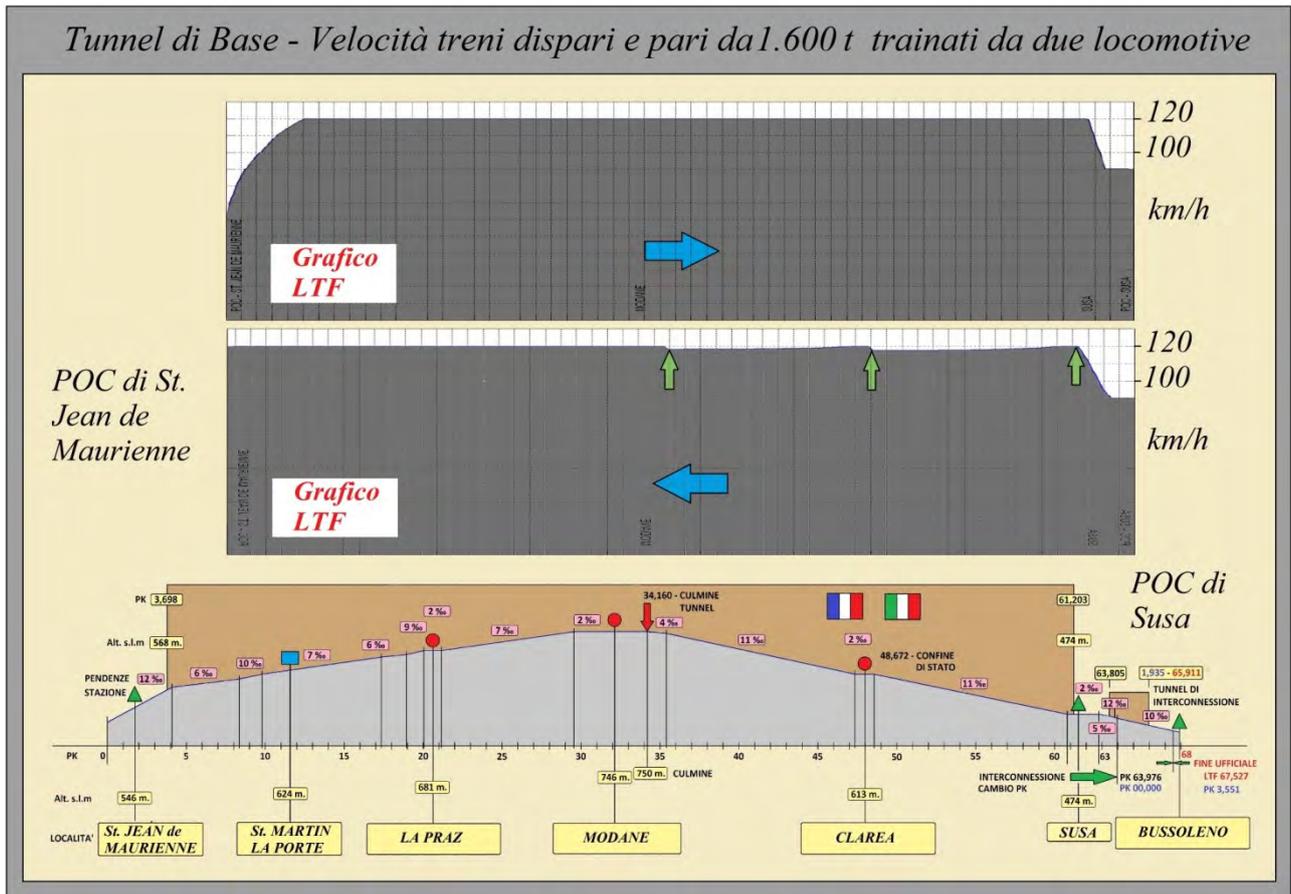
► Dall'analisi del **grafico 25**, emerge che:

- nel caso del treno di **1.600 t** di massa rimorchiata il convoglio può essere trainato a **120 km/h** fino a **poco oltre l'11‰**: tale velocità è quindi **garantita** in **entrambi i sensi di marcia**,
- nel caso dei **due treni in singola trazione** i convogli possono essere trainati a **120 km/h** o **100 km/h** fino all'**11‰**: tali velocità sono quindi **garantite** in **entrambi i sensi di marcia**,
- nel caso del treno di **2.050 t** di massa rimorchiata il convoglio può essere trainato a **120 km/h** fino al **7‰**. Affrontando tratte con una pendenza maggiore si ha una **progressiva perdita di velocità** fino, eventualmente, al raggiungimento di una velocità di equilibrio inferiore.

► Esaminando i **grafici ufficiali** di **LTF** dei treni da **1.600 t** e **2.050 t** si osserva che:

- nel caso del treno di **1.600 t** di massa rimorchiata, riportato in grafico 26, il convoglio può essere trainato a **120 km/h** **entrambi i sensi di marcia** con un **contenuto degrado** di velocità nella tratta *Stazione internazionale di Susa – Area di sicurezza Modane*. Dopo la partenza quasi pianeggiante da *Susa*, infatti, il convoglio rallenta leggermente a causa della pendenza dell'**11,2‰** per poi accelerare nuovamente a seguito del raggiungimento della tratta pianeggiante dell'*Area di Sicurezza Clarea*. Perde qui nuovamente velocità a causa della successiva pendenza dell'**11‰** e quindi accelera definitivamente raggiungendo la velocità costante di **120 km/h**. La perdita di velocità è comunque **irrisoria** e contenuta in **pochi chilometri orari**,
- nel caso del treno di **2.050 t** di massa rimorchiata, riportato in grafico 27, il convoglio può essere trainato a **100 km/h** nel **senso Saint Jean de Maurienne – Susa** con un **lieve degrado** di velocità nello spezzone *Saint Jean de Maurienne – Area di sicurezza Modane*. A causa delle continue variazioni di pendenza il treno perde leggermente velocità per riacquistala *nell'Area di Sicurezza La Praz* e poi a *Modane*. Anche qui la perdita di velocità è comunque **irrisoria** e contenuta in **pochi chilometri l'ora**.

Nel **senso opposto**, invece, nella tratta *Susa – Modane* la flessione di velocità è **più accentuata** e segue lo **stesso andamento** del treno a **1.600 t**.



Grafici 26 e 27

► quindi, concludendo:

- i calcoli che ho eseguito **confermano** i corrispondenti dati desumibili dai grafici effettuati mediante software professionale degli ingegneri di *LTF* dimostrando, se ce ne fosse bisogno, che *LTF* ancora una volta non ha ingannato i NoTav con risultati di comodo. Come **previsto**, i vari treni **possono raggiungere** le velocità massime **tranne** il convoglio da **2.050 t** che, nella tratta *Stazione internazionale di Susa – Area di sicurezza Modane*, presenta una **riduzione massima** di circa **18 km/h**,
- la **lievissima differenza** tra i miei grafici e quelli di *LTF* che prevedono la perdita di qualche *km/h* in alcune circostanze è dovuta al fatto che i miei calcoli, **necessariamente semplificati**, non tengono conto di altri **parametri minori** come ad esempio la maggiore resistenza all'avanzamento di un treno in galleria,
- per **tutte le tipologie di treno**, in accordo con la precedente dimostrazione che qualunque convoglio può essere trattenuto con la frenatura elettrodinamica, **la discesa avviene a velocità costante**.

Stando a quanto esposto **pare assodato** che i treni da **2.050 t**, nella tratta *Stazione internazionale di Susa – Area di sicurezza Modane*, non possano raggiungere i **120 km/h** della velocità d'impostazione. Ed è vero, o meglio, **era vero** con le locomotive utilizzate per lo studio di *LTF*. Tale simulazione, infatti, essendo ormai datata, si rifaceva alle **prime locomotive interoperabili** italiane atte alla  $25 kV_{ca}$  50 Hz assegnate ai **treni merci**, in altre parole le **E402B**. Tali macchine, ora, **non** sono più in dotazione dall'attuale Mercitalia (ex Cargo Trenitalia) ma svolgono servizio sui treni **viaggiatori a lunga percorrenza**. Per rimanere nel campo reale ho quindi utilizzato una locomotiva con **caratteristiche simili** ma ancora in uso in questo periodo ai treni merci, in altre parole la **BB36.000**. Anch'essa, di **fine anni '90**, ha comunque **vent'anni** sulle spalle e quindi tecnologicamente è **ormai datata**.

**Attualmente sono in servizio nuove locomotive in grado di sviluppare la potenza necessaria per garantire senza problemi anche la velocità di 120 km/h nella tratta in questione.**

Una di queste, ad esempio, è la locomotiva politensione **Vectron** della **Siemens** (prodotta in varie versioni) che è in grado di sviluppare una **potenza ai cerchioni** di **6,4 MW** contro i **5,6 MW** delle vecchie *E402B* e *BB36.000*. Proprio a seguito del fatto che in futuro i treni saranno **lunghi** e **pesanti**, i costruttori si stanno già adeguando alla produzione di locomotive con **potenze maggiori**. Tale potenza si candida quindi a essere uno **standard** all'apertura del tunnel di Base del Moncenisio, se nel frattempo non sarà **addirittura superata**.

**Ne consegue che, già nel 2018, tutti i treni ipotizzati da *LTF* nel tunnel di Base del Moncenisio possono essere trainati alla loro massima velocità d'impostazione in entrambi i sensi di marcia.**

Ho effettuato una **simulazione** con la locomotiva **politensione Vectron** al fine di valutare la **massima massa rimorchiata** sulla pendenza dell'**11‰** in base ad alcune **curve di velocità commerciale**.

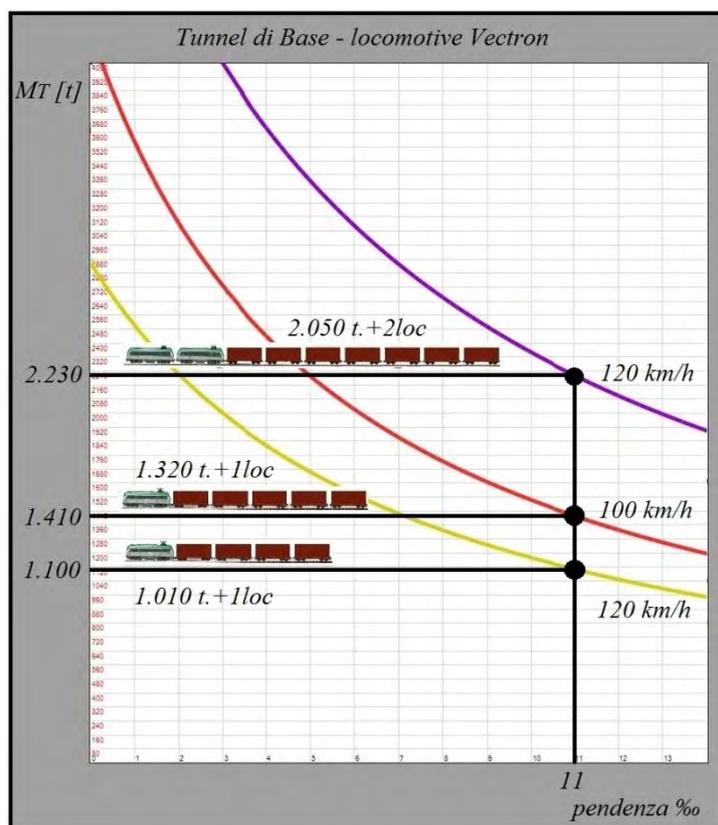


Grafico 28

Dal **grafico 28** emerge che sulla **pendenza massima** dell'**11‰** del **tunnel di Base del Moncenisio**:

- con **due locomotive** è possibile trainare a **120 km/h** un treno da **2.050 t** di massa rimorchiata,
- con **una sola locomotiva** si possono trainare **1.320 t** di massa rimorchiata a **100 km/h** contro le **due locomotive** accoppiate sulla tratta di Valico del Frejus per trainarne **1.150 t**,
- con **una sola locomotiva** si può trainare a **120 km/h** quasi la stessa massa che sulla tratta di Valico del Frejus richiede **due locomotive accoppiate** per **100 km/h** (1.100t → NTL contro 1.150 t → LS)

► **Resistenza organi di aggancio**

Verifichiamo infine che la **massa rimorchiata** di **2.050 t** sia **tollerata** dagli **organi di aggancio**. Fino a poco tempo fa esisteva una tabella di una pubblicazione di servizio di *RFI*, la *tab.20 PGOS*.

Tale tabella è stata **soppressa** perché **obsoleta** e ora la massima massa rimorchiata ammessa dagli organi d'attacco deve essere stabilita dalle **imprese ferroviarie** secondo specifiche analisi tecniche basate anche sulle caratteristiche dell'infrastruttura ferroviaria.

Tale tabella, infatti, risaliva all'epoca delle **locomotive a reostato** che **sollecitavano enormemente** i **tenditori** durante le **fasi di accelerazione** poiché queste avevano un andamento a "**scatti**". In seguito all'avvento delle **locomotive elettroniche** la **trazione** è diventata **uniforme** per cui i dati riportati **non erano** più **corrispondenti** alla realtà attuale.

La prestazione in salita della **tratta di Valico del Frejus** con due locomotive in testa, infatti, già in tempi passati era stata **incrementata** con una **deroga** a detta tabella da **870 a 1150 t**: in percentuale oltre il **32%**.

**Ipotizzando** la **stessa percentuale** e **supponendo** *Grado di prestazione = f(massa rimorchiabile)* come l'equazione di una **retta** (il divario reale è minimo), è possibile avere un dato **approssimativo**, ma **attendibile**, di quanto ammonti il **tonnellaggio massimo** in funzione degli **organi di aggancio** sui due **picchi** del **12‰**.

*Ex tabella 20 PGOS*

**Massima massa rimorchiata ammessa dalla resistenza degli organi di attacco - Treni di materiale ordinario trainato da locomotive e senza locomotive attive in coda**

GRADI DI PRESTAZIONE															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>MASSIMA MASSA RIMORCHIABILE IN DECATONNELLATE</b>															
250	250	250	250	244	235	224	214	203	194	183	173	166	158	152	145

GRADI DI PRESTAZIONE														
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
<b>MASSIMA MASSA RIMORCHIABILE IN DECATONNELLATE</b>														
137	130	123	118	114	111	104	101	95	90	87	83	80	74	69

Tabella 20

Sulla pendenza del 12 ‰ il grado di prestazione è circa 12 per cui consultando l'ex *tabella 20 PGOS* la massima massa trainabile per gli organi di aggancio sarebbe di **1.730 t**. Applicando lo **stesso incremento** concesso a suo tempo alla **tratta di Valico del Frejus** per le macchine elettroniche, cioè il 32%, si ottengono circa **2.280 t** di **massa rimorchiata**.

Poiché il treno **merci più pesante** previsto da *LTF* ammonta a **2.050 t** di **massa rimorchiata**, anche questa situazione è **verificata** con **ampio margine**.

► *In conclusione nel tunnel di Base del Moncenisio:*

con le **attuali locomotive politensione** da **6,4 MW** nel nuovo **tunnel di Base del Moncenisio**:

- con **due locomotive** si possono trainare a **120 km/h** treni di massa lorda fino a **2.050 t** in **entrambi i sensi di marcia**, treni **impossibili** da effettuare sulla **tratta di Valico del Frejus**,
- con **due locomotive** si possono trainare a **120 km/h** treni di massa lorda di **1.600 t** che sulla **tratta di Valico del Frejus** richiedono **tre locomotive** per viaggiare a **100 km/h**,
- con **una sola locomotiva** si possono trainare **1.320 t** a **100 km/h** **contro** le **due locomotive** accoppiate sulla **tratta di Valico del Frejus** per trainarne **1.150 t**,
- con **una sola locomotiva** si può trainare a **120 km/h** quasi **la stessa massa** che sulla **tratta di Valico del Frejus** richiede **due locomotive** accoppiate per **100 km/h** (**1.100 t** → *NLTL* contro **1.150 t** → *LS*),
- **non vi sono problemi** né di **prestazioni delle locomotive** né di **organi di aggancio** con **2.050 t** di **massa rimorchiata**, in altre parole la **massima prevista** da *LTF*.

## 8.2 ► Supercondensatori: sono una soluzione?

Studi Notav ipotizzano l'uso dei **supercondensatori** come sistema per **accumulare l'energia generata** in **discesa** dai treni sulla **tratta di Valico del Frejus** e **non immediatamente utilizzabile** a causa di **mancata ricettività** della **catenaria**. Il sistema cui si fa riferimento è **effettivamente utilizzato** con **successo** ma prevalentemente nell'ambito delle **metropolitane**. In sintesi, poiché come si è visto la tratta di Valico del Frejus non sempre è ricettiva dal punto di vista del recupero, tale energia prodotta sarebbe **stoccata** in queste specie di "**serbatoi elettrici**" per essere **utilizzata successivamente** da un treno in **salita**.

### Perché supercondensatori e non batterie?

I supercondensatori sono **un'evoluzione** dei condensatori normalmente esistenti con la caratteristica di avere una **capacità maggiore** di **accumulo** delle cariche elettriche. I primi esperimenti ebbero inizio nel 1957 nei laboratori della General Electric, ma solo negli anni 2000 si ebbe uno sviluppo a livello industriale (il primo utilizzo fu per consentire l'apertura delle porte degli aerei in caso di emergenza).

Allo stato attuale sono svariati gli utilizzi dei supercondensatori a livello industriale, nell'automotive e per l'elettronica di consumo come nei gruppi di continuità.

Il suo **successo** è dovuto alla caratteristica di possedere **un'elevata potenza specifica**, in altre parole i supercondensatori sono in grado di far fronte a **grosse** quantità di **corrente**, cosa che invece **non è possibile** con le batterie. Chiunque posseda un'auto, infatti, nel caso abbia dovuto ricaricare la batteria l'ha sempre dovuta effettuare con una **bassa corrente** per non produrgli **danni** e quindi necessariamente con **tempi lunghi**. Questa caratteristica li rende idonei quindi anche per uso su metropolitane perché in fase di **frenatura elettrodinamica** viene prodotta **un'elevata potenza**, e quindi **corrente**, che **non** sarebbe tollerata da una semplice batteria. Per contro il supercondensatore ha una **bassa energia specifica** ovvero, rispetto alla batteria, può accumulare a **parità** d'ingombro/massa **molta energia in meno**. Questo significa che, per **accumulare** la **stessa quantità** di una batteria, occuperanno **molto più spazio** ed anche il **costo** lieviterà. Inoltre i supercondensatori possono sopportare solo **tensioni basse**, nell'ordine di 2,5 – 2,7 volt.



Figura 27

Sono quindi necessarie **serie** di supercondensatori per reggere tensioni più alte con la complicazione che vi debbono essere dei dispositivi per **bilanciare** le **tensioni** ai capi dei **singoli supercondensatori** al fine di **non danneggiarli**.

In linea generale esistono tre filosofie di **recupero e stoccaggio**, secondo la convenienza:

- recupero per immissione in rete elettrica ferroviaria locale (per piccoli impianti),
- recupero per riutilizzo su catenaria ferroviaria,
- recupero a bordo treno (per piccole energie).

Qui ci occuperemo di utilizzo su **catenaria ferroviaria** perché il **più idoneo** alla **tratta di Valico del Frejus**.

Partiamo dal dato di fatto che tutti gli impianti sperimentali o in funzione in questo periodo sono posti in **pianura** o **moderati dislivelli**: l'energia recuperata è quindi prevalentemente quella **cinetica** acquisita in **fase di accelerazione** del convoglio. I **treni viaggiatori**, inoltre, normalmente hanno **minore massa** rispetto a quelli **merci** quindi forniranno una **minore energia** in fase di recupero.

Supponiamo un convoglio di **metropolitana** tipo S300, come quello di *Roma*:

$M_T$  = massa a vuoto 180 t (poniamo 250 t a pieno carico - circa 1.000 persone),  
 $PW_{ECT}$  = potenza complessiva del mezzo 2.800 kW,  
 $V$  = velocità massima del convoglio 90 km/h.

$$\text{Energia cinetica:} \quad E_C = \frac{M_T \cdot V^2}{7.200} = \frac{250 \cdot 25^2}{7.200} = 21,7 \text{ kWh}$$

dove:

$M_T$  = massa del treno [t],  
 $V$  = velocità del convoglio [m/s],

Supponendo un **rendimento medio di sistema** dell'80%, in caso di frenata elettrodinamica e linea totalmente **non ricettiva** si dovranno recuperare circa 16 kWh (un po' di energia va ancora persa perché la frenatura elettrodinamica stacca a 11 km/h e deve intervenire quella pneumatica) per cui l'impianto andrà dimensionato in tal senso.

Il supercondensatore **Maxwell – BMOD0130 P056 B03** è stato utilizzato in un'applicazione di Trenord perché particolarmente conveniente sotto molti aspetti.

Poiché ogni supercondensatore può immagazzinare  $57 \text{ Wh}$  di energia, per  $16 \text{ kWh}$  occorrono in teoria **280 supercondensatori**. La situazione non è però così semplice perché, come si vede dal foglio delle caratteristiche, questi supercondensatori possono essere posti in **serie** fino al **raggiungimento** della **tensione massima** di  $750 \text{ V}_{cc}$ . Poiché la tensione di linea è  $3 \text{ kV}_{cc}$  occorre necessariamente un **convertitore bidirezionale** di **adeguata potenza**  $3 \text{ kV}_{cc} \leftrightarrow 750 \text{ V}_{cc}$ .



Figura 28

Impianti **sperimentali** in tal senso, già esistenti, hanno proprio quest'architettura. Inoltre è evidente che bisogna creare un'opportuna connessione **serie-parallelo** di questi supercondensatori senza superare i  $750 V_{cc}$  (mettere in parallelo i supercondensatori permette di elevare la capacità complessiva pari alla loro somma, ma non la tensione).

In questo caso la configurazione più **opportuna** è un **parallelo** di **23 colonne** di supercondensatori con ognuna **14** supercondensatori in **serie** per un totale di **322 supercondensatori** da  $130 \text{ Farad}$ .

Infatti:

$$E_{immagazzinata} = \frac{C_{eq} \cdot V^2}{7.400.000} \quad [kWh]$$

per cui:

$$E_{immagazzinata} = \frac{C_{eq} \cdot V^2}{7.400.000} = \frac{213,5 \cdot 750^2}{7.400.000} = 16,2 \text{ kWh}$$

dove

$C_{eq}$  = capacità totale della batteria serie/parallelo di supercondensatori  
(il supercondensatore elementare vale  $130 \text{ F}$ )  $[F]$ ,

$V$  = tensione massima ai capi della batteria di condensatori  $[V]$ .

Dalle **caratteristiche tecniche** del supercondensatore si evince che siamo di fronte a ben **5,8 tonnellate** di supercondensatori (**18 kg** tipici a unità).

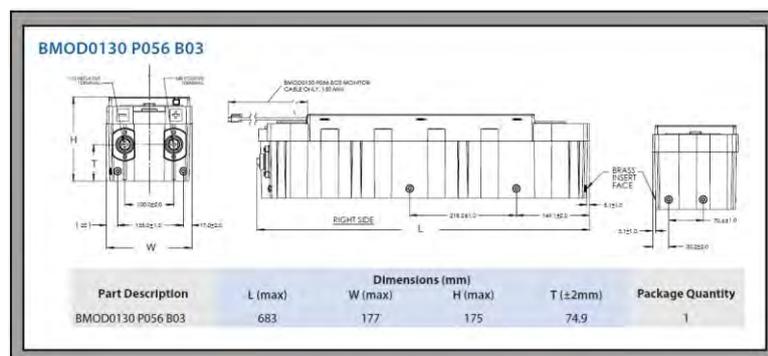


Figura 29

Se consideriamo l'**ingombro**, lasciando  $5 \text{ cm}$  di spazio a ogni lato per l'aerazione, si ha un **volume** del singolo elemento pari a  $0,06 \text{ m}^3$  per un **totale** di circa  $20 \text{ m}^3$  in altre

parole un **parallelepipedo** di oltre  $3 \times 3 \times 2$  metri. E a questo si deve aggiungere ancora l'ingombro del convertitore.

Il costo dei supercondensatori, per **grandi quantitativi**, si aggira sui **1.400 €** ognuno per cui **450.000 €** di soli supercondensatori.



Qty.	Unit Price	Ext. Price
1	€ 1.493,43	€ 1.493,43
2	€ 1.468,88	€ 2.937,76
5	€ 1.447,53	€ 7.237,65

Figura 30

Ora vediamo nella **tratta di Valico del Frejus** quanta energia ci aspettiamo di recuperare.

Innanzitutto va considerato che:

- esistono più treni per tratta, sia in salita sia in discesa,
- i treni hanno masse differenti,
- i treni hanno un numero di locomotori differenti,
- parte dell'energia circola già da treno a treno,
- la differenza di traffico nelle differenti fasce orarie determina differenti accumuli,
- una differente quantità di traffico giornaliero determina differenti accumuli.

E' evidente che le **variabili** sono **moltissime**.

Poiché questo **presunto potenziamento** con accumulo a supercondensatori avverrebbe in caso di **traffico intenso**, ipotizziamo un "**treno equivalente**" che tenga conto di tutte le variabili precedenti, in altre parole riduciamo lo scenario di discesa a **un solo treno reale in tripla trazione** che **recuperi energia per l'intera tratta**.

Tralasciamo, al fine di questa determinazione, che **non tutti** i locomotori **frenano elettrodinamicamente** sotto la catenaria a  $3 kV_{cc}$  quindi li supporremo tutti efficienti in tal senso.

Quindi:

$M_T = 1.600 t$  massa rimorchiata + 3 locomotive (quella di spinta rimane agganciata):  
1.870 t,

$V =$  velocità massima del convoglio 50 km/h,

$\Delta h =$  dislivello tratta di Valico del Frejus: 855 m,

$L =$  lunghezza della tratta in discesa: circa 40 km (dal km1).

Il treno in salita acquisisce energie:

$$\text{Energia cinetica:} \quad E_C = \frac{M_T \cdot V^2}{7.200} = \frac{1.850 \cdot 13,9^2}{7.200} = 49,6 \text{ kWh}$$

$$\text{Energia potenziale:} \quad E_P = \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} = \frac{1.850 \cdot 9,8 \cdot 855}{3.600} = 4.305 \text{ kWh}$$

dove:

$M_T =$  massa del treno [t],

$V =$  velocità del convoglio [m/s],

$\Delta h =$  dislivello [m].

**L'energia totale** disponibile per la **discesa** ammonta quindi a **4.355 kWh**.

Senza esporre noiosi calcoli, da tale cifra va **sottratta** l'energia persa a causa della resistenza globale che offre il materiale al moto in discesa, circa **850 kWh**: rimangono disponibili **3.505 kWh**. Le due locomotive di testa possono realizzare, come da norme, uno sforzo di frenatura massimo complessivo di  $-200 \text{ kN}$  per cui è possibile ricavare **2.220 kWh** di energia. I restanti **1.285 kWh** saranno **dissipati**, e quindi persi, con il **freno pneumatico**. A questi **2.220 kWh** applichiamo un **rendimento medio di sistema dell'80%** per cui, da **accumulare**, alla fine, rimangono **1.760 kWh**.

Rispetto a una **centrale di accumulo** per un treno della **metropolitana di Roma**, siamo a un **rapporto** di oltre 110 : 1 (1.760 : 16 kWh) quindi:

- al posto di **una centrale** di accumulo di energia sulla tratta di Valico del Frejus si possono costruire **110 centrali** di accumulo per metropolitane (considerando un treno per tratta),
- il **peso** dei supercondensatori passa da 5,8 t a **638 t** (pari a 7 locomotori merci),
- il **numero** dei supercondensatori passa da 322 a **35.420**,

- **l'ingombro** dei soli supercondensatori passa da  $20 m^3$  a  **$2.200 m^3$**  (un parallelepipedo di circa  $33 \times 33 \times 2$  metri),
- il **costo** dei supercondensatori passa da 450.000 € a quasi **50 milioni di €**.

Ovviamente queste cifre vanno **opportunamente ripartite** in **3 unità minori** perché deve esistere almeno **una unità** di accumulo per ogni tratta da *SSE* a *SSE* (*Bussoleno – Chiomonte*, *Chiomonte – Salbertrand*, *Salbertrand – Bardonecchia*). Non va dimenticato, inoltre, che ogni unità abbisogna del **convertitore bidirezionale**  $3 kV_{cc} \leftrightarrow 750 V_{cc}$ .

Inoltre i supercondensatori **perdono costantemente capacità** riducendola di un 20% al **termine della vita media** che risulta essere di circa **14 anni** in condizioni ottimali (8 anni in impegno gravoso) e poi vanno **sostituiti**. Ovviamente **guasti** improvvisi per **rottura del dielettrico** non sono da escludersi anche **prima** di questi tempi.

Prendiamo a riferimento il **massimo storico** di **traffico** avvenuto nel 1977 sulla tratta di Valico del Frejus con un **tonnellaggio netto** di circa **10 Mt**. Considerato un **carico utile** del **63,85%** si ha una **massa rimorchiata** di circa **16 Mt** cui vanno aggiunte circa **2 Mt** di **locomotive** (treni supposti in doppia trazione senso *Italia – Francia*) per un **totale** di **18 Mt**.

In termini energetici, considerando una velocità di 100 km/h:

$$E_T = \frac{M_T \cdot V^2}{7.200} + \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} + \frac{M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S}{3.600.000} \quad [kWh]$$

$$E_T = \frac{18.000.000 \cdot 27,7^2}{7.200} + \frac{18.000.000 \cdot 9,8 \cdot 855}{3.600} + \frac{18.000.000 \cdot (55 + 6) \cdot 40.000}{3.600.000}$$

$$E_T = 1.918.225 + 41.895.000 + 12.200.000 \cong 56 \text{ GWh}$$

Nell'esempio precedente si può osservare che, per la tratta in **discesa**, il **recuperato** al **netto** di **dissipazioni** e **rendimenti** è circa il **40 %** del **disponibile**.

Quindi, applicando lo **stesso rendimento** nel nostro caso:

$$E_{REC} = 56 \cdot 0,4 = 22,4 \text{ GWh}$$

**RFI** acquista a **prezzo di mercato** l'energia per trazione presso la **borsa elettrica** e, in seguito, riceve dalla **Cassa Conguaglio del Settore Elettrico** l'importo oggetto di **compensazione** per i **solli treni** del **servizio universale** e **merci transfrontalieri** (decreto-legge 24 giugno 2014, n. 91).

Poiché il **costo tipico** dell'energia alla borsa elettrica, consumata dai grandi utilizzatori, è di circa **10 centesimi** di € al *kWh* e, per i suddetti servizi universali e transfrontalieri merci, il **rimborso** è di circa il **50%**, il recupero ammonta a:

$$22.400.000 \cdot 0,05 = 1.120.000 \text{ €/anno}$$

Come detto in precedenza, il **costo** dei soli supercondensatori è di circa **50 milioni €** per una **vita operativa**, nella migliore delle ipotesi, di **14 anni**, nella **peggiore 8**.

Questo vuol dire dover **ammortizzare** circa 3,6 milioni €/anno nel caso migliore, 6,3 milioni €/anno in quello peggiore.

Considerata anche la **manutenzione** dei tre o più **impianti di conversione** (inverter e quant'altro) è evidente che tale cifra è destinata a **lievitare** non poco.

Oltretutto per garantire la durata dei 14 anni, i supercondensatori devono avere caratteristiche di **temperatura ottimali** per cui tutto l'impianto deve essere adeguatamente **ventilato** ore 24/24 con **dispendio di energia**.

E' evidente che per arrivare a un **semplice pareggio economico** bisogna ridurre ad almeno **un terzo** il **costo** degli **impianti** mentre per avere un **minimo di attivo** bisogna raggiungere almeno **un quarto**.

Questo si ottiene solo **eliminando supercondensatori** e quindi **perdendo grandissime quote** di **energia recuperabile**, in altre parole rendendo alla fine **sostanzialmente inutili** gli impianti ipotizzati.

► *In conclusione, sui supercondensatori:*

- nel caso della **tratta di Valico del Frejus** l'utilizzo dei supercondensatori è **improponibile** oltre che per una questione **d'ingombri, pesi e numero** di supercondensatori da porre in serie/parallelo, **soprattutto** per i **costi**,
- oltre ai supercondensatori sono necessari **circuiti accessori** quali **convertitori bidirezionali** in numero pari alle singole unità che s'intende installare, **ventilazioni** e quant'altro che **incidono** anch'essi sulla **parte economica**,
- la **limitata vita** dei supercondensatori **pesa enormemente** sul **bilancio economico**,
- ancora una volta il sistema di **elettrificazione del tunnel di Base del Moncenisio**, che grazie al **solo** trasformatore della **SSE** è **naturalmente reversibile senza alcun costo aggiuntivo e complicazione tecnica**, si rivela **vincente** per quanto riguarda il **recupero di energia**.

### 8.3 ► XX miglia !! XX miglia !!

**Ventimiglia** torna periodicamente in auge come **alternativa** al **tunnel di Base del Moncenisio**: ogni tanto qualcuno si sveglia e ci regala questa chicca. Tale tratta presenta una **marea di problematiche** sotto il profilo del trasporto **merci**, dalla **ridotta sagoma limite** all'impossibilità di **treni lunghi**. Inoltre l'ultimo **raddoppio** di binario previsto, tra **Andora** e **Finale Ligure** (31,5 km) non si sa quando e se sarà mai completato. **Maurizio Gentile**, amministratore delegato di **RFI**, in occasione della recente inaugurazione della tratta **Andora – San Lorenzo** ha dichiarato:

*“Il progetto del completamento del raddoppio ferroviario è finanziato ed è inserito nel contratto di programma di RFI con il ministero delle infrastrutture e dei trasporti – spiega il dirigente – Attendiamo la progettazione e poi avvieremo le fasi di approvazione di questo progetto. Per quanto riguarda il finanziamento dell'intera opera, che vale circa un miliardo e mezzo, dovremo pianificarla insieme al ministero e al governo negli anni successivi. E' un'opera che comunque si prevede vada completata”.*

E, riguardo alla tratta di binario unico ancora in esercizio, afferma:

*“Il binario unico non comporta dei grandi problemi quando il numero dei treni è gestibile [...] Un binario unico su tutta la tratta credo che sia un problema. Un pezzo di binario unico inserito in un contesto di raddoppio in realtà di problemi ne crea molti di meno”.*

Il che fa pensare che ne passerà ancora molta di acqua sotto i ponti prima che quella tratta vedrà la luce e il fatto che ci si affermi: " *Il binario unico non comporta dei grandi*

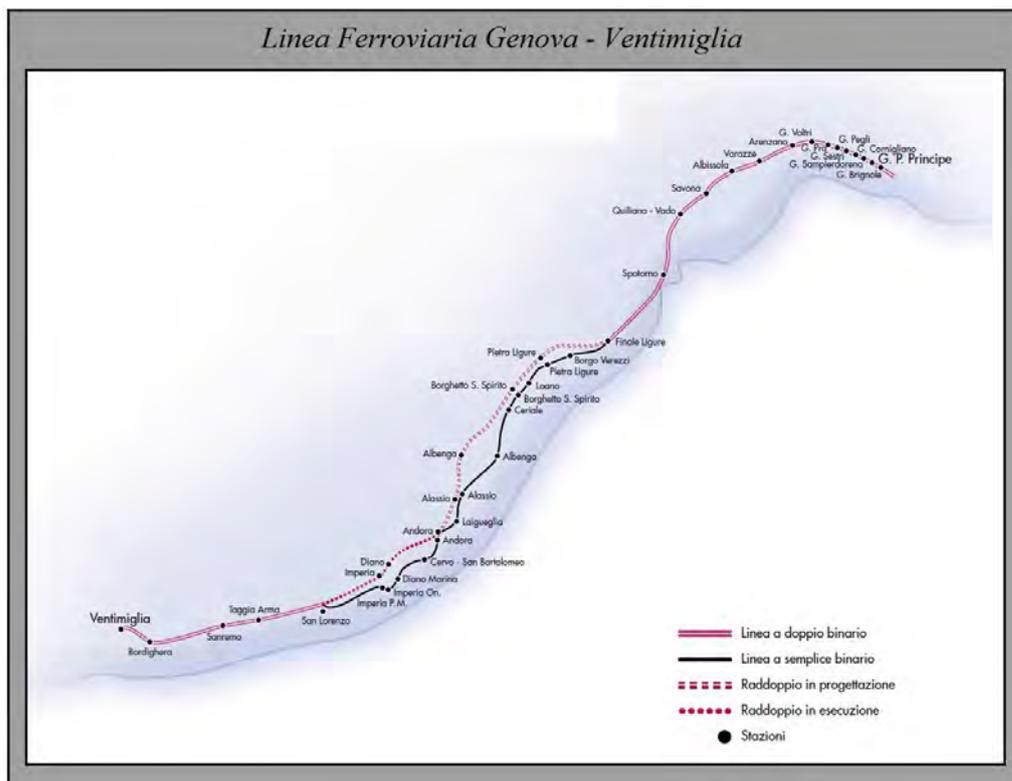


Figura 31

*problemi quando il numero dei treni è gestibile" induce a concludere che non vi sono grossi margini per un **aumento di traffico**.*

Intanto nel 2016 è stato inaugurato il **raddoppio Andora – San Lorenzo** di 18,5 km con un tracciato per l'**86% in galleria** (16,2 km) costato 580 milioni di €. Tale tratto è il naturale proseguimento del **raddoppio precedente**, tra *San Lorenzo a Mare* e *Ospedaletti*, aperto nel 2001: 23,8 km di cui l'**87% in galleria** (20,6 Km) per un costo di 800 miliardi di lire del tempo (circa 400 milioni di euro).

L'idea di **utilizzare** e **potenziare** questa linea come **alternativa** alla **tratta di Valico del Frejus** è nata perlopiù dalla **falsa convinzione** che al **livello del mare** non vi fossero **montagne da forare**.

Come riportato in precedenza, il solo **raddoppio** delle **due tratte già finite** ha generato quasi **40 km di gallerie**. Questo vuol dire che con l'ipotetico **ultimo raddoppio** fra *Andora* e *Finale Ligure* sarà raggiunta una **lunghezza totale** di gallerie **paragonabile** al tunnel di Base del Moncenisio. Ed anche i **costi** non sono da meno, considerando che gli scavi sono avvenuti in condizioni **ben più agevoli** del tunnel di Base del Moncenisio (basti pensare all'assenza di discenderie).

Stranamente, però, quando i **buchi sono lontani dalla casa** dei NoTav non **preoccupano** né per il **contenuto delle rocce** né per la presunta **mafia dei cantieri**.

Stranezze NoTav...

Poiché lo scopo di questo studio è però analizzare le situazioni dal punto di vista **energetico**, dopo queste doverose precisazioni e riflessioni ritorniamo in argomento.

La verifica del modello di esercizio per la tratta nazionale lato *Italia* Fase1 - 2030 del 10 novembre 2017, a pag. 33 recita:

*[..] La distribuzione territoriale delle **origini** e destinazioni segnala che, sia in Francia sia in Italia, i **flussi di trasporto** si concentrano in prevalenza nelle **regioni settentrionali**, dando maggiore importanza ai valichi e gallerie della parte **centro settentrionale** dell'arco alpino occidentale.[..]*

Per quanto concerne il **trasporto su gomma** che **predilige** la direttrice **Ventimiglia** si specifica:

*[..] L'analisi delle distanze, stradali e ferroviarie, ha permesso anche di dimostrare che il corridoio di **Ventimiglia non presenta vantaggi rilevanti** nei collegamenti con *Spagna* e *Portogallo*: di conseguenza l'entità dei flussi che attualmente la percorrono non è giustificata dalla scelta dell'itinerario naturalmente più efficiente, ma da considerazioni di **vantaggio economico** derivanti da **squilibri nelle tariffe autostradali** e per l'**attraversamento dei tunnel**.[..]*

In altre parole i **camion** passano da **Ventimiglia** solo perché **costa di meno** a causa dell'onerosità dei tunnel e dei pedaggi autostradali. E questo tralasciando la **vetustà** di certi mezzi per la quale il passaggio a **Ventimiglia** è **d'obbligo**.

Analizziamo ora dal punto di vista **energetico ferroviario** cosa implicherebbe una **deviazione a Ventimiglia**.

Prendiamo ad esempio un convoglio che debba transitare sul classico asse che va da *Novara* a *Lione* in accordo con l'affermazione: "[..] i flussi di trasporto si concentrano in prevalenza nelle regioni settentrionali [..]". Probabilmente tale convoglio già **proviene** da una località **precedente a Novara** e magari **proseguirà oltre Lione**, ma questo non è di nostro interesse.

► Supponiamo che il locomotore del treno:

- disponga a bordo dei differenti sistemi di sicurezza per la protezione della marcia del treno in uso in *Italia* e in *Francia*,
- possa funzionare sia in trazione sia a recupero di energia in frenatura elettrodinamica sotto le catenarie  $3 kV_{cc}$ ,  $1,5 kV_{cc}$  e  $25 kV_{ca}$   $50 Hz$  poiché la tratta di valico è interessata dalle prime due tensioni mentre quella di mare da tutte e tre,
- sia in grado di frenare elettrodinamicamente con almeno  $-130 kN$  di sforzo di frenatura.

► Il convoglio invece è ipotizzato:

- con velocità di marcia costante tipica di un treno merci ovvero  $V = 100 km/h$ ,
- che presenti una  $r_v = 55 N/t$  per l'avanzamento e la linea un  $\rho = 5 N/t$  per le curve,
- in singola trazione con massa rimorchiata di  $650 t$  per essere congruente con la massima massa rimorchiata sulla tratta di Valico del Frejus,
- massa del locomotore  $90 t$ ,
- che in entrambe le linee transiti sempre per l'intera tratta.

Nella fig.32 sono riportati i **percorsi** con le **distanze** tra alcune **località salienti** (riquadro bianco) e le **altezze sul livello del mare** delle località (riquadro verde).

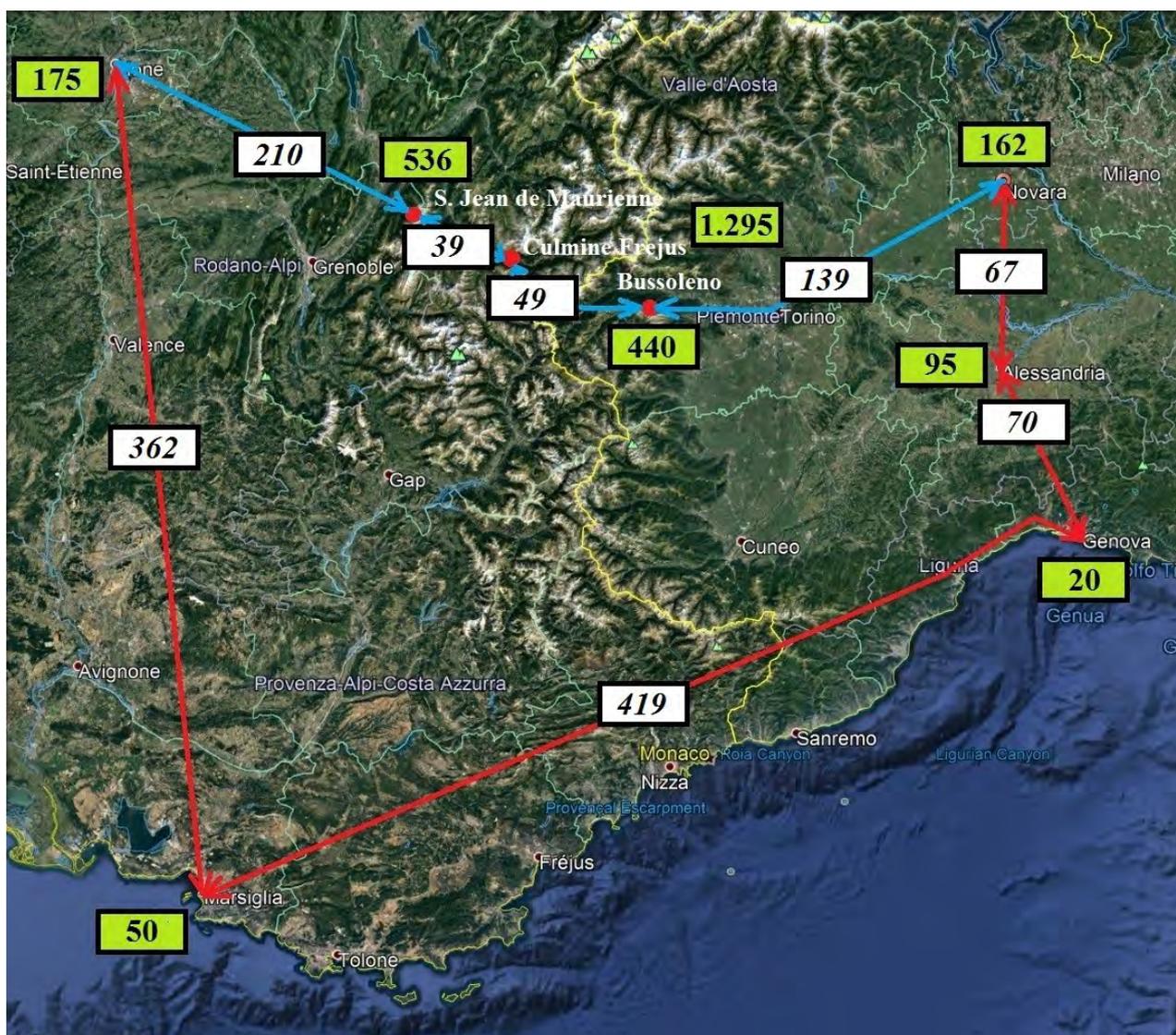


Figura 32

**N.B.1** ► In tratta francese dopo la linea di valico si è ipotizzato l'instradamento *Chambéry – Ambérieu – Lyon* invece di *Chambéry – St. André le Gaz – Lyon* perché, pur essendo più lungo, è interamente a doppio binario.

**N.B.2** ► In tratta italiana per raggiungere *Ventimiglia* si è ipotizzato il percorso *Novara – Alessandria – Genova*.

Quello che balza subito all'occhio osservando le **altimetrie** in fig.32, per quanto riguarda la tratta *Novara – Ventimiglia – Lyon* (d'ora in avanti denominata "linea di mare", l'altra "di valico"), è che "**pianura**" non è sinonimo di "**stessa quota**".

Nel grafico 29, invece, sono riportati in dettaglio i **dislivelli** delle due tratte in funzione delle rispettive **lunghezze**.

In **blu** è riportata la **linea di mare** mentre in **marrone** quella di **valico** (quest'ultima nel grafico termina prima perché **più corta**, per questo motivo è riportata **due volte** la dicitura *Lyon*).

Come anticipato in fig.32, nel grafico 29 si ha conferma che la **linea di mare** è tutt'altro che **piana** presentando **continue salite/discese**, seppur modeste. Ovviamente le salite saranno superate con **assorbimento di energia** ma, essendo seguite da altrettanto **modeste discese** (in termini di pendenza), l'energia non può **neanche essere recuperata**. Infatti, a causa della presenza della **resistenza all'avanzamento  $R_v$** , fino a circa  $-5\%$ , la macchina deve comunque sempre **tirare** ( $-5\%$  riferito a treno merci a  $100\text{km/h}$ ).

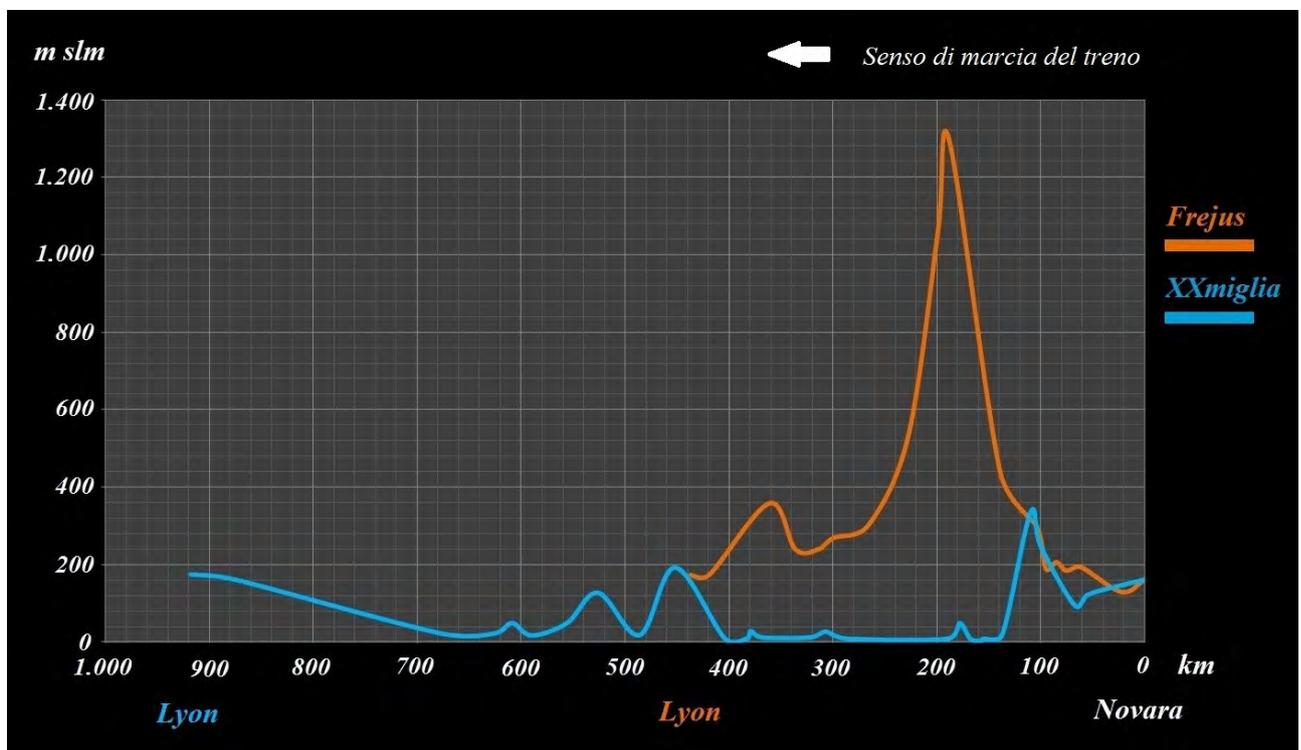


Grafico 29

Al solo titolo informativo, **sommando** tutti i **dislivelli positivi** si ha un totale di  $796\text{ m}$  per la linea di mare e  $1.308\text{ m}$  per quella di monte: come si vede il **divario non è moltissimo** mentre la **tratta da percorrere è doppia** ( $437\text{ km}$  la linea di valico,  $918\text{ km}$  quella di mare). Come già visto in precedenza, ogni tratta con pendenza superiore al circa  $-5\%$  implica che la locomotiva **tiri** e quindi **consumi energia**. Alla luce del fatto che le tratte in discesa superiori a tale valore sono limitate, è evidente che vi è **comunemente assorbimento in quasi tutta la tratta**.

I calcoli effettuati si basano sulla formula:

$$E = \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} + \frac{M_T \cdot (r_v + \rho) \cdot S}{3.600.000} \quad [kWh]$$

tenendo conto anche del recupero di energia per frenatura elettrodinamica ipotizzando come rendimento un prudente 30% (rendimento tecnico e ricettività di linea).

I calcoli (riportati in Allegato A) conducono al seguente risultato finale:

- consumo passaggio da *Ventimiglia*: **11.262 kWh**,
- consumo passaggio tratta di Valico del Frejus: **5.660 kWh**.

Il passaggio da *Ventimiglia*, quindi, richiede un'energia **DOPPIA** rispetto alla **tratta di Valico del Frejus**. L'idea di deviare i treni in tal senso per permettere un **presunto** risparmio energetico è **evidentemente errata**.

Questo conferma che nella direttrice est-ovest **solo il tunnel di Base del Moncenisio** può permettere un **risparmio di energia** come **alternativa alla tratta di Valico del Frejus**.

Il risultato precedente induce anche a riflettere sull'utilizzo di **tratte alternative** per evitare il **costo delle doppie/triple trazioni** sulla **tratta di Valico del Frejus** (e non solo). Se da un lato le **imprese di trasporto** hanno un **guadagno economico** in tal senso, **allungare le tratte** crea invece uno **spreco di energia**.

Contrariamente a quello che dicono i NoTav su quest'argomento, questa pratica è **assolutamente da scoraggiare** e l'unico modo per farlo è offrire una **seria alternativa** come il **tunnel di Base del Moncenisio**.

#### ► *In conclusione:*

- la linea "di pianura" e "di mare" *Novara – Ventimiglia – Lyon* presenta nel suo percorso località a differenti quote slm e il treno **richiede energia** per superare tali continui dislivelli, seppur modesti,
- anche in caso di tratte totalmente pianeggianti il treno richiede energia per compensare la resistenza all'avanzamento  $R_v$  e questo implica che **più lunga è la tratta, più energia sarà consumata**,
- l'energia per percorrere la linea di *Ventimiglia* è **doppia** rispetto a quella della tratta di Valico del Frejus per la direttrice est-ovest *Novara – Lyon*,
- usare questa linea come **alternativa** per risparmiare sul **costo delle doppie/triple trazioni** della **tratta di Valico del Frejus** va **scoraggiata** perché avviene a **discapito** di un **consumo doppio di energia**.

## 8.4 ► Il mito di Federici

Mirco Federici era un laureato in chimica originario della provincia di Latina che dopo la laurea si era trasferito a Siena per ricoprire un incarico di ricercatore all'università. Il 13 febbraio del 2009, sull'Abetone in Toscana, perse la vita per un incidente sciistico.

Nel 2003 produsse uno studio dal titolo "*Analisi termodinamica integrata dei sistemi di trasporto in diversi livelli territoriali*".

Tale studio si proponeva lo **scopo di analizzare e comparare** nella sua **interezza energetica** i vari **sistemi di trasporto**, compresa **l'energia utilizzata** per la **costruzione delle infrastrutture**. Erano interessate strade, autostrade, ferrovie ordinarie e *TAV*.

Lo studio di Federici del 2003 si proponeva di attualizzarne un'altro ormai "datato e incompleto" (parole di Federici) del 1979 sulle ferrovie inglesi.

**A questo punto, nel nostro contesto, il discorso potrebbe già terminare qui perché quello studio, come dichiarato dallo stesso Federici, compara linee TAV con altre realtà ferroviarie e stradali mentre in Valsusa non si sta costruendo nessuna linea TAV ma un'infrastruttura in grado di ospitare indifferentemente treni merci e viaggiatori con velocità massima di 220 km/h.**

Ma sarebbe un peccato non **approfondire** la questione, perché è **dimostrabile** che esso **non vale più** neanche per le **odierne linee TAV**. Lo stesso Federici, quando ancora in vita, ebbe a dire che il suo studio **non era più attuale** e **andava rivisto** alla luce delle **nuove tecnologie e materiali**, frase **totalmente ignorata** dai NoTav.

E certamente andrebbe rivisto anche alla luce di certe **impostazioni iniziali**, come ad esempio la **stima della durata in 50 anni delle infrastrutture ferroviarie**: per rimanere in ambito *TAV* il **primo troncone** della ferrovia **direttissima Firenze – Roma** è stato aperto nel 1977 per cui tra **9 anni**, secondo le affermazioni di Federici, sarebbe da **rifare**. E non mi sembra proprio che sia così. E' evidente che se si **accorciano** i tempi di vita delle infrastrutture **pare ovvio** che queste diventino **non concorrenziali** oltre al fatto che si **sbilancia** completamente il calcolo tra **energia** per l'**infrastruttura** ed **energia** dei **mezzi circolanti**, dimostrando che le **prime sono più energivore dei secondi**.

Senza contare che l'**infrastruttura finale** non è quella considerata da Federici poiché il numero d'**interconnessioni** con le linee lente è stato decisamente **inferiore**.

Ma qui ci si occupa di **materiale rotabile** per cui non analizzerò la questione infrastrutturale anche se, come appena visto, ci sarebbe **molto da ridire** pure su quest'aspetto.

Come esistono "**vizi di forma**" sulla questione infrastrutture, ne esistono anche sulla questione della **comparazione** tra **mezzi di trasporto**. Federici compara le linee *TAV* con le linee ferroviarie tradizionali elettriche e diesel del comprensorio di *Brescia* e *Siena*, la linea lenta *Roma – Napoli* e i relativi assi stradali e autostradali. Lo studio di Federici, terminato nel 2003, è però **iniziato** negli **anni precedenti** e va quindi **correttamente contestualizzato**.

A quel tempo in Italia **non esisteva neppure un metro** di linea *AV*, intesa come infrastruttura che consente velocità di 300 *km/h*. Esisteva solo, come precursore di esse, la già citata direttissima *Firenze – Roma* a 250 *km/h*, **prima linea** veramente **veloce** in Europa.

Per quel che concerne i servizi **Alta Velocità**, si faceva **universalmente riferimento** al **TGV**, **unico** materiale rotabile in grado di disporre di linea idonea per correre a 300 *km/h*. In Italia c'erano già i primi *Frecciarossa* 500 politemione in grado di funzionare anche sotto catenaria  $2 \times 25 \text{ kV}_{ca} 50 \text{ Hz}$ , ma le linee dell'attuale rete *AV* a 300 *km/h* entreranno in esercizio solo tra il 2006 e il 2009. In altre parole, a parte l'esempio reale del **TGV** in *Francia*, il resto era **di là a venire** e quanto discusso **sull'argomento** era basato per lo più su **ipotesi** e **previsioni**.

La **mentalità dell'epoca**, che va da *FS* allo studio di Federici, era che queste nuove linee sarebbero stati **dirottati** i treni **merci** e i treni **viaggiatori** esistenti.

Il 2006 fu testimone di due eventi: l'inizio **dell'entrata in esercizio** delle **linee AV** e l'ascesa di **Mauro Moretti** ad **amministratore delegato** delle ferrovie.

**Costui**, artefice del rilancio ferroviario, primo tra tutti colse il vero **potenziale** delle linee *AV*, in altre parole la **vocazione** a un traffico **viaggiatori veloce** che liberasse le linee convenzionali per un **migliore traffico regionale e merci**.

Fu tutto un **rapido susseguirsi** di eventi che faranno capire bene come lo studio di Federici, **sicuramente sensato** come **premesse** nel suo **contesto storico**, ha **fallito** però sul **lungo termine l'obiettivo** perché **non ha considerato** un elemento **basilare** che avrebbe fatto **saltare il banco**.

## Dalla cronaca:

### ► 2006 settembre: Moretti diventa amministratore delegato:



Figura 33

### ► 2008 settembre: Moretti dichiara "treni Roma – Milano ogni 15 minuti":



Figura 34

► 2010 agosto: Moretti dichiara: "treno batte aereo. La quota passeggeri su rotaia passa dal 35% al 55 %".



**Moretti: Milano-Roma, il treno batte l'aereo**

*L'amministratore delegato di Fs spiega al Meeting di Rimini che ormai "la quota dei passeggeri su rotaia è arrivata al 55 per cento". E da settembre per l'alta velocità collegamento diretto fino a Malpensa*

Giannino della Frattina - Mar, 24/08/2010 - 18:39

"Siamo al 55 per cento" assicura l'amministratore delegato delle Ferrovie dello Stato Mauro Moretti, per sottolineare che il treno ad alta velocità ha ormai superato l'aereo nella competizione per contendersi i passeggeri sulla tratta Roma-Milano. "Quando siamo partiti eravamo al 35 per cento» ha spiegato ieri intervenendo al Meeting di Rimini» ricordando l'impegno nel progetto per l'alta velocità.

Figura 35

► 2014 febbraio: "treno batte aereo". Sorpasso sull'aereo e calo dei prezzi dei biglietti per effetto della concorrenza di Italo.



**Si Viaggia** GUIDE CONSIGLI DI VIAGGIO POSTI INCREDIBILI METEO

Notizie

**Treno batte aereo: Milano-Roma con l'alta velocità conviene di più**

Il traffico aereo nazionale resta depresso, compensato dallo sviluppo dell'alta velocità

Il **treno**, ormai sempre più veloce, quest'anno per la prima volta **batterà l'aereo** (anche per i viaggi d'affari). Secondo l'*Ansa*, il sorpasso avverrà già nel primo trimestre di quest'anno sulla **tratta Milano-Roma**, mentre i prezzi medi dei **biglietti ferroviari sono ancora in calo** grazie alla spinta della concorrenza (Italo vs Frecciarossa).

A fine del 2013, infatti, la quota di mercato del treno è salita al 49%, rispetto al 35% del primo trimestre del 2011, secondo quanto emerge dall'ultimo aggiornamento della *Business Travel Survey di Uvet Amex*, società del Gruppo Uvet specializzata nei viaggi d'affari.

L'entrata nel mercato italiano di Ntv (Italo) sulla Milano-Roma e su altre tratte dell'**alta velocità**, come effetto della concorrenza, ha fatto **calare negli ultimi due anni del 10% il costo medio del biglietto ferroviario**.

Figura 36

► 2014 aprile: la compagnia low cost Ryanair cancella la rotta aerea *Roma – Milano*.



Figura 37

► 2017 febbraio: la compagnia di bandiera Alitalia cancella la rotta aerea *Milano Malpensa – Roma* (rimane *Linate – Roma*).



Figura 38

► 2017 aprile: *Roma – Milano* 7 passeggeri su 10 scelgono il treno

## Roma-Milano, 7 passeggeri su 10 scelgono il treno

–di Giuseppe Latour 15 aprile 2017



**S**ette passeggeri per il treno, due per l'aereo e uno per la macchina o l'autobus. Se decidessimo di seguire dieci persone che, in un giorno qualsiasi, percorrono la tratta tra Roma e Milano, in base all'attuale situazione del mercato assisteremmo a una ripartizione di questo tipo. E il dato è clamoroso, perché basta tornare al 2008 per osservare che allora i rapporti di forza erano completamente diversi, quasi ribaltati: l'aereo veniva scelto dalla metà degli italiani, mentre il treno occupava il 36% del mercato.

Figura 39

► 2017 luglio: i *Frecciarossa 1000* doppi, con capienza di oltre 900 posti sulla rotta *Torino – Napoli* raggiungono un coefficiente di riempimento medio del 70%. Il raddoppio si è reso necessario per carenza di posti.

Ferrovie dello Stato > Società del Gruppo > Lavora con noi > Fondazione FS > Museo di Pietrarsa > [Acquista biglietto](#)

### FS NEWS

## Doppio Frecciarossa 1000: 250mila le prenotazioni a un mese dal primo viaggio

Il doppio Frecciarossa 1000 festeggia il primo mese di attività con duecentocinquantomila biglietti già venduti e oltre 1500 passeggeri ospitati su ogni treno

Il Frecciarossa 1000 raddoppia #Estate17



Roma, 11 luglio 2017

Il doppio *Frecciarossa 1000* festeggia il primo mese di attività con duecentocinquantomila biglietti già venduti e prenotazioni che si estendono fino a settembre e oltre.

Le corse del primo mese hanno conosciuto un coefficiente di riempimento medio del 70%. In numeri assoluti **ogni corsa ha ospitato oltre 1.500 passeggeri**, considerando i saliti e i discesi in tutte le fermate.

**La puntualità in arrivo**, misurata sul range 0-15 minuti, **ha superato il 97%**.

L'aumento dei posti a disposizione, più di 900 su ogni treno, in fasce orarie caratterizzate da un'alta domanda di mobilità, ha consentito di offrire maggiori occasioni di viaggi e rispondere adeguatamente a questi picchi.

Il doppio *Frecciarossa 1000*, realizzato con due ETR1000 uniti tra loro a formare un **unico treno di 16 carrozze**, per 400 metri di lunghezza complessiva, sfreccia a 300 km/h tra Torino e Napoli, con 4 collegamenti al giorno.

Figura 40

► **2018** maggio: Frece AV Trenitalia, primo trimestre 2018- viaggiatori in aumento del 10%.



## Frece AV Trenitalia, primo trimestre 2018: viaggiatori in aumento del 10%

Rispetto al primo trimestre 2017. Da gennaio a marzo 2018 i clienti AV sfiorano i 10 milioni



Roma, 9 maggio 2018

Aumentano i viaggiatori delle Frece AV (+10%), che da gennaio a marzo 2018 arrivano a sfiorare i **10 milioni** (9.760mila), l'intero comparto dei treni a percorrenza

Figura 41

Alla luce di quanto elencato è evidente che il **vero concorrente** della **TAV** è **l'aereo** e **non certo** i treni **regionali**, le **auto** o i **camion**.

Lo **studio di Federici** si fondò quindi su delle **premesse errate**, **non per malafede** ma perché in quel periodo solo pochi lungimiranti avevano ben compreso i **reali sviluppi futuri** delle linee AV.

Allo stato attuale vi sono fasce orarie con treni nella tratta *Milano – Roma* distanziati di solo **5 minuti** tra loro. Il successo è anche dovuto al fatto che il **treno AV**, rispetto **all'aereo**, **ferma** pure in **località intermedie**.

Anche lo stesso Federici, col passar del tempo, deve essersi accorto della **mutata situazione** se ebbe a dire che il **suo studio andava rivisto**.

Valutiamo quindi se sui **materiali rotabili**, dal punto di **vista energetico**, è **cambiato qualcosa** dai tempi del documento di Federici.

Si consideri il grafico 30 delle **resistenze unitarie tipiche all'avanzamento**  $r_v$  del **TGV, Frecciarossa 500 e Frecciarossa 1000**.

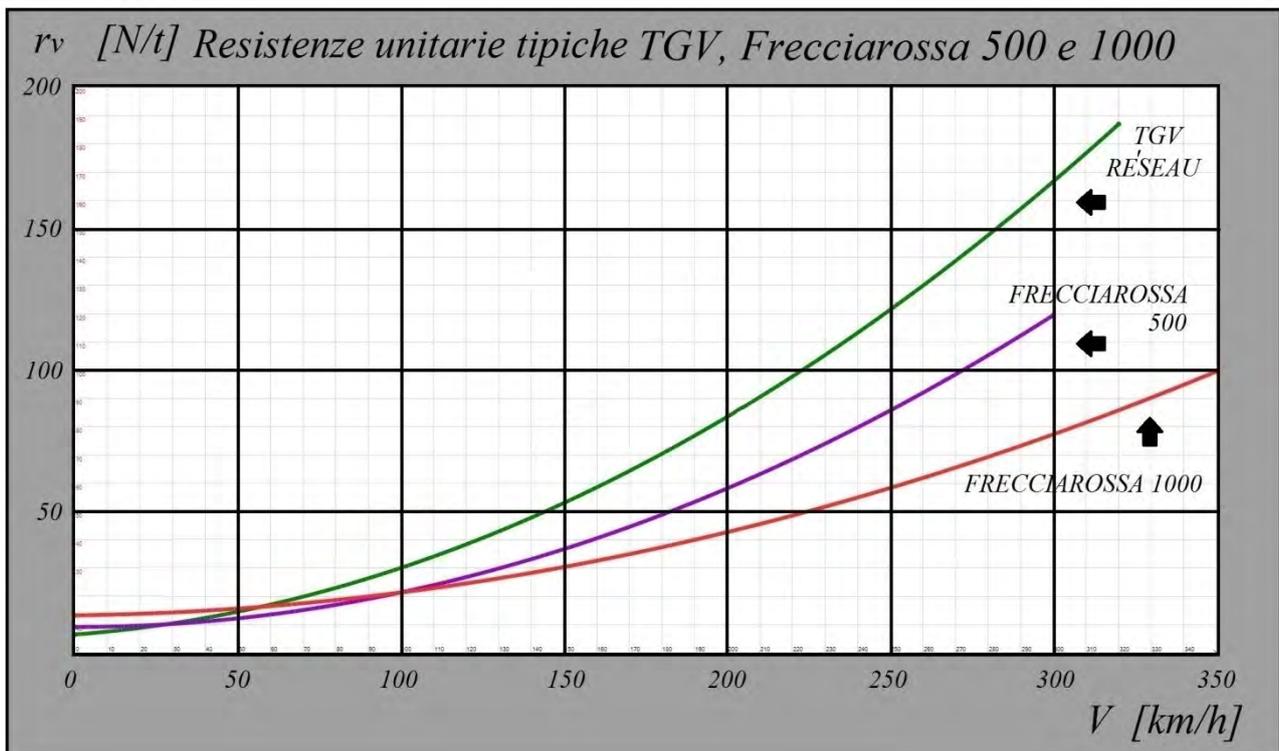


Grafico 30

Poniamo che i **materiali suddetti** percorrano una **linea pianeggiante e rettilinea** per cui  $r_g + \rho = 0$

Come è possibile osservare, a **300 km/h** la resistenza  $r_v$  di **167 N/t** di un **TGV** (l'unica esistente nella realtà ai tempi dello studio di Federici) è passata nel 2006 con l'esercizio dei **Frecciarossa 500** a **120 N/t** per terminare con l'esercizio nel 2015 del **Frecciarossa 1000** a **77 N/t**.

► In altri termini a **300 km/h** un **Frecciarossa 1000** presenta una **resistenza unitaria all'avanzamento** che è il **64%** di un **Frecciarossa 500** e il **46%** di un **TGV Réseau**, cioè **meno della metà**.

Vediamo ora la situazione in termini di **massa totale** e **passengeri trasportati**:

- **TGV Réseau**: .....  $r_v = 167 \text{ N/t}$ , massa a carico **409 t**, viaggiatori max **377**,
- **Frecciarossa 500**:...  $r_v = 120 \text{ N/t}$ , massa a carico **647 t**, viaggiatori max **594\***
- **Frecciarossa 1000**:... $r_v = 77 \text{ N/t}$ , massa a carico **501 t**, viaggiatori max **457**.

\* varia di qualche unità in base alla configurazione.

Calcoliamo le rispettive **potenze meccaniche per passeggero a 300 km/h**:

$$PW_{MC_{X/P}} = \frac{\Sigma R \cdot V}{1000 \cdot \text{passeggeri MAX}} = \frac{(r_v \cdot \text{Massa a carico}) \cdot V}{1000 \cdot \text{passeggeri MAX}} \quad [kW/\text{Passeggero}]$$

dove:

$r_v$  = resistenza unitaria dovuta ai veicoli [N/t],

$V$  = velocità [m/s]

*Massa a carico* = massa a carico del convoglio [t].

► **TGV Réseau:**

$$PW_{MC_{TGV/P}} = \frac{(r_v \cdot \text{Massa a carico}) \cdot V}{1000 \cdot \text{passeggeri MAX}} = \frac{(167 \cdot 409) \cdot 83,3}{1000 \cdot 377} = \mathbf{15,1 \text{ kW/Passeggero}}$$

► **Frecciarossa 500:**

$$PW_{MC_{500/P}} = \frac{(r_v \cdot \text{Massa a carico}) \cdot V}{1000 \cdot \text{passeggeri MAX}} = \frac{(120 \cdot 647) \cdot 83,3}{1000 \cdot 594} = \mathbf{10,1 \text{ kW/Passeggero}}$$

► **Frecciarossa 1000:**

$$PW_{MC_{1000/P}} = \frac{(r_v \cdot \text{Massa a carico}) \cdot V}{1000 \cdot \text{passeggeri MAX}} = \frac{(77 \cdot 501) \cdot 83,3}{1000 \cdot 457} = \mathbf{7 \text{ kW/Passeggero}}$$

Poiché i **rendimenti elettrici** delle tre macchine sono **simili**, è possibile verificare che la ripartizione **ricalca** grossomodo quella della **sola  $r_v$** , confermando che un **Frecciarossa 1000 a 300 km/h** consuma come **potenza elettrica per passeggero meno della metà** di un **TGV Réseau** (ovviamente s'intende che il **TGV** i 300 km/h li fa in **Francia** stante il fatto che in **Italia** non è attrezzato con le idonee apparecchiature di sicurezza per percorrere la linea **AV** sotto catenaria 2x25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz).

Poiché l'**energia elettrica** è esprimibile come **potenza moltiplicata al tempo**, essendo la **velocità uguale** per i **tre** i convogli è evidente che una **determinata tratta** sarà **percorsa** da tutti nello **stesso tempo**.

► In altri termini a **300 km/h** un **Frecciarossa 1000** consuma come **energia per passeggero il 69%** di un **Frecciarossa 500** e il **46%** di un **TGV Réseau**, cioè **meno della metà**.

► *In conclusione, circa lo studio di Federici:*

- lo studio di Federici **riguarda le linee TAV** e il tunnel di Base del Moncenisio con le tratte di adduzione **non è TAV** permettendo il transito sia di merci sia di viaggiatori alla velocità massima di **220 km/h**,
- lo studio di Federici è **datato** e le **premesse** di cui fa uso **non sono in linea** con la **realtà attuale**,
- le **resistenze unitarie tipiche all'avanzamento  $r_v$**  a **300 km/h**, dall'epoca di Federici, sono passate da: **167 N/t** per il **TGV Réseau** a **120 N/t** per il **Frecciarossa 500** e infine a **77 N/t** per il **Frecciarossa 1000** dei giorni nostri.  
In altri termini a **300 km/h** un **Frecciarossa 1000** presenta una **resistenza unitaria all'avanzamento** che è:
  - il **64%** di un **Frecciarossa 500**,
  - il **46%** di un **TGV Réseau**, cioè **meno della metà**,
- la **potenza per passeggero** a **300 km/h**, dall'epoca di Federici, è passata da **15,1 kW/Pass.** per il **TGV Réseau** a **10,1 kW/Pass.** per il **Frecciarossa 500** e infine a **7 kW/Pass.** per il **Frecciarossa 1000** dei giorni nostri.  
In altri termini, effettuando un paragone in **energia**, a **300 km/h** un **Frecciarossa 1000** consuma come **energia per passeggero**:
  - il **69%** di un **Frecciarossa 500**,
  - il **46%** di un **TGV Réseau**, cioè **meno della metà**,
- lo studio di Federici si fonda su **ipotesi** che nel **2018** sono state **smentite dai fatti**, facendo **confronti** con sistemi che **non sono** i diretti **concorrenti** della **TAV**, cioè gli **aerei** e gli **aeroporti** (e strutture annesse, come quelle radar e di radionavigazione che sono un costo non indifferente).

## 8.5 ► La retorica del supertreno sulla linea storica

Un altro elemento dominante della battaglia Notav, forse il più datato, è la retorica del supertreno, in altre parole "*il TGV passa già sulla Linea Storica, perché farne un'altra?*"

Come detto, il nuovo **tunnel di Base del Moncenisio non sarà alta velocità**, ma permetterà comunque i 220 km/h per treni viaggiatori e un minore tragitto da compiere rispetto alla tratta di Valico del Frejus risparmiando perciò tempo.

Tralasciamo in quest'ambito tutte le considerazioni sulla necessità del **minore tempo di percorrenza** senza il quale è **impensabile** fare una **seria concorrenza all'aereo** sulla tratta **Milano – Parigi** (fatto che ha decretato il successo sulla direttrice **Milano – Roma**) e concentriamo l'attenzione sulla **questione tecnica**.

A parte l'accattivante livrea, il **TGV**, quando percorre la **tratta di Valico del Frejus**, ha **una marcia in più** rispetto un comune **treno regionale**?



Figura 42

### ► Velocità massima in base alle caratteristiche dell'infrastruttura

Nella figura seguente è riportato un estratto dal Fascicolo Linea 2 RFI con velocità riferite alla tratta di valico lato *Italia* sia in salita sia in discesa (la situazione è simile



► Potenza

La potenza meccanica al cerchione di un **TGV Réseau** è **diversa** in base alla **tensione** di catenaria, in altre parole:

- 8.750 kW per catenaria 25 kV<sub>ca</sub> 50 Hz,
- 3.880 kW per catenaria 3 kV<sub>cc</sub>, e 1,5 kV<sub>cc</sub>.

La potenza meccanica al cerchione di una locomotiva per treni regionali E464 è di 3.500 kW, quindi **poco dissimile** dal TGV Réseau.

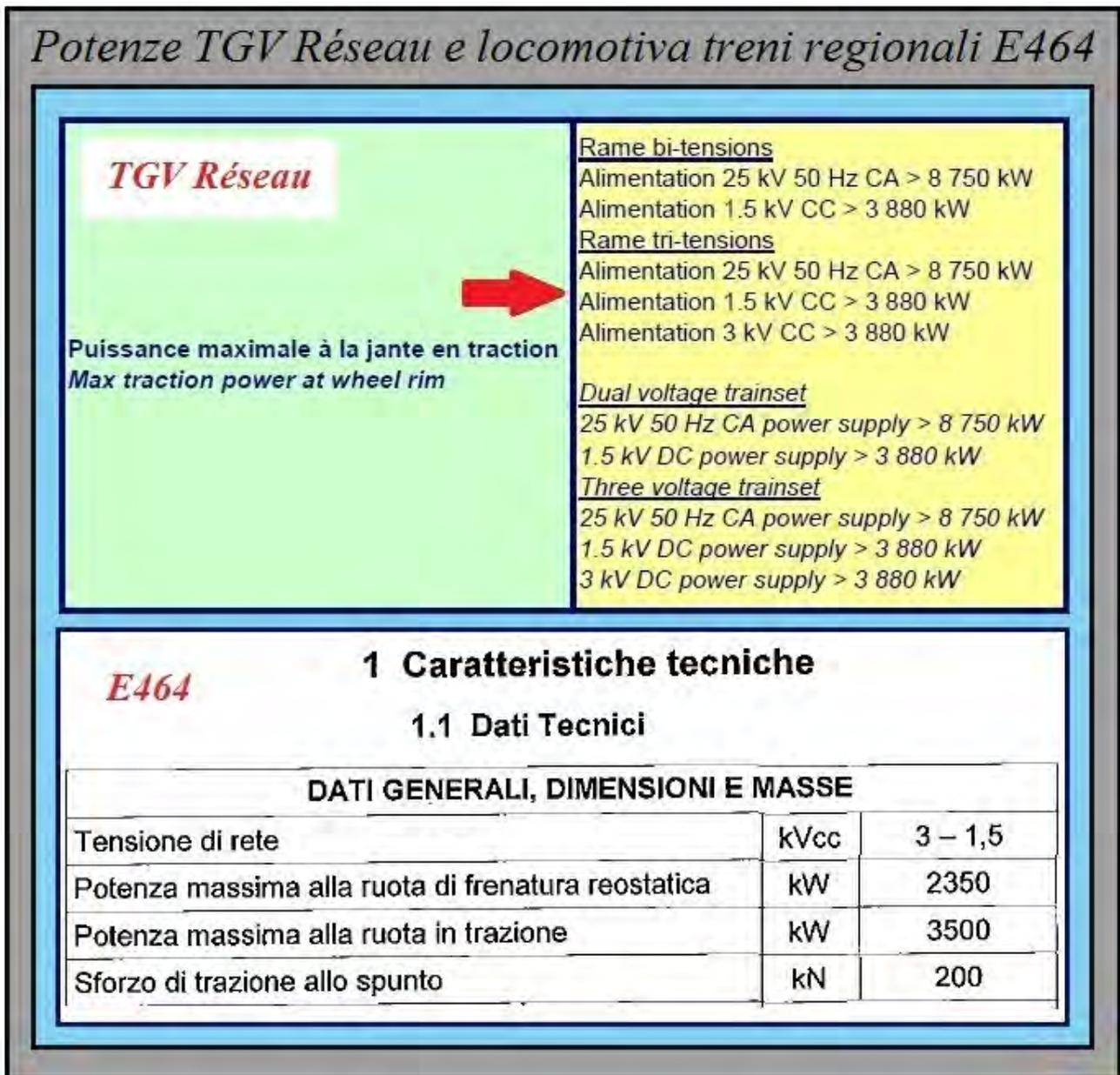


Figura 44

► Sforzo di trazione

Lo sforzo di trazione **all'avviamento** di un **TGV Réseau** sotto catenarie  $3 kV_{cc}$ , e  $1,5 kV_{cc}$  è di circa  $210 kN$  mentre quello della **E464** è di circa  $200 kN$ , perciò con **differenza minima**. Anche l'andamento delle due **caratteristiche meccaniche** è **simile**. La caratteristica meccanica del **TGV** si differenzia notevolmente da quella della **E464** a velocità maggiore di  $80 km/h$  **solo** sotto la catenaria  $25 kV_{ca}$   $50 Hz$ .

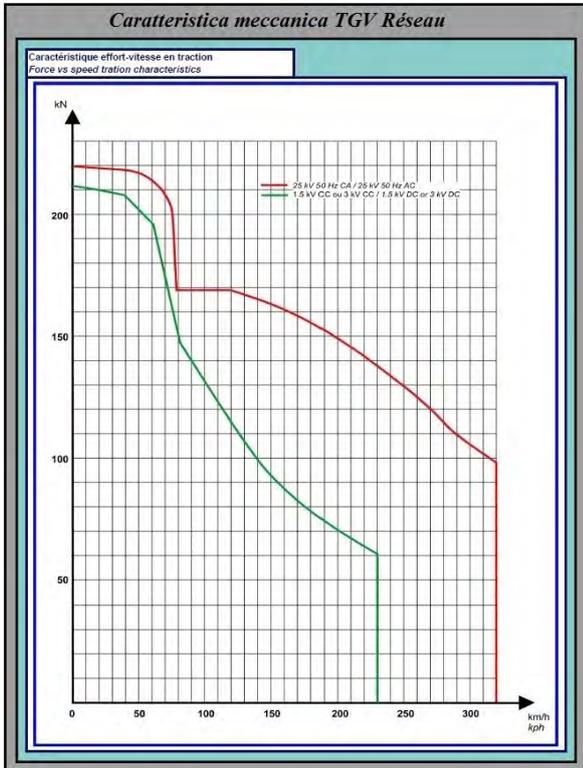


Figura 45

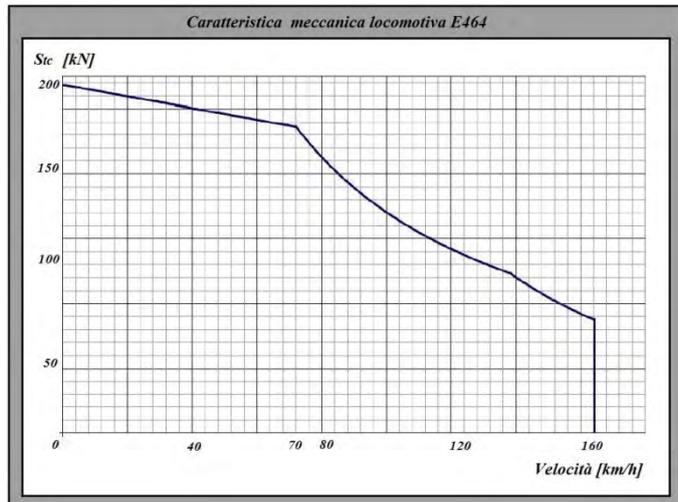


Figura 46

**N.B.** Il **TGV Réseau** alimentato da catenarie  $3kV_{cc}$ , e  $1,5kV_{cc}$  **non può superare i 230 km/h.**

► Masse dei convogli

La massa totale del **TGV Réseau** in servizio tra **Parigi** e **Milano** via **Frejus** vale a pieno carico  $409 t$  mentre per un convoglio regionale tipico della linea **Bardonecchia**, quale un **Vivalto** di 5 carrozze, vale (sempre a pieno carico)  $407 t$ : **praticamente identiche**.

► **In conclusione:**

- **TGV Réseau** e treno regionale che percorrono la tratta di Valico del Frejus hanno pressappoco medesima velocità massima, potenza, sforzo di trazione e massa,
- per quanto riportato nel punto precedente il **TGV Réseau** attualmente in servizio sulla tratta di Valico del Frejus non ha alcun vantaggio su un comune treno regionale.

## 8.6 ► Su un linea di valico quale percentuale di energia possiamo sperare di recuperare, rispetto a quella spesa, in fase di frenatura elettrodinamica?

Anche su questo punto i **Notav** pare abbiano le idee **poco chiare**, poiché forniscono spesso cifre che, seppur assolutamente **corrette** nel loro **ambito operativo**, **non lo sono affatto** per tratta di Valico del Frejus e il tunnel di Base del Moncenisio.

In **campo ferroviario**, il recupero energetico in fase di **frenatura elettrodinamica** può avvenire in modi diversi, sommariamente riconducibili a **tre** gruppi:

- **scambio di energia tra due treni posti sullo stesso troncone di linea**, uno in frenatura elettrodinamica (pianura o discesa) e uno in accelerazione (pianura o salita),
- **scambio con la rete elettrica** primaria mediante l'utilizzo di **convertitori reversibili** della *SSE*,
- **l'accumulo** in elementi come **batterie, supercondensatori**, etc., sia a **terra** sia a **bordo treno**.

Come già analizzato in precedenza al punto 5.4, un **treno** che si muove in **pianura** assorbe energia elettrica **dall'avviamento** fino alla **velocità di marcia** sia per **incrementare** la propria **energia cinetica** sia per **vincere** le **resistenze globali** alla **trazione**: in **seguito** l'assorbimento avviene solo per **compensare** queste ultime (**energia di marcia**).

Il seguente **rapporto** ci fornisce la percentuale di energia recuperata  $\% E_{recuperataFE}$  in **frenatura elettrodinamica**:

$$\% E_{recuperataFE} = \frac{E_{recuperataFE}}{E_{avviamento} + E_{marcia}} \cdot 100 \quad [\%]$$

E' evidente che a **parità** di energia di **avviamento** e di **energia recuperata** più si **allunga** la **tratta di marcia**, e quindi **l'energia di marcia**, e più il **recuperato**, in termini percentuali, diventa **piccolo**.

Per i **treni merci** e **viaggiatori lunga percorrenza** che percorrano una linea di **valico**, **l'energia cinetica** (energia dovuta a un corpo in movimento), vista sotto il profilo del recupero, ha poca **influenza**. Assume invece **rilievo** quella recuperabile in base al **dislivello** che è percorso dal treno (energia potenziale posizionale dovuta alla gravità).

**Vediamo il perché.**

Partiamo da quanto **ammontano**, in **termini pratici**, queste **due entità**, in modo di capire a quali **ordini di grandezza** fare riferimento:

$$\text{Energia cinetica:} \quad E_c = \frac{M_T \cdot V^2}{7.200} \quad [kWh]$$

$$\text{Energia potenziale:} \quad E_p = \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} \quad [kWh]$$

Effettuando il **rapporto** tra le due si ottiene:

$$\frac{E_p}{E_c} = \frac{\text{Energia potenziale}}{\text{Energia cinetica}} = \frac{M_T \cdot g \cdot \Delta h}{3.600} \cdot \frac{7.200}{M_T \cdot V^2} = \frac{2 \cdot g \cdot \Delta h}{V^2} \quad [\text{adimensionale}]$$

dove:

$M_T$  = massa del treno [t],

$V$  = velocità del convoglio [m/s],

$\Delta h$  = dislivello [m].

Tenendo conto delle rispettive **differenze di dislivello** tra *Bussoleno* e il *culmine*, in altre parole **855 m** per la **tratta di Valico del Frejus** e **310 m** per il **tunnel di Base del Moncenisio**, è possibile tracciare il grafico 31 del rapporto  $E_p/E_c$  per le varie velocità. Si è posto che i treni siano **accelerati** una sola volta **in partenza** e poi **transitino** nell'intera tratta, come avverrebbe **realmente** per i **treni merci** e **viaggiatori lunga percorrenza**.

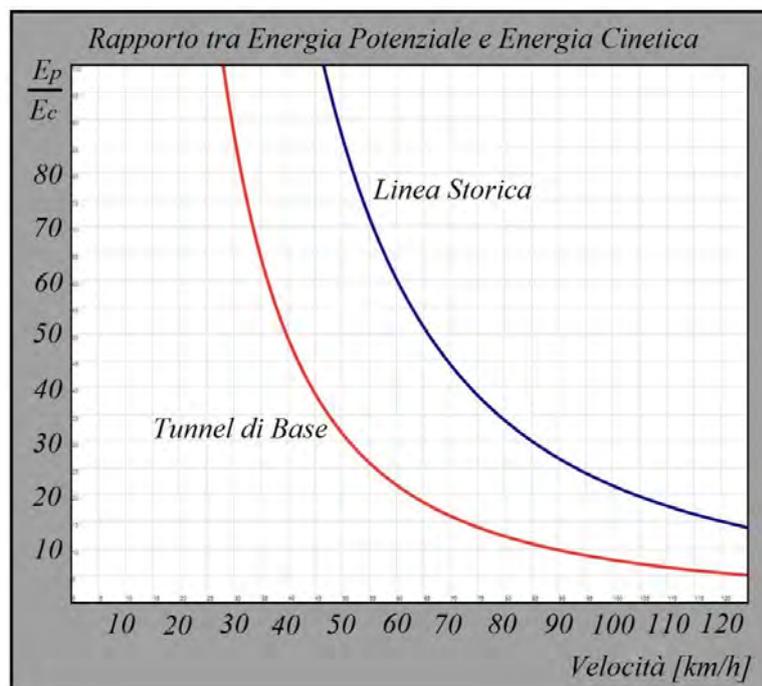


Grafico 31

Come è possibile osservare:

- per la **tratta di Valico del Frejus** alle **velocità tipiche di 55 km/h** per treni **merci molto pesanti** e **100 km/h** per treni **merci leggeri** o treni **viaggiatori**, il rapporto è di ben **72** volte e **22** volte,
- per il **tunnel di Base del Moncenisio** alle **velocità tipiche** dei treni merci, **100 e 120 km/h**, i rapporti sono rispettivamente circa **8** volte e **5,5** volte.

E' evidente che, a **parità di velocità** di discesa, il rapporto pur rimanendo comunque alto, **si riduce nel tunnel di Base del Moncenisio** poiché la **quota raggiunta è minore**. **Minore quota** vuol dire anche **minore energia** da **spendere** per raggiungerla e di conseguenza da **recuperare**. Considerando che vanno tenuti in debito conto anche i **rendimenti**, la migliore gestione dell'energia è **l'immediato risparmio della stessa** e, solo come rimedio **secondario**, il **recupero**.

Da questo punto di vista il **tunnel di Base del Moncenisio** soddisfa pienamente **quest'obiettivo** permettendo **subito**, grazie alla **quota minore** rispetto alla **tratta di Valico del Frejus**, il **risparmio dell'energia** e, volendo, in un **secondo tempo** anche il **recupero**.

Stante **l'assenza di fermate e ripartite** da parte delle **suddette tipologie di treni**, quindi, in una tratta di **valico** **l'energia che prevalentemente si recupera** è quella **potenziale** (ritrasformata in cinetica) mentre nelle linee di **pianura** è esclusivamente quella **cinetica di avviamento**. E' evidente che per un treno **viaggiatori regionale** il discorso è diverso, ma questi **non percorreranno** il tunnel di Base del Moncenisio per cui non sono di nostro interesse.

Vediamo ora, come esempio non esaustivo, **due casi** di recupero di energia elettrodinamica.

1) La tab.21, ad opera della **UIC** (Union internationale des chemins de fer) fornisce un quadro della possibilità **percentuale** del recupero di energia per sistemi in **corrente continua** in **pianura** e che quindi **recuperano** prevalentemente **l'energia cinetica di avviamento**.

	Theoretical potential	Correction due to traction efficiency	Correction due to blended braking	Potential if additional technologies are used	Correction due to non-receptive catenary	Potential without additional technology
Main lines	15%	0.9	0.8	11%	0.2	2%
Regional lines	35%	0.9	0.8	25%	0.4	10%
Local lines	45%	0.9	0.8	32%	0.5	16%
Freight lines	20%	0.9	0.5	14%	0.2	3%

Tabella 21

Com'è possibile constatare, per la colonna **Local lines** (le nostre **linee ferroviarie metropolitane sfm di pianura**, da non confondere con le **metropolitane**) si arriva a

una percentuale **teorica** di recupero del **45%** con un netto fino al **32%** tenendo conto del **rendimento locomotiva** e **dell'interferenza della frenatura elettrodinamica** con il **freno pneumatico** (necessario per garantire in rispetto dello spazio di frenata come visto al punto 3.2). Tale percentuale è ovvia: si hanno **continue fermate** e **ripartite** in **pochissimo spazio** e quindi con **ridotte perdite** dovute all'energia di **marcia**. Quel numero è possibile però solo con "**addizionali tecnologie**" ovvero soluzioni che rendano il **recupero** dell'energia **sempre presente**, quindi **slegato** dalla **ricettività** della **catenaria**. In caso contrario il valore **scende** ulteriormente raggiungendo quello dell'ultima colonna.

**N.B.** ► Non si cada in inganno **confondendo** questi **rendimenti** con il **rendimento** della **locomotiva** in **frenatura elettrodinamica** che resta comunque **molto alto**, circa **l'87%**, come visto al punto 6.11.

2) In internet è reperibile un **documento** del 2009 per merito di tre professori dell'**università** degli studi di **Roma "La Sapienza"** - dipartimento d'ingegneria elettrica- sulla tratta *Alta Velocità Torino – Novara* (al tempo del documento la linea non era ancora completa fino a *Milano*) dove si quantificava un **recupero** compreso tra il **4 e 8%** (*Prof. ing. Bruno Capasso, Dott. ingg. Marco Ciucciarelli, Stefano Lauria*).

Anche qui è altrettanto ovvio perché le **linee AV** sono quasi **pianeggianti** (per cui l'energia **potenziale** da recuperare dovuta **all'altitudine** è **ininfluente** o comunque **marginale**), gli **arresti** sulle **linee AV** sono **scarsi** o avvengono nelle interconnessioni, per il resto è solo **transito** quindi con **pochissime fermate** e **ripartite** rispetto al **rilevante spazio percorso** (energia di **marcia**).

Infatti, su tali linee ai fini energetici si cerca prevalentemente di **ottimizzare** la **marcia**.

E' quindi del tutto corretto che, **confrontando** l'energia **recuperata** rispetto a quella **consumata**, si arrivi a una **percentuale** finale **molto bassa** perché tra le **partenze** e le **fermate** viene percorsa **molta strada** e quindi con **più presenza** di **energia di marcia**.

Con i seguenti grafici si può comprendere meglio i concetti precedenti. Nel grafico 32 è riportata **l'intera tratta** analizzata dallo studio citato, nel grafico 33 ho **supposto** una **percorrenza inferiore**.

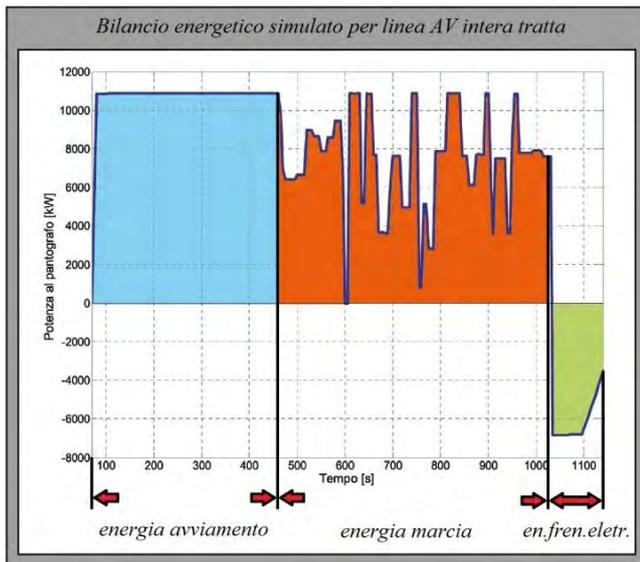


Grafico 32

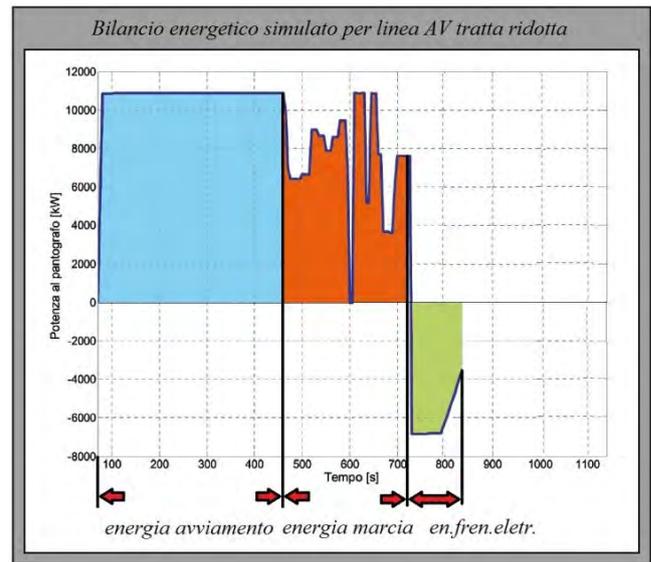


Grafico 33

Come visibile **confrontando** i due grafici, **l'energia all'avviamento e l'energia recuperata** (area verde) rimangono nel valore assoluto **le stesse**, quello che varia è **l'energia di marcia** e quindi la **percentuale di recupero** (vedere la prima formula di questo punto).

**N.B.** ► I grafici superiori sono di un treno AV per cui è normale che la resistenza globale alla trazione si presenti elevata sia in fase di avviamento sia in fase di marcia a causa della resistenza aerodinamica. E' normale anche che vi siano delle interruzioni nell'assorbimento a causa dei cambi fase.

-----

La **tab.21** della **UIC** e lo **studio appena citato**, quindi, **non sono applicabili** o lo sono solo **marginalmente** su una **linea di valico**, come gli **autori stessi** hanno specificato alla fine del documento ponendo l'accento sul fatto che per queste linee occorre un **diverso approccio**:

*"si auspica la valutazione dell'energia media recuperabile [...] sulle tratte di valico [...]". Questo perché, alla luce di quanto detto, è evidente che nelle tratte di valico, ovvero in pendenza, si può ragionevolmente ipotizzare di aumentare ancora la percentuale del recuperato rispetto ai treni metropolitani essendovi treni perennemente in trazione (salita) e altri perennemente in frenatura (discesa) "*

Ricordando il mio esempio del punto 8.2 pag. 131 **sarebbe** recuperabile addirittura il **50%** dell'energia spesa per la salita. Ovviamente in linea **assolutamente teorica**.

In linea generale, **invece**, dal valore **teorico** si arriva a quello **realistico finale considerando** un'infinità di variabili **interconnesse** tra loro, quali:

- il tipo di treno (merci-viaggiatori),
- il tipo di servizio nel caso di convogli viaggiatori (diretto-locale),
- il rendimento della locomotiva,
- la possibilità della locomotiva di permettere il recupero a quel valore di tensione di catenaria,
- la ricettività della linea,
- se la *SSE* è reversibile,
- se lo scambio energetico avviene tra treno e treno,
- se esistono sistemi accumulo dell'energia (supercondensatori, batterie),
- il rendimento della catenaria tra treno e *SSE*, se la *SSE* è reversibile,
- il rendimento della catenaria tra treno e eventuali punti di accumulo di energia,
- il rendimento della catenaria tra treno e treno,
- l'altimetria della linea,
- il susseguirsi di cicli salita-discesa,

solo per citarne le principali.

Nel mio calcolo sulle **differenze energetiche** del paragrafo 7.2, con riferimento alla tab.21 sulla ricettività della catenaria e tenendo conto delle suddette variabili, ho ottenuto il **recuperato reale** applicando:

- alla **tratta di Valico del Frejus** un **più che ottimistico** rendimento del  $\eta = 0,3$  (30%) sul **recuperato teorico**. Tale rendimento è **comprensivo** di quello **di sistema**  $\eta = 0,76$  (76%) e della **ricettività** della **catenaria** di  $\eta = 0,4$  (40%), dedotta dalla tab.21, supponendo un **uso intensivo** della linea come auspicato dai NoTav.
- al **tunnel di Base del Moncenisio** il rendimento del  $\eta = 0,85$  (85%) Tale valore è quello del **solo rendimento di sistema** poiché la catenaria è **sempre ricettiva** perché le *SSE* sono reversibili come esposto al punto 6.5.

Ho definito la percentuale di **recuperato** sulla **tratta di Valico del Frejus "più che ottimistica"** perché, con tutte le **limitazioni tecniche** e di **sicurezza** ai convogli circolanti è ben **difficile** pensare di raggiungere un **simile valore**.

Questo **avvalora maggiormente** i **risultati** del punto 7.2 sulle **differenze energetiche** dimostrando che, anche con valori **favorevolissimi** agli **oppositori** dell'opera, si conferma sulla questione energetica una **schacciante superiorità** del **tunnel di Base del Moncenisio**.

► *In conclusione, circa quale percentuale di energia in frenatura elettrodinamica possiamo sperare di recuperare su un linea di valico, rispetto a quella spesa:*

- la quantità **recuperabile** è **compresa** fra un teorico **50%** e **zero** dipendendo da un **elevato quantitativo** di **variabili**, tra le quali i **rendimenti di sistema**, la **ricettività della catenaria** e delle sue **caratteristiche elettriche**, il tipo di **scambio energetico**, il tipo di **servizio svolto** e le **caratteristiche fisiche** della linea ferroviaria,
- nella **tratta di Valico del Frejus** ho calcolato un rendimento del  $\eta = 0,3$  (30%) sul **recuperato teorico di energia elettrodinamica**,
- nel **tunnel di Base del Moncenisio** ho calcolato un rendimento del  $\eta = 0,85$  (85%) sul **recuperato teorico di energia elettrodinamica**.
- con tutte le **limitazioni tecniche** e di **sicurezza** ai convogli circolanti sulla **tratta di Valico del Frejus**, raggiungere  $\eta = 0,3$  (30%) è da considerarsi **molto ottimistico**. Questo **avvalora maggiormente** i **risultati** sulle **differenze energetiche** calcolati in questo studio dimostrando che, anche con valori **favorevolissimi** agli **oppositori** dell'opera, si conferma sulla **questione energetica** una **schacciante superiorità** del **tunnel di Base del Moncenisio**.

## **PARTE NONA**

### **ALLEGATI**

## 9.1 ► Allegati

### Allegato A

ENERGIA SALITA																			
Linea	Treno	Vel. di salita km/h	Loc n	Massa t	Δh m	Spazio m	rv N/t	ρ N/t	rt rv+p N/t	Ep kWh	Epersa kWh	Totale Etraz.loc [Ep+Epersa] kWh	Tempo percor. s	Tempo percor. minuti	Totale ass. PW AUX kW	Totale Ecatenaria [Etraz.loc+AUX] kWh	η sistema %	Totale Eprimaria [Ecatenaria/η] kWh	Totale Eprimaria kWh/t
100	2	1330	855	50351	55	3	58	3099	1079	4178	1813	30	101	4278	0,76	5629	4,23		
100	3	1870	855	50351	55	3	58	4357	1517	5874	1813	30	151	6025	0,76	7927	4,24		
ETR1000	100	1	501	855	50351	21	3	24	1167	168	1335	1813	30	116	1451	0,76	1910	3,81	
Tunnel di Base	Merci	120	2	1780	310	33731	69	1	70	1504	1167	2671	1012	17	56	2727	0,85	3209	1,80
		100	2	2230	310	33731	55	1	56	1884	1170	3054	1214	20	67	3121	0,85	3672	1,65
	ETR1000	200	1	501	310	33731	43	1	44	423	207	630	607	10	39	669	0,85	787	1,57
LS	Merci	100	2	2230	180	43598	55	3	58	1094	1566	2660	1570	26	87	2747	0,76	3615	1,62

ENERGIA DISCESA TRATTA DI VALICO DEL FREJUS 1/3																
Km1-Beaulard																
Linea	Treno	Loc Attive n	Loc FE n	Massa t	Vel. km/h	Δh m	Spazio m	rv N/t	ρ N/t	rt rv+p N/t	Ep kWh	E loc Teor kWh	Epersa kWh	E a dispos kWh	E da smalt. Pneum kWh	E recupe rata kWh
2	2	1330	80	150	6847	44	3	47	544	380	119	424	44	380		
3	2	1870	55	150	6847	34	3	37	764	380	132	633	252	380		
ETR1000	1	1	501	100	150	6847	21	3	24	205	390	23	182	-208	182	

ENERGIA DISCESA TRATTA DI VALICO DEL FREJUS 2/3											
Beaulard-Salbertrand											
Vel.	Δh	Spazio	rv	ρ	rt rv+p	Ep	E loc Teor	Epersa	E a dispos	E da smalt. Pneum	E recupe rata
km/h	m	m	N/t	N/t	N/t	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
95	138	11749	52	3	55	278	326	133	145	-181	145
95	138	11749	52	3	55	500	653	239	261	-392	261
70	138	11749	40	3	43	703	653	261	443	-210	443
115	138	11749	24	3	27	188	669	44	144	-525	144

ENERGIA DISCESA TRATTA DI VALICO DEL FREJUS 3/3														
Salbertrand-Bussoleno												Totali		
Vel.	Δh	Spazio	rv	ρ	rt rv+p	Ep	E loc Teor	Epersa	E a dispos	E da smalt. Pneum	E recupe rata	Etot recup.	AUX	Totale Ecatenaria [Etot-AUX]
km/h	m	m	N/t	N/t	N/t	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
80	567	23643	44	3	47	1143	657	229	914	257	657	993	51	943
80	567	23643	44	3	47	2055	1314	412	1643	329	1314	1955	101	1854
55	567	23643	34	3	37	2889	1314	455	2434	1120	1314	2137	144	1992
100	567	23643	21	3	24	774	1346	79	695	-651	695	1021	94	928

ENERGIA DISCESA TUNNEL DI BASE DEL MONCENISIO																				
Linea	Treno	Loc Attive n	Loc FE n	Massa t	Vel. km/h	Δh m	Spazio m	rv N/t	ρ N/t	rt rv+p N/t	Ep kWh	E loc Teor kWh	Epersa kWh	E a dispos kWh	E da smalt. Pneum kWh	E recupe rata kWh	AUX kWh	tot in cat kWh	η sistema %	Tot in primaria kWh
2	2	2230	100	310	33731	55	1	56	1884	1874	1170	714	-1160	714	67	646	1	646		
ETR1000	1	1	501	200	310	33731	43	1	44	423	984	207	217	-767	217	39	178	1	178	

Storico Valico del Frejus e Tunnel di Base del Moncenisio a confronto: le credenze Notav di fronte ai fatti reali

CONFRONTO ENERGIE																					
Linea	Treno	Velocità tipica km/h	Massa treno t	Eprim Energia dalla primaria kWh	Eprim ass/t kWh/t	Eprim ass/t media kWh/t	Linea di Valico del Frejus									Tunnel di Base del Moncenisio					
							Encat energia netta alla catenaria kWh	76% di Encat kWh	30% di Encat kWh	76% di Eprim-Encat kWh	76% ass/t media kWh/t	30% di Eprim-Encat kWh	30% ass/t kWh/t	30% ass/t media kWh/t	Encat energia netta alla catenaria kWh	85% di Encat kWh	85% di Eprim-Encat kWh	ass/t kWh/t	ass/t media kWh/t		
Valico Frejus	Merci	80	740	3122	4,22	4,23	943	717	283	2405	3,25	3,28	2839	3,84	3,86						
		80	1330	5629	4,23		1854	1409	556	4220	3,17		5073	3,81		3,86					
		55	1870	7927	4,24		1992	1514	598	6413	3,43		7329	3,92							
	ETR1000	100	501	1910	3,81	3,81	928	705	278	1205	2,40	1,96	1632	3,26	3,26						
Tunnel di Base	Merci	120	1780	3209	1,80	1,72										293	249,1	2960	1,66	1,53	
		100	2230	3672	1,65											646	549,1	3123	1,40		
		ETR1000	200	501	787		1,57										178	151,3	635,7		1,27

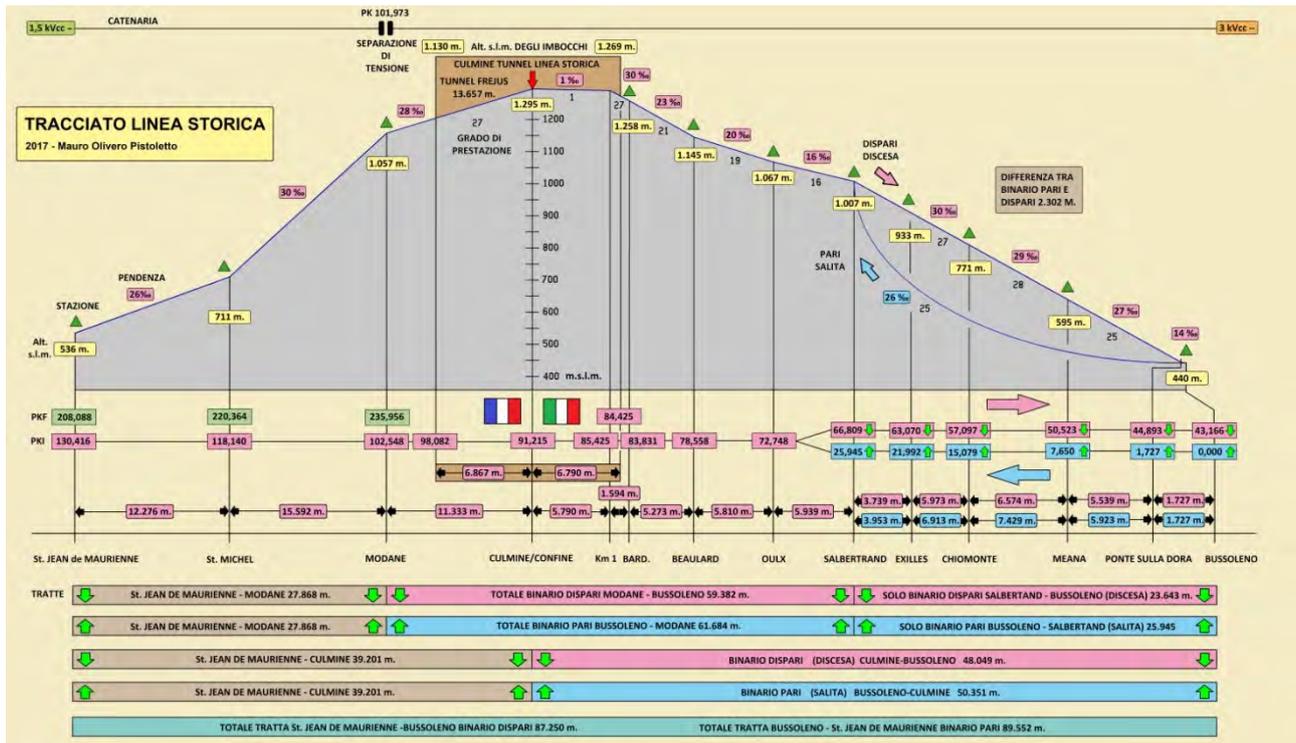
Allegato B

Novara - Ventimiglia - Lyon															
Stazione	Progressivo km	SLM m	SLM+TR m	Dislivello m	Dislivello positivo m	Pendenza media %	Parziali m	Massa Treno t	Ep kWh	Epersa kWh	Ep+Epersa kWh	EPI+Epersa kWh	30% EPI+Epersa kWh		
Novara	0	162					0	740							
Valenza	53	125	162	-37		-0,70	53	740	-75	654	579				
Alessandria	67	95	125	-30		-2,14	14	740	-60	173	112				
Arquata	100	248	95	153	153	4,64	33	740	308	407	715				
Ronco	110	334	248	86	86	8,60	10	740	173	123	297				
Genova S.	137	20	334	-314		-11,63	27	740	-633	333		966	-386		
Arenzano	155	10	20	-10		-0,56	18	740	-20	222	202				
Cogoleto	158	4	10	-6		-2,00	3	740	-12	37	25				
Varazze	168	10	4	6	6	0,60	10	740	12	123	135				
Savona	178	50	10	40	40	4,00	10	740	81	123	204				
Spotorno	189	10	50	-40		-3,64	11	740	-81	136	55				
XXimiglia	287	10	10	0		0,00	98	740	0	1209	1209				
Monte Carlo	307	28	10	18	18	0,90	20	740	36	247	283				
Villefranche	322	13	28	-15		-1,00	15	740	-30	185	155				
Théoule	369	13	13	0		0,00	47	740	0	580	580				
Anthéor	379	30	13	17	17	1,70	10	740	34	123	158				
Agay	383	10	30	-20		-5,00	4	740	-40	49	9				
Roquebrune	404	10	10	0		0,00	21	740	0	259	259				
Carnoules	452	193	10	183	183	3,81	48	740	363	592	961				
Toulon	486	19	193	-174		-5,12	34	740	-351	419	63				
Cassis	526	128	19	109	109	2,73	40	740	220	493	713				
Marseille	556	50	128	-78		-2,60	30	740	-157	370	213				
Berre	590	18	50	-32		-0,94	34	740	-64	419	355				
Mnarnas	609	50	18	32	32	1,68	19	740	64	234	299				
S. Martin	626	23	50	-27		-1,59	17	740	-54	210	155				
Avignon	677	23	23	0		0,00	51	740	0	629	629				
Vienne	876	162	23	139	139	0,70	193	740	280	2454	2734				
Lyon	918	175	162	13	13	0,31	42	740	26	518	544				
					Tot. Dist. 736				Totale senza FE	11648	Totale con FE	11262			
Novara - Frejus - Lyon															
Stazione	Progressivo km	SLM m	SLM+TR m	Dislivello m	Dislivello positivo m	Pendenza media %	Parziali m	Massa Treno t	Ep kWh	Epersa kWh	Ep+Epersa kWh	EPI+Epersa kWh	30% EPI+Epersa kWh		
Novara	0	162					0	740							
Vercelli	22	130	162	-32		-1,45	22	740	-64	271	207				
Saluggia	61	194	130	64	64	1,64	39	740	129	481	610				
chivasso	72	187	194	-7		-0,64	11	740	-14	136	122				
Brandizzo	77	187	187	0		0,00	5	740	0	62	62				
Settimo	85	207	187	20	20	2,50	8	740	40	99	139				
TU PS	95	190	207	-17		-1,70	10	740	-34	123	89				
Collegno	104	300	190	110	110	12,22	9	740	222	111	333				
Bussoleno	139	440	300	140	140	4,00	35	740	282	432	714				
Culmine	188	1295	440	855	855	17,45	49	740	1722	604	2327				
Modane	199	1057	1295	-238		-21,64	11	740	-479	136		615	-246		
S.J. de M	227	536	1057	-521		-18,61	28	740	-1050	345		1395	-558		
Aiton	265	305	536	-231		-6,08	38	740	-465	469	3				
Chambéry	289	270	305	-35		-1,03	34	740	-71	419	349				
Aix le Bains	314	240	270	-30		-2,00	15	740	-60	185	125				
Culoz	336	240	240	0	0	0,00	22	740	0	271	271				
La Burbanche	361	359	240	119	119	4,76	25	740	240	308	548				
St. Morice	419	175	359	-184		-3,17	58	740	-371	715	345				
Lyon	437	175	175	0		0,00	18	740	0	222	222				
					Tot. Dist. 1308				Totale senza FE	6464	Totale con FE	5860			

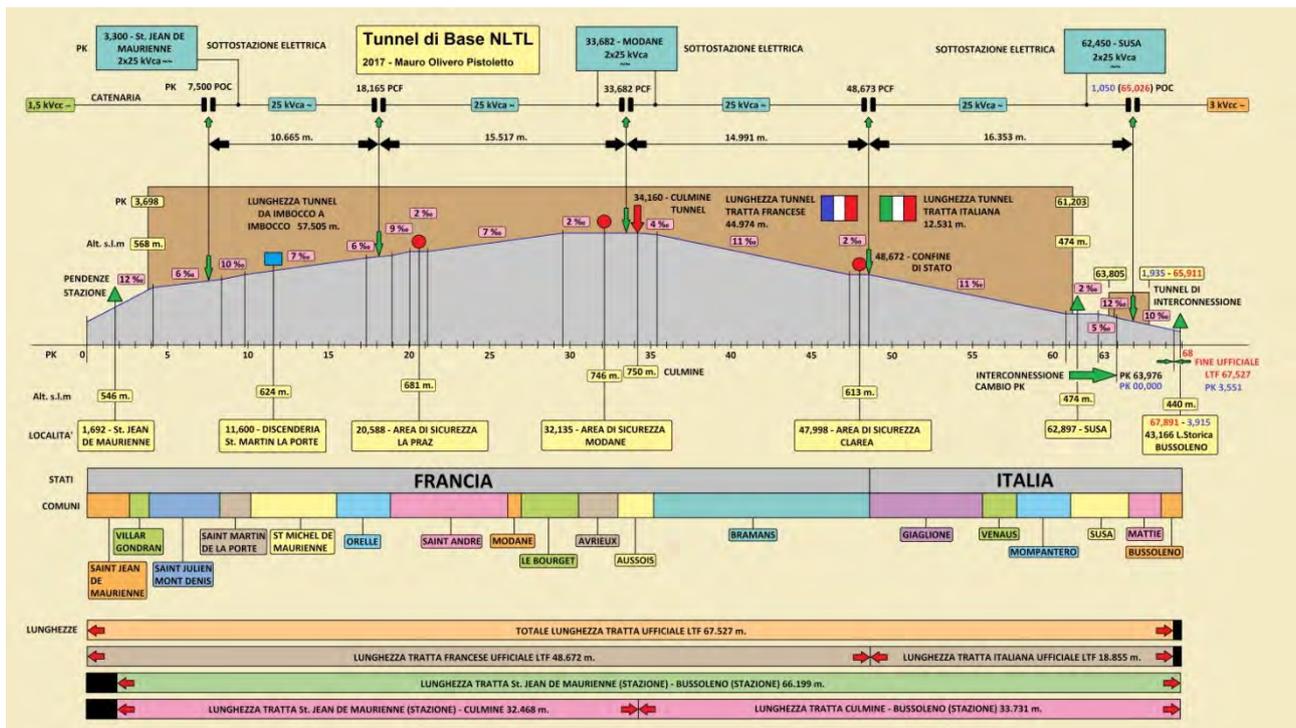
## **PARTE DECIMA**

### **CARTINE**

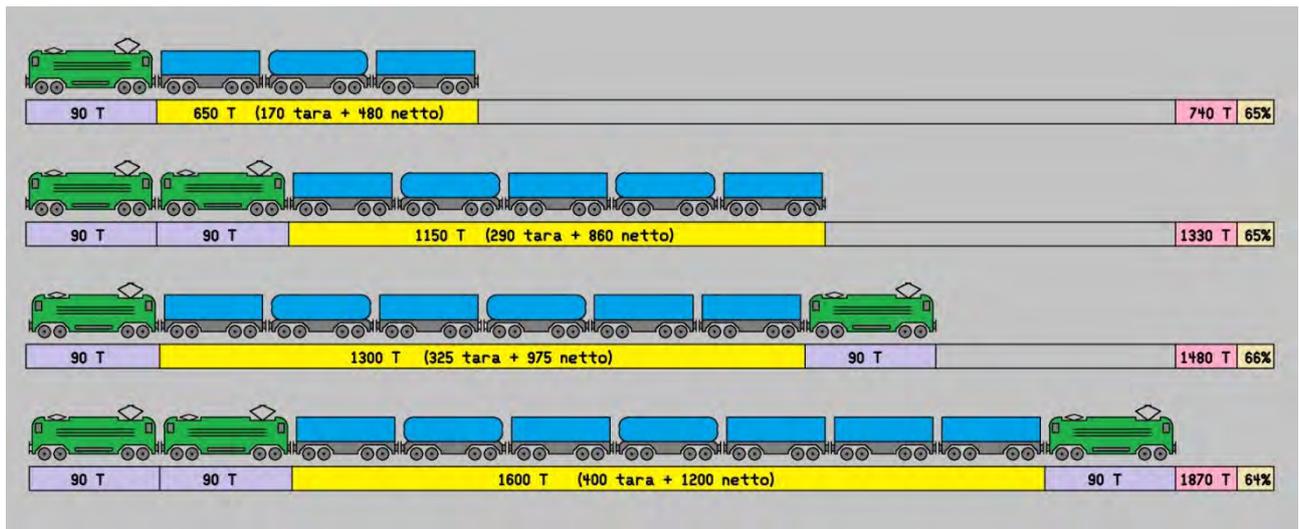
## 10.1 ▶ Tratta di Valico del Frejus



## 10.2 ▶ Tunnel di Base del Moncenisio



## 10.3 ► Treni tipici sulla tratta di Valico del Frejus



## SOMMARIO

## Sommario

PARTE PRIMA: PREMESSA .....	2
1.1 Scopo dell'elaborato.....	3
1.2 La struttura dell'elaborato.....	4
PARTE SECONDA: LE FORZE RESISTENTI.....	6
2.1 La condotta di un treno con locomotiva a trazione elettronica.....	7
2.2 Le forze resistenti alla trazione.....	8
2.3 Le resistenze unitarie alla trazione.....	8
2.4 Le resistenze alla trazione riferite all'intera massa del treno.....	17
PARTE TERZA: CARATTERISTICA MECCANICA DI TRAZIONE E FRENATURA ELETTRODINAMICA DELLA LOCOMOTIVA.....	19
3.1 Caratteristica meccanica di trazione.....	20
3.2 Caratteristica meccanica di frenatura elettrodinamica.....	25
3.3 Sforzo di trazione e velocità massima raggiungibile da un convoglio.....	33
3.4 Considerazioni sulla caratteristica meccanica di trazione.....	35
3.5 Sforzo di frenatura elettrodinamica e massima velocità contenibile di un convoglio.....	36
3.6 Sforzo di trazione e frenatura elettrodinamica della locomotiva BB36.000.....	37
PARTE QUARTA: I PARAMETRI PRINCIPALI DELLA LOCOMOTIVA.....	38
4.1 Prestazione della locomotiva.....	39

4.2 Rapporto di trasmissione della locomotiva.....	42
4.3 La potenza della locomotiva.....	44
<b>PARTE QUINTA: POTENZA E ENERGIA DELLA TRAZIONE.....</b>	<b>47</b>
5.1 Potenza.....	48
5.2 L'energia.....	49
5.3 Energia assorbita o ceduta alla catenaria.....	50
5.4 Ripartizione energetica nelle fasi di trazione e frenatura elettrodinamica di un treno .....	54
<b>PARTE SESTA: RENDIMENTI DI SISTEMA.....</b>	<b>59</b>
6.1 Rendimenti di sistema.....	60
6.2 Sottostazioni elettriche e catenarie.....	60
6.3 Differenze tra i sistemi a 3 <i>kVcc</i> e 1,5 <i>kVcc</i> della tratta di Valico del Frejus e il 2x25 <i>kVca</i> 50 Hz del nuovo tunnel di Base del Moncenisio.....	62
6.4 Rendimento <i>SSE</i> 3 <i>kVcc</i> e 1,5 <i>kVcc</i> .....	65
6.5 Rendimento <i>SSE</i> 2x25 <i>kVca</i> 50 Hz.....	66
6.6 Le catenarie.....	68
6.7 Le catenarie della tratta di Valico del Frejus 3 <i>kVcc</i> e 1,5 <i>kVcc</i> .....	70
6.8 Rendimento medio della catenaria sulla tratta di Valico del Frejus.....	76
6.9 La catenaria del tunnel di Base del Moncenisio 2x25 <i>kVca</i> 50 Hz.....	79
6.10 Rendimento medio della catenaria del tunnel di Base del Moncenisio.....	79
6.11 Rendimenti in trazione e frenatura elettrodinamica delle locomotive elettroniche.....	82
6.12 Rendimenti totali medi di sistema.....	85
<b>PARTE SETTIMA: PRINCIPALI DIFFERENZE TRA LA TRATTA DI VALICO DEL FREJUS ED IL</b>	

TUNNEL DI BASE DEL MONCENISIO.....	86
7.1 Differenze sulla resistenza globale alla trazione.....	87
7.2 Differenze Energetiche.....	91
7.3 Differenze sulla frenatura.....	102
<b>PARTE OTTAVA: AFFERMAZIONI E CREDENZE</b>	
<b>NOTAV.....</b>	<b>115</b>
8.1 - 1, 2, 3, 4 e chi più ne ha ne metta: ma quante locomotive sono realmente necessarie per i futuri treni previsti nel tunnel di Base del Moncenisio?.....	116
8.2 Supercondensatori: sono una soluzione?.....	126
8.3 XX miglia !! XX miglia !! .....	135
8.4 Il mito di Federici.....	141
8.5 La retorica del supertreno sulla linea storica.....	151
8.6 Su un linea di valico quale percentuale di energia possiamo sperare di recuperare, rispetto a quella spesa, in fase di frenatura elettrodinamica?.....	155
<b>PARTE NONA: ALLEGATI.....</b>	<b>162</b>
9.1 Allegati.....	163
<b>PARTE DECIMA: CARTINE.....</b>	<b>165</b>
10.1 Tratta di Valico del Frejus.....	166
10.2 Tunnel di Base del Moncenisio.....	166
10.3 Treni tipici sulla tratta di Valico del Frejus.....	167
<b>SOMMARIO .....</b>	<b>169</b>

## Precisazione

Il presente studio è a **carattere personale**. Tutte le foto e informazioni contenute o utilizzate per l'analisi sono **pubbliche**, tratte da libri, riviste, articoli informatici o quant'altro del settore ferroviario.

-----

**E-Mail:** [ntl2030@libero.it](mailto:ntl2030@libero.it)