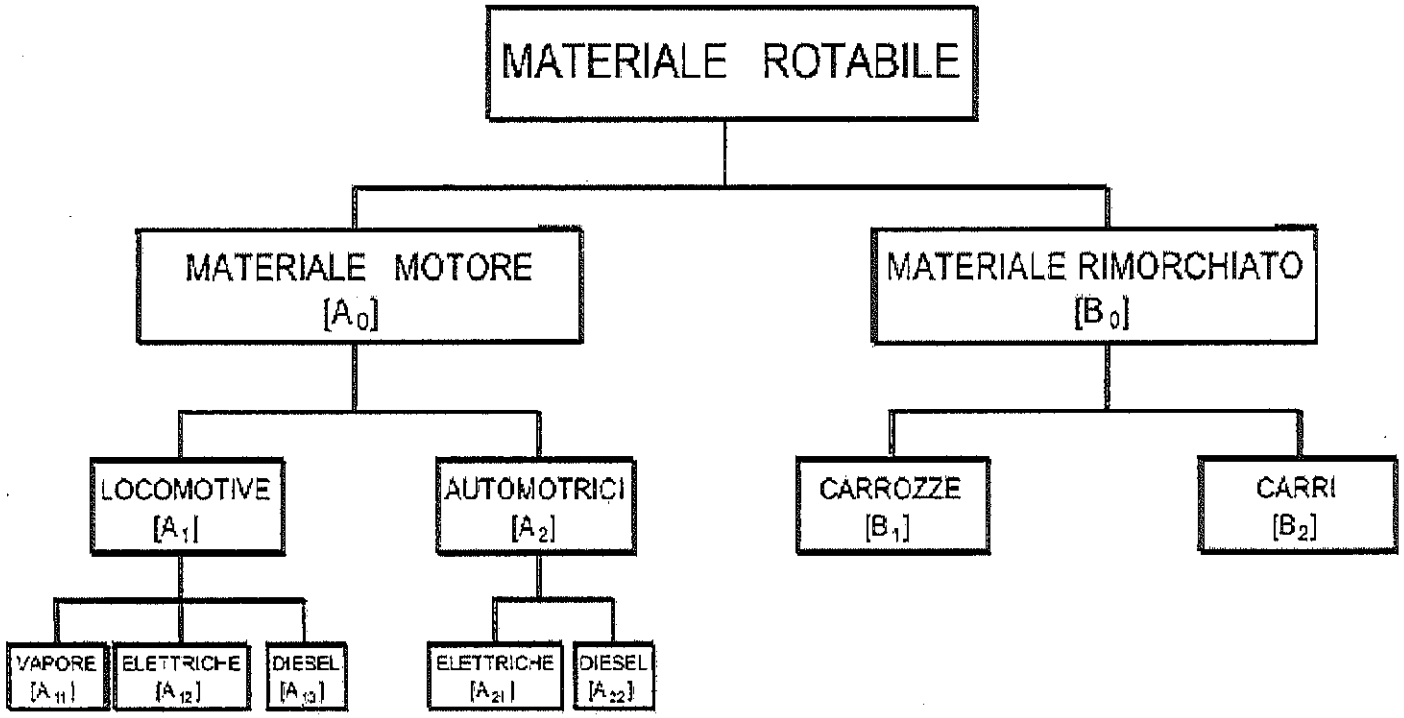
"Veicoli Elettrici per Trazione Ferroviaria"

La dizione "**Materiale Rotabile**" indica, in modo generico, i veicoli in dotazione ad una azienda di trasporto terrestre mediante i quali viene svolto un determinato servizio.



Si farà riferimento a veicoli equipaggiati con motore elettrico in corrente continua eccitazione serie e con motore asincrono trifase in corrente alternata.
I motori sono alimentati a distanza tramite linea di contatto o da generatori elettrici in c.c. o c.a installati a bordo dei veicoli

Un rotabile è costituito nella generalità dei casi da sette masse, una cassa, due carrelli e quattro assili .
Ciascuna massa è accoppiata alle altre tramite adeguate "sospensioni" con idonei smorzamenti, gli assili, tramite la "sospensione primaria" sono collegati con il telaio carrello, e quest'ultimo tramite la "sospensione secondaria" alla cassa.
Gli assili a loro volta poggiano con le ruote sulla linea ferrata che presenta determinate rigidezze e smorzamenti.
Nella cassa del veicolo tutti questi componenti reagiscono dinamicamente in funzione della velocità, delle discontinuità della linea e delle eccitazioni imposte dai "moti propri" degli assili (serpeggio).
Al fine di definire teoricamente la dinamica di ogni veicolo ferroviario è necessario costruire un opportuno modello matematico per cui bisogna conoscere il peso del veicolo nelle varie condizioni di carico e i pesi dei singoli macro componenti come la cassa, i carrelli e gli assili, oltrechè i loro momenti d'inerzia al rollio, beccheggio e serpeggio attorno al proprio baricentro, nonchè le rigidezze e gli smorzamenti verticali, laterali ed eventualmente longitudinali delle sospensioni secondarie e primarie e l'ubicazione geometrica di ogni singolo componente.
Noti questi parametri è in generale possibile definire la dinamica del veicolo scrivendo 34 equazioni differenziali del secondo ordine, che evidenziano le traslazioni e rotazioni di ciascuna massa in modo assoluto e rispetto alle altre.

Nel caso si consideri la deformabilità della linea ferroviaria, le equazioni differenziali per esempio diventano 42, il modello ulteriormente si complica quando si consideri anche la deformabilità della struttura del veicolo. Rinviamo ai testi e a articoli specializzati di dinamica ferroviaria la trattazione di questi temi; per una introduzione alla materia si veda il volume [La Dinamica del Veicolo Ferroviario] in bibliografia.

MATERIALE ROTABILE

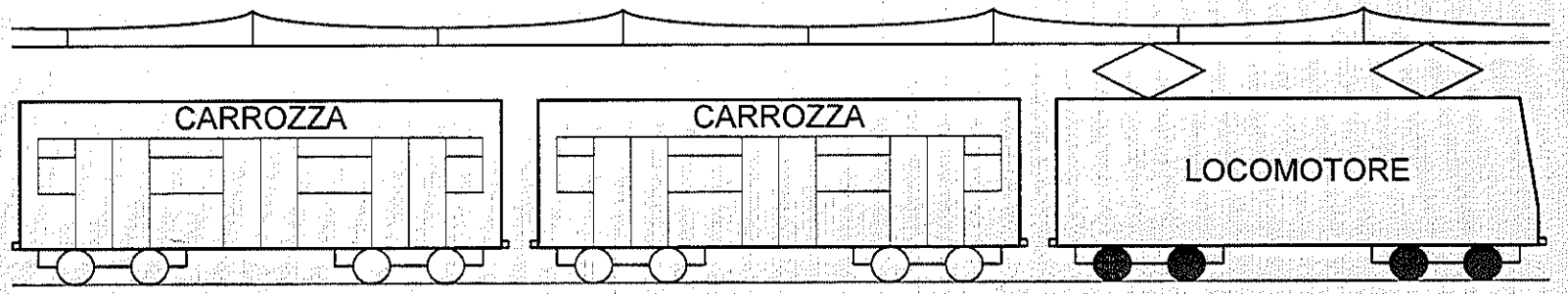
I rotabili muniti di motore elettrico si classificano in:

- Locomotori.
- Elettromotrici.
- Elettrotreni.

Locomotori

La locomotiva o locomotore è la parte del rotabile atta a conferire il movimento al convoglio ferroviario. Il locomotore é dotato solo della apparecchiature di trazione.

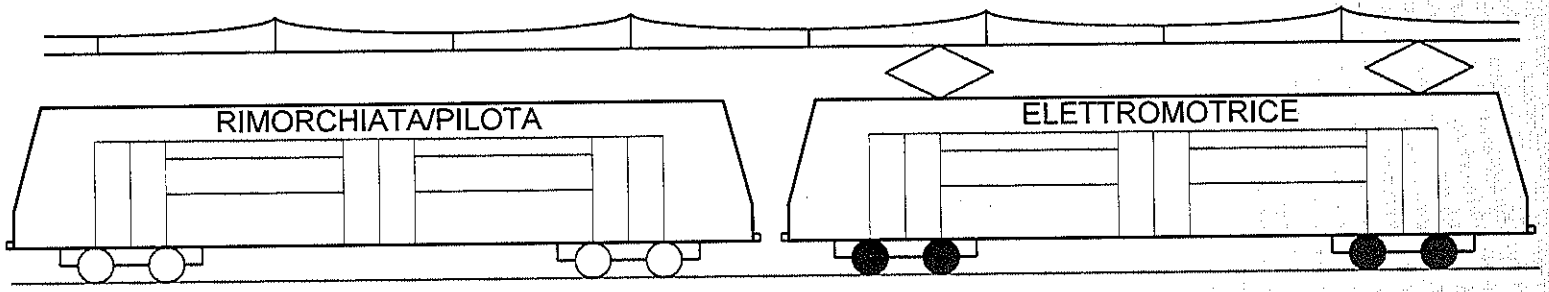
Le parti principali sono: il pantografo, i sistemi di regolazione e controllo di potenza e velocità, i motori, i sistemi elettrici come il raffreddamento dei motori, il pompaggio dell'aria compressa per i freni



MATERIALE ROTABILE

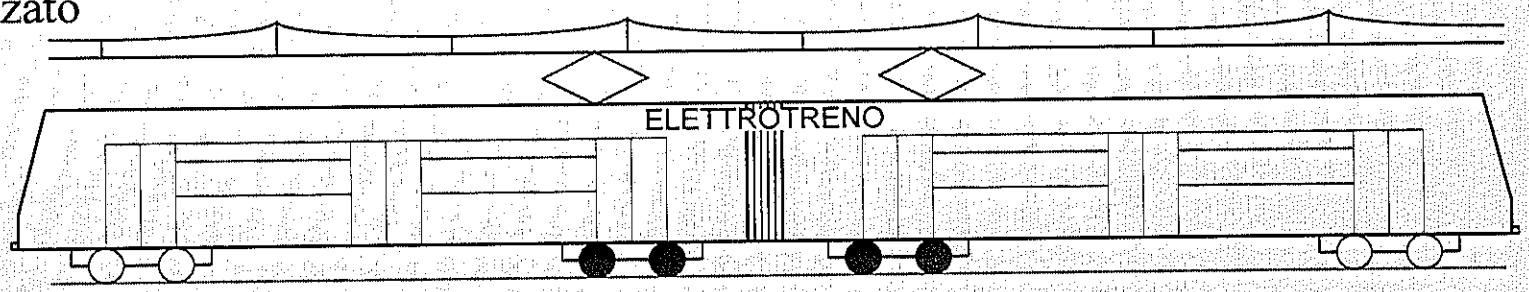
elettromotrice

Con elettromotrice si identifica un rotabile in grado di muoversi autonomamente, in quanto dotato di motori e adibito, al contempo, al trasporto di persone, presentando così l'aspetto esteriore di una carrozza ferroviaria



elettrotreno

L'elettrotreno è un rotabile a composizione bloccata con carrozze motrici e rimorchiate, senza locomotore. Si tratta di convogli "a potenza distribuita" dove ogni rotabile può essere è motorizzato, in contrapposizione ai convogli "a potenza concentrata" dove il solo locomotore è motorizzato



MATERIALE ROTABILE ELETTRICO

Linea di contatto: è composta da cavi conduttori in tensione su cui striscia il pantografo del materiale rotabile per captare la corrente necessaria alla sua alimentazione.

Alimentazione a bordo: Generatori in c.c. oppure in c.a.

Cassa: é l'involucro esterno del rotabile, atto a contenere persone e cose

Telaio: costituisce l'ossatura del rotabile ed è concettualmente costituito da due longheroni collegati da traverse

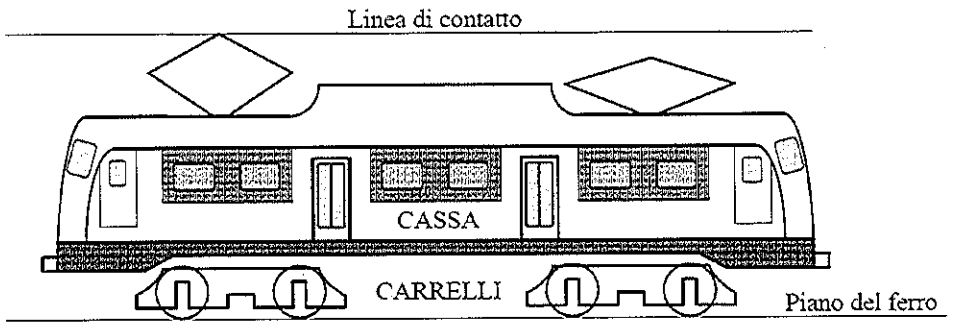
Rodiggio: è il complesso delle sale montate (insieme delle due ruote con relativo asse) e delle boccole (insieme atto a garantire l'appoggio e la sospensione sulle citate sale della parte sovrastante) con i relativi accessori

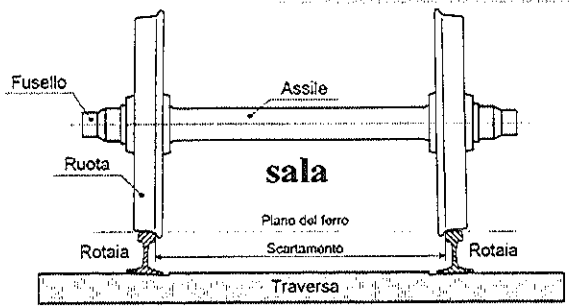
Le sale: possono essere portanti o motrici. Le sale motrici sono montate su locomotive/automotrici/elettrotreni, collegate ai motori e destinate a ricevere lo sforzo di trazione. Le sale portanti sono destinate al sostegno e alla guida del rotabile, hanno inoltre(come quelle motrici) capacità frenante

Sospensioni

- **Primaria** collegala meccanicamente la sala al carrello
- **Secondaria** rappresenta il collegamento tra il carrello e la cassa

ELETTROMOTRICE

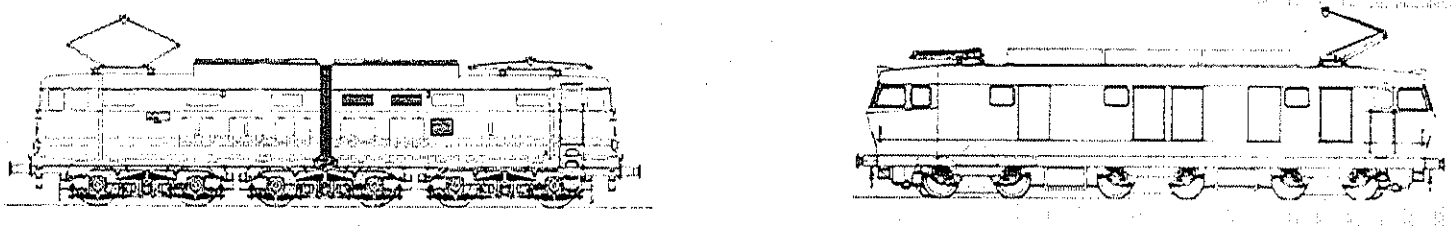




I veicoli dotati di motore elettrico possono essere alimentati tramite linea di contatto o da generatori installati a bordo del veicolo.
I generatori possono essere in c.c. o in c.a.

Locomotiva elettrica

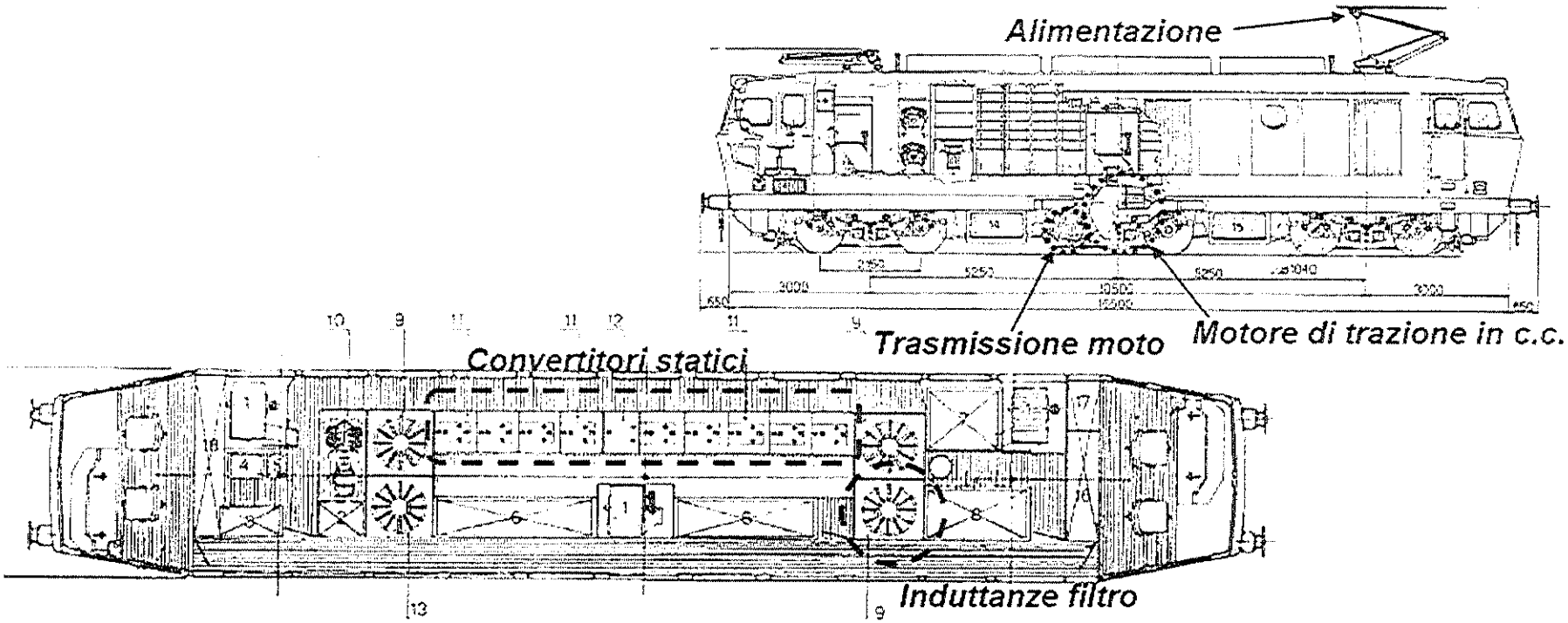
La locomotiva elettrica nel linguaggio tecnico e spesso anche nella letteratura specialistica è denominata *locomotore*; essa converte energia elettrica, prelevata da rete fissa, in energia meccanica. Questa tipologia di locomotiva comparve nell'esercizio ferroviario italiano per la prima volta nella Ferrovia Alta Valtellina (F.A.V.), in occasione dell'elettrificazione realizzata nel 1902 con tensione alternata trifase. Tale sistema di elettrificazione, esteso successivamente alle linee liguri piemontesi ed alla linea del Brennero, non ebbe però diffusione su scala nazionale poiché a partire dalla seconda metà degli anni '20, ricorrendo all'impiego dei raddrizzatori, si preferì la tensione continua a *3 kV* dato che essa consentiva di estendere al trasporto ferroviario i pregi del motore a corrente continua con eccitazione serie, già sperimentati nel trasporto urbano.



Locomotive elettriche (3 kV)

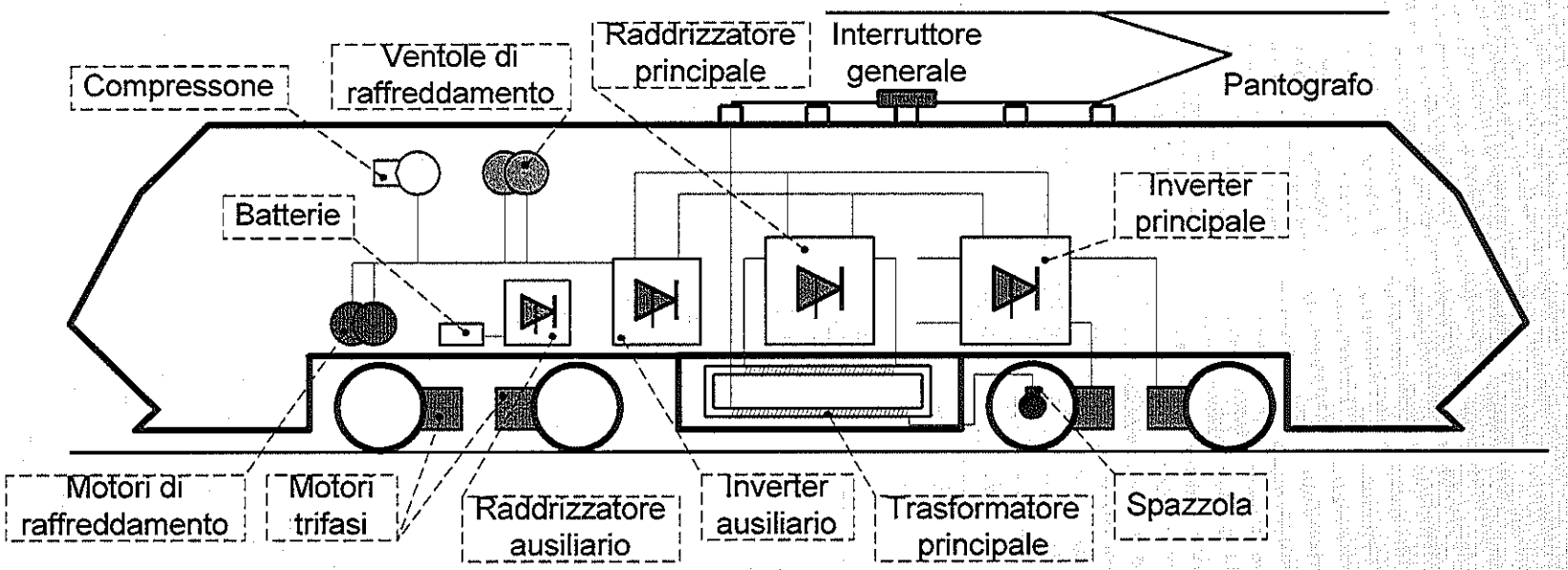
Perciò, a partire dalla suddetta epoca non furono costruiti ulteriori locomotori trifase rimanendo in esercizio quelli già esistenti, ancora per alcuni anni sulle linee liguri-piemontesi e altoatesine, mentre l'interesse delle FS e dell'industria fu rivolto esclusivamente allo studio e alla produzione di locomotori in corrente continua.

Esempio: locomotore elettrico in c.c.



1 Motoventilatori M.T. - 2 Armadio apparecch. pneumatica. - 3 Armadio interruttori automatici M.T. - 4 Trasformatore carica batterie e contattori. - 5 Ponte carica batterie e chopper campi, resistenze. - 6 Cassone A.T. - 7 Pulsore e F.A.T. 2. - 8 F.A.T. 1, telaio contattori e resistenze. - 9 Induttanza di livellamento. - 10 Compressori. - 11 Chopper principali. - 12 Chopper campi. - 13 Reattanza filtro rete. - 14 Condensatori filtro rete. - 15 Batterie. - 16 Armadio elettronica. - 17 Controllo G.S. - 18 Armadio vestiario, lavabo e cassa acqua.

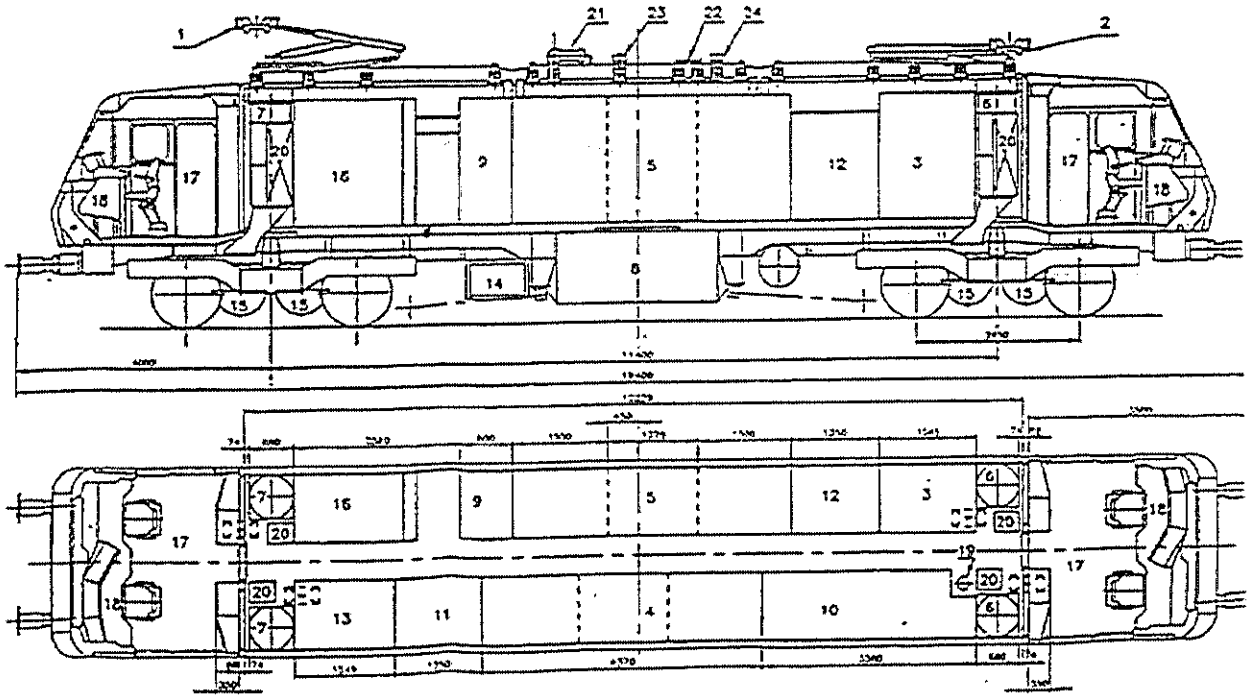
Esempio: locomotore elettrico in c.a.



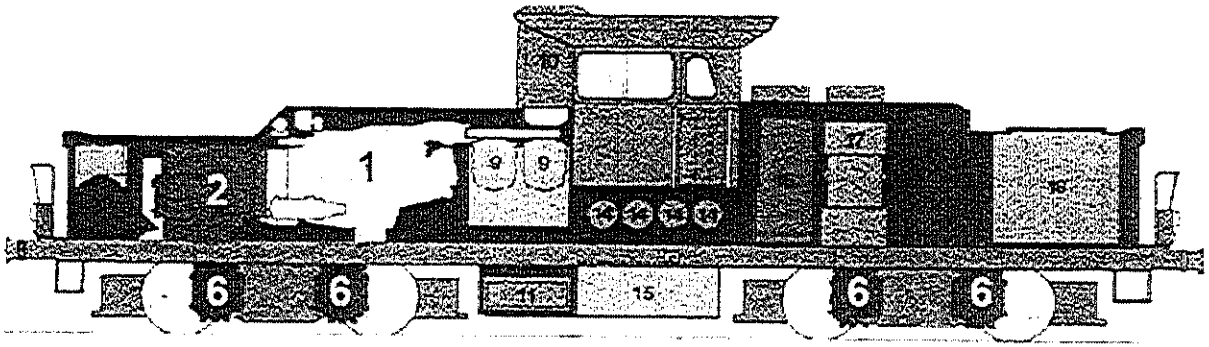
Esempio: locomotore elettrico politensione

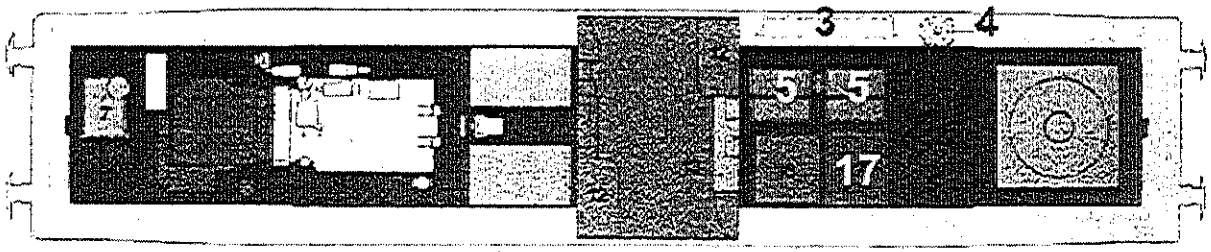
Legenda

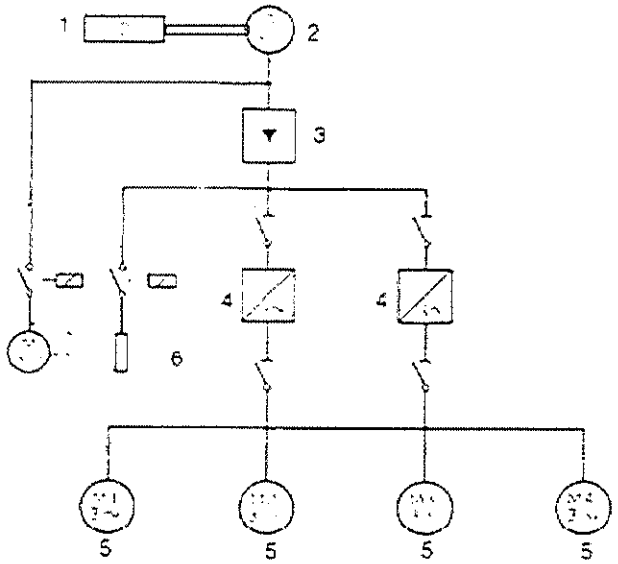
1. Pantografo 3 kV
2. Pantografo 15 kV
3. Armadio AL
4. Armadio elettronica potenza carrello 1
5. Armadio elettronica potenza carrello 2
6. Motoventilatori motori carrello 1
7. Motoventilatori motori carrello 2
8. Trasformatore
9. Reostato di frenatura
10. Armadio gruppi statici
11. Torre di raffreddamento circuito olio azionamento 1
12. Torre di raffreddamento circuito olio azionamento 2
13. Armadio elettron. di segnale
14. Cassone batterie completo di caricabatterie
15. Motori di trazione
16. Compressori e impianto pneumatico
17. Cabina di manovra
18. Banco di manovra
19. Antincendio
20. Sezionatore circuito motori di trazione
21. Interruttore 15 kV
22. Sezionatore di tetto
23. Scaricatore 3 kV
24. Scaricatore 15 kV



Esempio: locomotore diesel-elettrico







1 - Motore Diesel ⟸
2 - Alternatore di trazione ⟸
3 - Ponte raddrizzatore ⟸
4 - Induttanza di livellamento
5 - Inverter ⟸
6 - Motori di trazione ⟸
7 - Compressore
8 - Ventilatori
9 - Filtri aria Diesel

10 - Marmitta
11 - Casse batterie
12 - Banchi di manovra
13 - Armadio elettronica
14 - Serbatoi aria
15 - Serbatoi nafta
16 - Telaio apparecchi elettronici
17 - Reostato di frenatura ⟸
18 - Radiatore

1 Motore Diesel
2 Alternatore
3 Ponte raddrizzatore
4 Inverter
5 Motori di trazione
6 Reostato di frenatura

POTENZA DI UN TRENO

La potenza da fornire a un treno per il movimento è data dal prodotto dello sforzo di trazione per la velocità

$$P = F * V$$

Lo sforzo di trazione è fornito dai motori e deve vincere le forze di:

Accelerazione

- Forze di inerzia
- Attriti meccanici interni
- Attrito ruota/rotaia
- resistenze addizionali
- Resistenze aerodinamiche

Regime

- Resistenze aerodinamiche
- Attriti meccanici interni
- Attrito ruota/rotaia
- Resistenze addizionali

Forza di inerzia $F = M * A$

Massa del treno: tiene conto anche delle masse rotanti

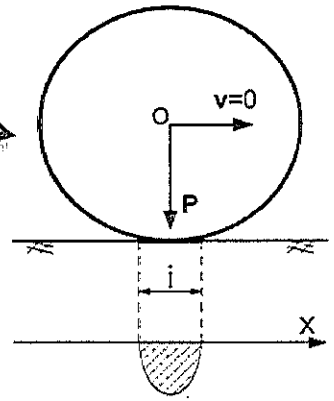
Accelerazione lineare: in genere non supera 1.1 m/s^2

POTENZA DI UN TRENO

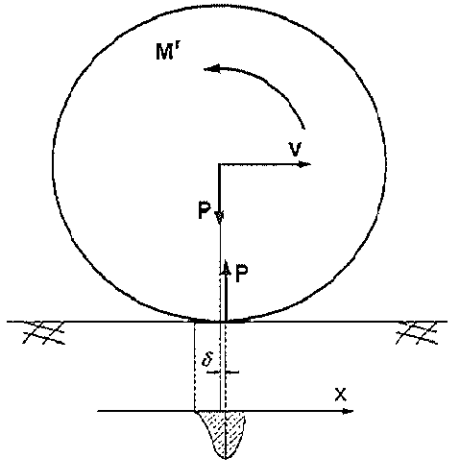
Attrito ruota/rotaia

L'interfaccia ruota rotaia nella realtà non è puntiforme, ma è una superficie con dimensioni finite.

Quando un treno è fermo, la distribuzione delle tensioni è simmetrica

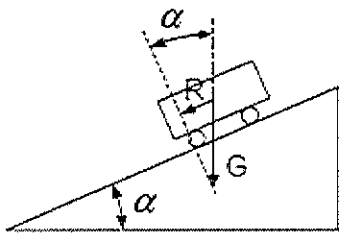


Quando il treno è in movimento, la distribuzione delle tensioni sposta il suo baricentro nel verso del moto. In tal modo si genera una coppia resistente che si oppone al moto



Resistenze addizionali

- resistenze dovute alle curve
- resistenze dovute al serpeggiamento del treno sul binario



- resistenze causate dall'inclinazione del percorso

$$R = G * \sin(\alpha) \approx G * \tan(\alpha) = G * i$$

con i pendenza

POTENZA DI UN TRENO

Resistenze aerodinamiche

Variano col quadrato della velocità $F \propto V^2 \Longrightarrow P \propto V^3$

Al crescere della velocità diventano prevalenti su tutte le altre resistenze

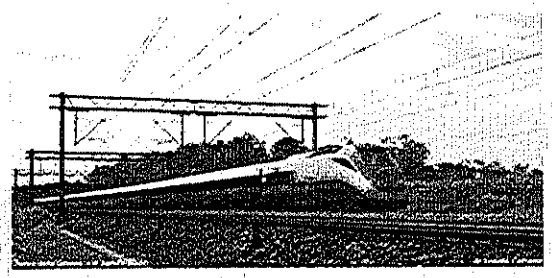
Esempio: la potenza richiesta per far avanzare a velocità costante un treno a bassa velocità (≈140 km/h) è circa 10 volte inferiore rispetto a quella per un treno ad alta velocità (≈300 km/h)

Attriti meccanici interni

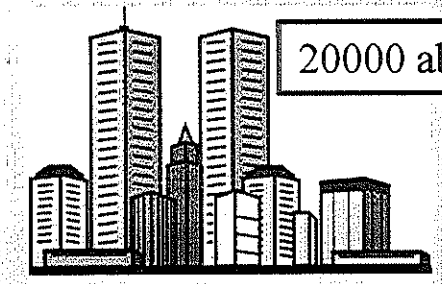
Attriti meccanici che si realizzano tra gli organi di trasmissione del moto; sono generalmente inferiori come intensità

Alla potenza per la trazione si deve aggiungere quella per i servizi ausiliari di bordo (aria condizionata, illuminazione,etc), che può incidere per il 10-20% sul totale

Un ETR500 a 300 km/h assorbe circa 6 MW di potenza dalla rete elettrica



Stesso assorbimento elettrico



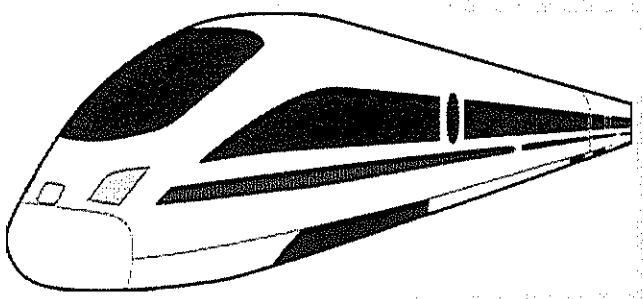
20000 abitanti

ENERGIA DI UN TRENO

L'energia cinetica posseduta dal treno dipende dalla sua velocità

$$E = E_r + E_t = \frac{1}{2} I\omega^2 + \frac{1}{2} Mv^2$$

Energia cinetica di rotazione — Energia cinetica di traslazione



L'energia cinetica di rotazione è circa il 10% quella di traslazione

L'energia cinetica è l'energia necessaria da spendere per accelerare il treno da fermo alla velocità *v*. Durante la frenata tale energia viene restituita, ma non sempre si riesce a recuperarla. Quando ciò avviene, essa deve essere dissipata in calore dai freni (elettrici o meccanici).

Prospettive

La possibilità di recuperare l'energia cinetica restituita dal veicolo in frenata e di stoccarla in appositi accumulatori (supercap, batterie, volani…), è attualmente al centro dei piani di sviluppo di molte case costruttrici. Tale possibilità, applicata a sistemi di trasporto con elevato numero di fermate (tram-metro), si stima che possa far risparmiare anche il 20% e oltre dell'energia

PROBLEMA DELLA FRENATURA

Veicolo viaggia a 70 km/h e decelera con d= 1,2 m/s^2
(In piano e rettifilo)

In quanto tempo si arresta?

tempo = V/d =70/3,6/1,2 = 16,2 sec ; spazio = V*t = 315 m
Massa (m) = 60 t Energ = ½ *m * v^2
Energ = 0,5 * 60000 * (70/3,6) ^2 = 11,3 MJ

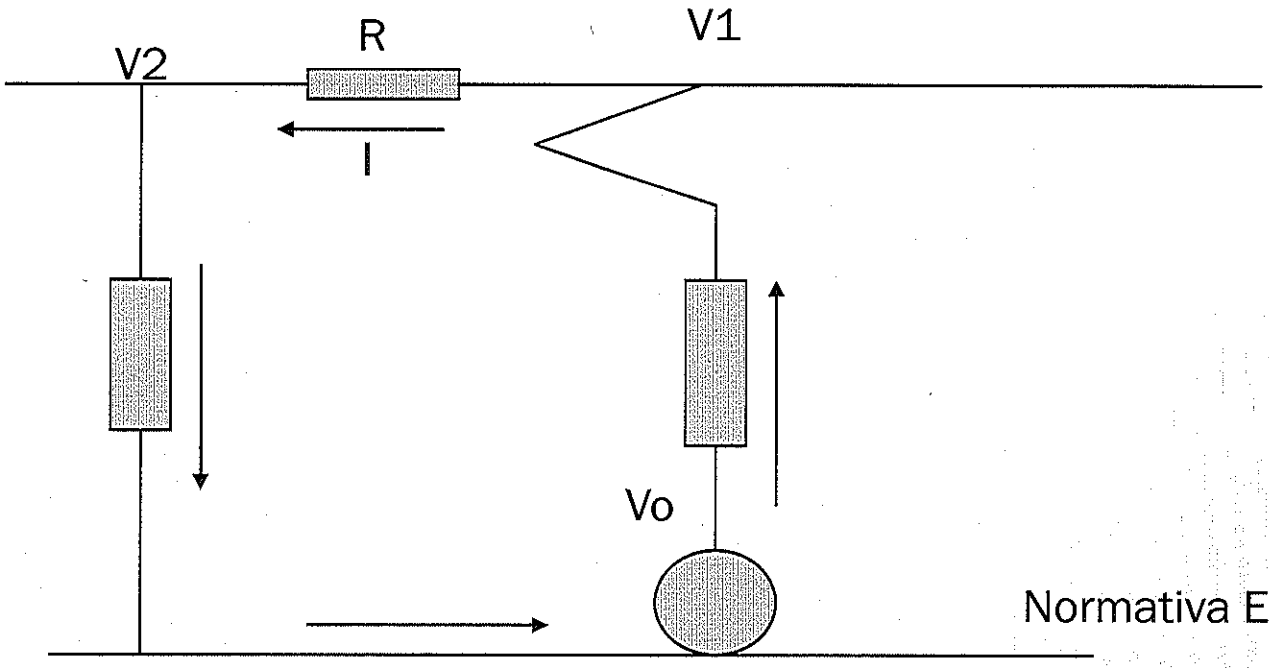
Dove finisce questa energia ?

Energia prodotta dai motori in frenatura elettrica
Energ Attrito = Fr * spazio = 2400 N *315 m = 756 J
Energia per servizi = 80 kW * (16,2 sec)= 1,3 MJ
Energia per accumulo = 700 Wh = 2, 6 MJ (se all'inizio e scarico)
Totale = 0,75+1,3+2,6 =4,65 MJ

Ed il resto di 6,7 MJ dove finisce ?

Se possibile in linea o su reostato

PROBLEMA DELLA FRENATURA



Normativa EN 50163

V1 = max V di linea consentita = 1,2 *Vnominale
V2 = min V di linea = 0, 8 Vnominale (a piena prestazione)
Vnom= 750 V

Per recuperare in frenatura 6,7 MJ in 16,2 sec occorre che si disponga di un carico di almeno 415 kW .
Se R =0,1 ohm DV = R*I = 0,1 * P/Vn = 56 V
Quindi V1 = 750 + DV/2 =778 V e V2 = 750-DV/2= 722 V

EQUAZIONE DEL MOTO

L'equazione generale che governa il moto del veicolo è: $F - R = m\dfrac{dv}{dt}$

In cui m è la massa statica del treno. Per introdurre l'effetto delle masse rotanti, si introduce il concetto di massa equivalente:

$$M_e = m(1+\beta) \qquad \beta \approx 0.1 \qquad \Longrightarrow \qquad F - R = M_e\frac{dv}{dt}$$

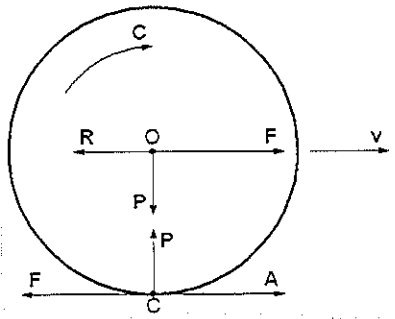
Fase di accelerazione

Affinché possa avvenire la fase di accelerazione devono verificarsi due condizioni:

$$F > R$$

$$F < A = f_a P_a \longrightarrow \text{Peso aderente}$$

Coefficiente di aderenza

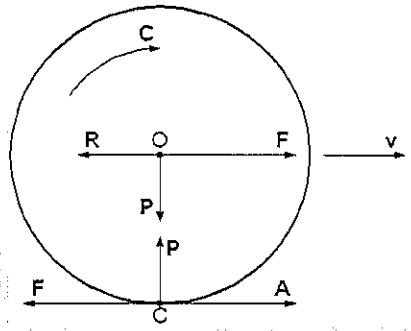


La forza di trazione non può essere maggiore dell'aderenza altrimenti la ruota striscia sul binario, allo stesso tempo deve essere maggiore della resistenza

EQUAZIONE DEL MOTO

Fase di regime

La fase di regime è a velocità costante. In questa fase le condizioni che si devono verificare sono:

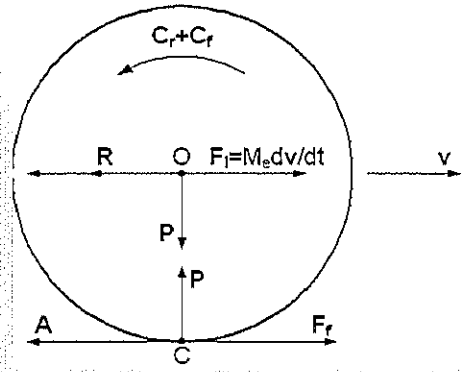


$$F = R$$
$$F < A = f_a P_a$$

La forza di trazione deve vincere esclusivamente le resistenze al moto

Fase di frenatura

Durante la fase di frenatura, la resistenza è concorde con la forza attiva F.



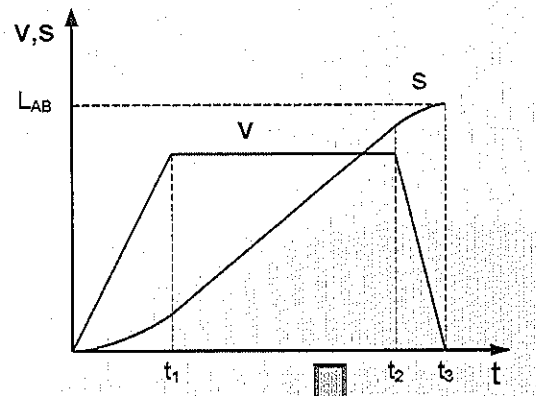
$$-F - R = M_e \frac{dv}{dt}$$
$$F < A = f_a P_a$$

In questo caso, se la forza attiva F è maggiore dell'aderenza, la ruota pattinerà.

DIAGRAMMA DEL MOTO

Per la rappresentazione del diagramma del moto generalmente si ipotizza:

- Tratto iniziale ad accelerazione costante
- Tratto di regime a velocità costante
- Frenatura ad accelerazione costante

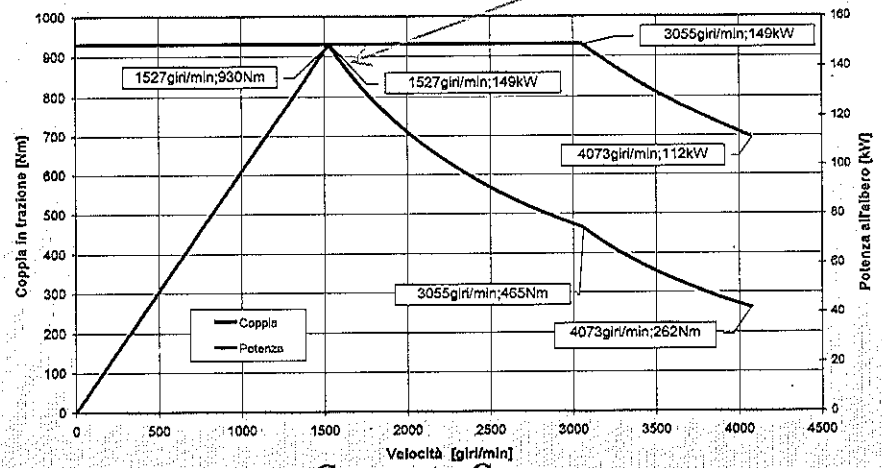


Fase di accelerazione

Nel caso reale l'accelerazione non avviene ad un valore costante, in quanto crescerebbe troppo la potenza richiesta. Valori tipici medi di accelerazione (0,8-1,1 m/s^2)

$$P = F * V$$

Quando il motore raggiunge la potenza nominale, l'accelerazione inizia a decrescere



Caso metroGenova

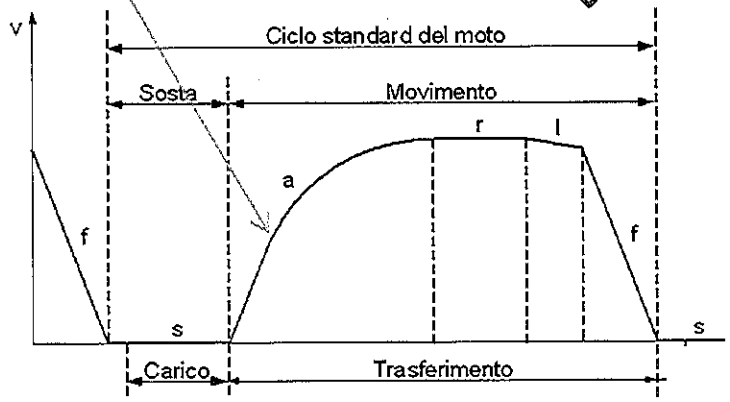


DIAGRAMMA DEL MOTO

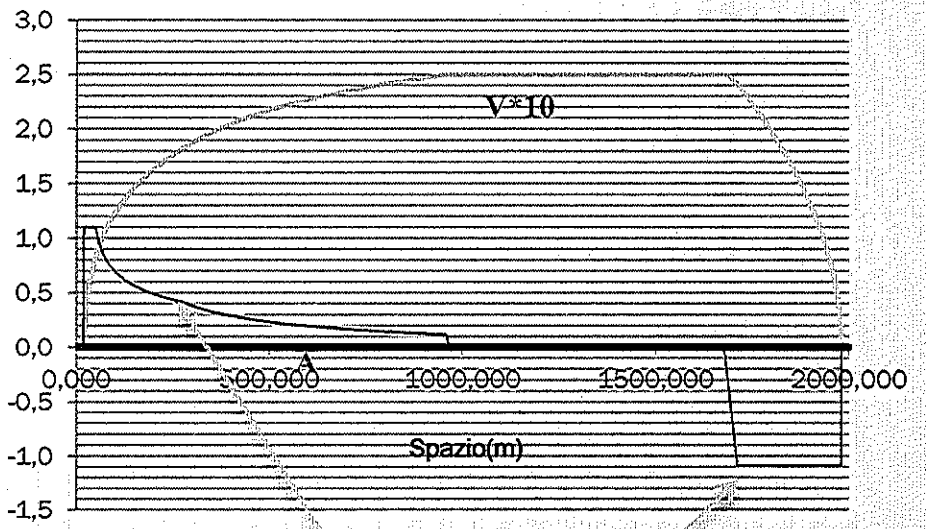
Fase di regime

Durante la fase di regime, la velocità si mantiene costante. Le resistenze da vincere variano con la velocità, ma generalmente sono inferiori rispetto alla fase di accelerazione. Solo per alta velocità (300 km/h) tali resistenze assumono lo stesso ordine di grandezza per accelerazione e regime

Fase di frenatura

La fase di frenatura avviene tipicamente con valori di decelerazione maggiori rispetto all'accelerazione (1.1-1.3 m/s^2).

L'energia del veicolo può essere dissipata in calore o recuperata, sia attraverso sistemi di accumulo o reimmettendola in linea sotto forma di corrente



La forza frenante è circa costante durante tutto il tempo di frenatura, ciò non avviene in fase di accelerazione. Questa caratteristica consente di ottenere spazi di frenatura 'abbastanza' ristretti

CARATTERISTICA MECCANICA - DEFINIZIONE

- La caratteristica meccanica è la curva F(v) che in funzione della velocità definisce lo sforzo, che in trazione o in frenatura viene erogato dal veicolo.
- Il veicolo può avere varie condizioni di funzionamento e per ciascuno di essi è possibile definire una diversa caratteristica.
- La caratteristica meccanica è definita in base alle richieste dei capitolati.
- Una volta definite tali curve, esse servono per il dimensionamento prestazionale o di punta degli apparati presenti sulla catena di trazione o frenatura.

CARATTERISTICA MECCANICA – DIMENSIONAMENTO TERMICO / DI PUNTA

- Come viene ripetuta nel tempo, ha delle grosse conseguenze sugli elementi della catena di trazione:
  - Nel caso l'applicazione della caratteristica meccanica avviene in un tempo paragonabile al minuto si dice che il dimensionamento termico va fatto su tratta. Ovvero c'è una sostanziale differenza tra caratteristiche di punta e continuative. Tipico della trazione leggera.
  - Nel caso l'applicazione della caratteristica meccanica avviene in un tempo di molti minuti, si dice che il dimensionamento termico viene fatto sulla caratteristica di punta. Tipico della trazione pesante.

CARATTERISTICA MECCANICA – TRAZIONE / FRENATURA

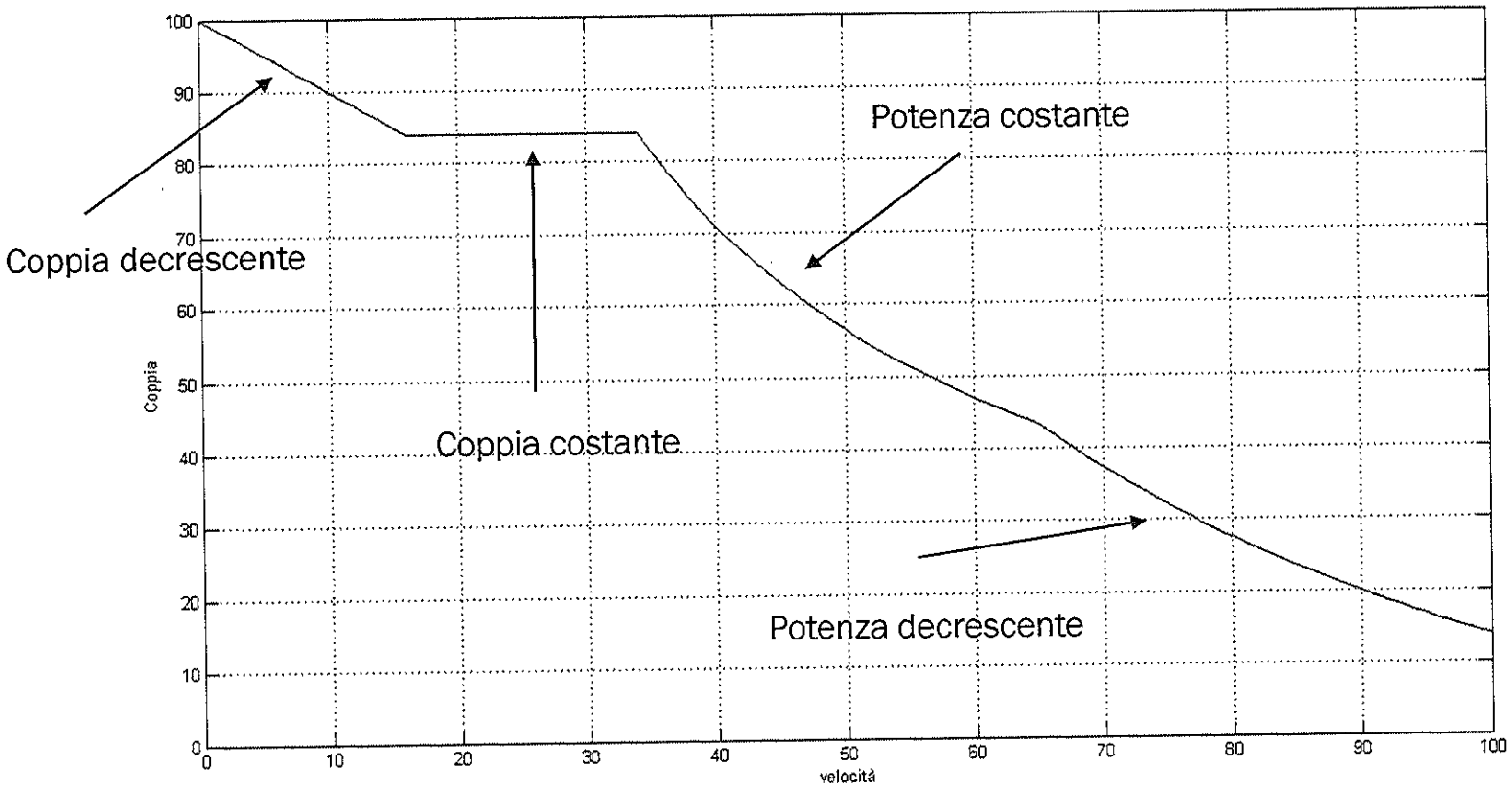
- Le caratteristiche di trazione e frenatura sono diverse:
  - In una l'energia è fornita dall'infrastruttura nel altro caso dal veicolo.
  - La trazione non è per definizione in sicurezza la frenatura si. Quindi le norme sulla trazione se ci sono meno stringenti di quelle sulla frenatura.
  - Nel caso delle locomotive esse sono il concentrato di trazione e la frenatura è solo per integrazione a quella del treno o per i rallentamenti.

I TRATTI DELLA CARATTERISTICA MECCANICA

- La caratteristica meccanica è caratterizzata da quattro tipi di tratti:
  - Coppia decrescente
  - Coppia costante
  - Potenza costante
  - Potenza decrescente

- Limitazioni
  - Aderenza (bassa velocità)
  - Potenza (alta velocità)

Caratteristica meccanica tipo



DESCRIZIONE DEI TRATTI DELLA CARATTERISTICA MECCANICA

Tipo di tratto	Coppia	Potenza
Coppia decrescente	Coppia = Cmax-k*V	Potenza=Cmax*v-k*v^2
Coppia costante	Coppia = Cmax	Potenza = Cmax*v
Potenza costante	Coppia = Pmax/v	Potenza = Pmax
Potenza decrescente	Coppia = (Pmax*vpot*vnom)/v^2	Potenza = Pmax/v

I PARAMETRI CHE DEFINISCONO LA CARATTERISTICA MECCANICA

- Il punto iniziale è da definire lo sforzo d'avviamento
- Ogni punto di spezzata è un parametro, che definisce la curva
- Normalmente per i veicoli di trazione leggera, non c'è il tratto a coppia decrescente
- In questo caso sono definite due velocità che definiscono la curve (fine avviamento, massima potenza)

Trazione elettrica vs trazione diesel

- Vantaggi trazione elettrica
  - Maggiori prestazioni di velocità e massa convogli
  - Sovraccaricabilità motori elettrici
  - Diversificazione fonti di energia
  - Riduzione emissioni
  - Riduzione rumore

- Vantaggi trazione diesel
  - Costo infrastruttura
  - Assenza impianti fissi

- Convenienza trazione elettrica all'aumentare della quantità di traffico

Tipologie di veicoli per trazione elettrica

- Trazione leggera / pesante

➢ Tram / Filobus
- Trazione leggera
- Trasporto urbano
- Media capacità di massa (migliaia passeggeri / ora)
- Sede promiscua

➢ Metropolitane (mass transit)
- Trazione leggera / pesante
- Trasporto urbano
- Alta capacità di massa (decine di migliaia passeggeri / ora)
- Sede protetta

➢ Elettrotreni
- Trazione leggera / pesante
- Trasporti suburbani / regionali / Intercity
- Monopiano / Due piani

➢ Locomotive
- Trasporto passseggeri / merci
- Lunghe distanze

➢ High speed train / Very high speed train
- Alta velocità (250 / 300 km/h)

UNI 8379 : Sistemi di trasporto su rotaia o altra guida vincolante – termini e definizioni

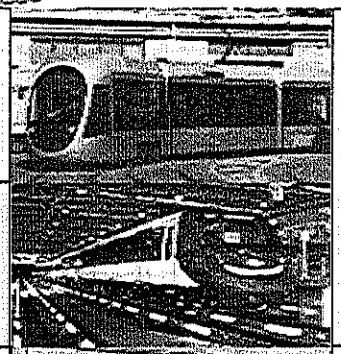
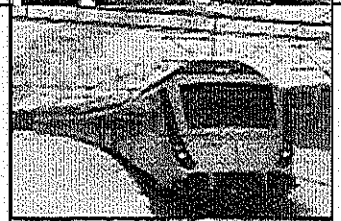
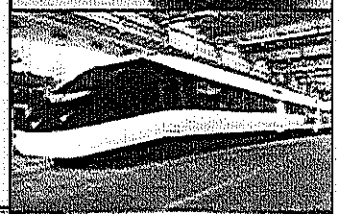
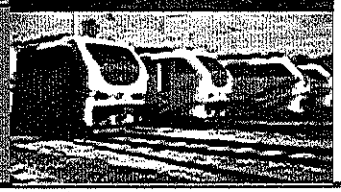
- *La ferrovia è un sistema di trasporto per persone e cose, per lunghe distanze e per elevati livelli di traffico, mediante veicoli automotori e veicoli mossi da un mezzo di trazione, circolanti su rotaia, ovvero con altra guida vincolante, in sede propria, con regime di circolazione regolata da segnali;*

- *la metropolitana è un sistema di trasporto di massa, di alta capacità e frequenza, costituito da veicoli automotori o mossi da veicoli automotori circolanti su rotaia, ovvero con altra guida vincolante o completamente svincolata da qualsiasi altro tipo di traffico, con regime di circolazione regolata da segnali;*

- *la metropolitana leggera è un sistema di trasporto di massa, che mantiene le caratteristiche della metropolitana ad eccezione della portata oraria, che è prevista minore, e dei veicoli che, qualora opportunamente attrezzati, possono essere utilizzati*

Anche i sistemi non convenzionali come tapis roulant e ascensori orizzontali, risolvono il problema della mobilità a cortissimo raggio, favorendo la capillarizzione in aree estese ma circoscritte

VEICOLI – SETTORI DI UTILIZZO

Trasporto	Settore	Prodotti		Clienti
Passeggeri	*Urbano*	Tram/Metropolitane Leggere		*Autorità Locali*
		Metropolitane		
	Regionale	Treni Elettrici/Diesel Carrozze		*Operatori pubblici nazionali e locali*
	Intercity			
		Alta Velocità		*Autorità Nazionali*
		Locomotive		*Operatori pubblici e privati, aziende di leasing*
Merci				
Service		Parti di Ricambio, Upgrading Revamping/Rehabilitation, Manutenzione		

Tensioni di linea

- Alimentazione DC
  - 600 / 750 V (Tram, Filobus [bifilare], Metro leggere)
  - 1.5 kV (Metro pesanti, Trasporti suburbani)
  - 3 kV (Trazione pesante)

- Alimentazione AC
  - 15 kV / 16.67 Hz
  - 25 kV / 50 Hz (Linee alta velocità)

- Veicoli politensione
  - -Bitensione DC (750 / 1500 V)
  - -Tritensione AC/DC (1.5-3kV DC, 25kV AC)
  - -Quadritensione (1.5-3kV DC, 15-25kV AC)
  - -Interoperabilità (compatibilità catenaria, segnalamento)

Parte meccanica - Cassa

- Materiali
  - Acciaio (locomotive, metro pesanti)
  - Alluminio (metro leggere, treni alta velocità)

- Interperno
  - Distanza tra assi verticali di rotazione di due carrelli adiacenti

- Passo
  - Distanza tra le sale di un carrello

- Lunghezza cassa
  - Metro leggera (< 13m)
  - Metro pesante (< 18 m)
  - Elettrotreni / Locomotive (20m)

- Sagoma cinematica
  - Massima dimensione laterale del veicolo (statica e dinamica)
  - Standard ferroviario/metropolitano – UIC 505-1 / UNI 7360-7361

Parte meccanica - Carrelli

- Carrello
  - Assile
  - Ruote (Cerchione, Bordino)
  - Sala montata
  - Telaio
  - Sospensioni

- Carrello motore / portante
  - Riduttore (rapporto al ponte, rendimento trasmissione)

- Impianto freno
  - Ceppi
  - Dischi
  - Pattini elettromagnetici

- Captazione
  - Collettore terza rotaia

Architettura veicoli di trazione elettrica

- Parte meccanica
  - -Cassa
  - -Carrello
  - -Telaio
  - -Cabina
  - -Impianto meccanici (porte, freni, HVAC)

- Parte elettrica
  - - Sistema di propulsione (convertitori, motori)
  - - Servizi ausiliari
  - - Sistemi di comunicazione di bordo
  - - Impianto elettrico AT / MT / BT

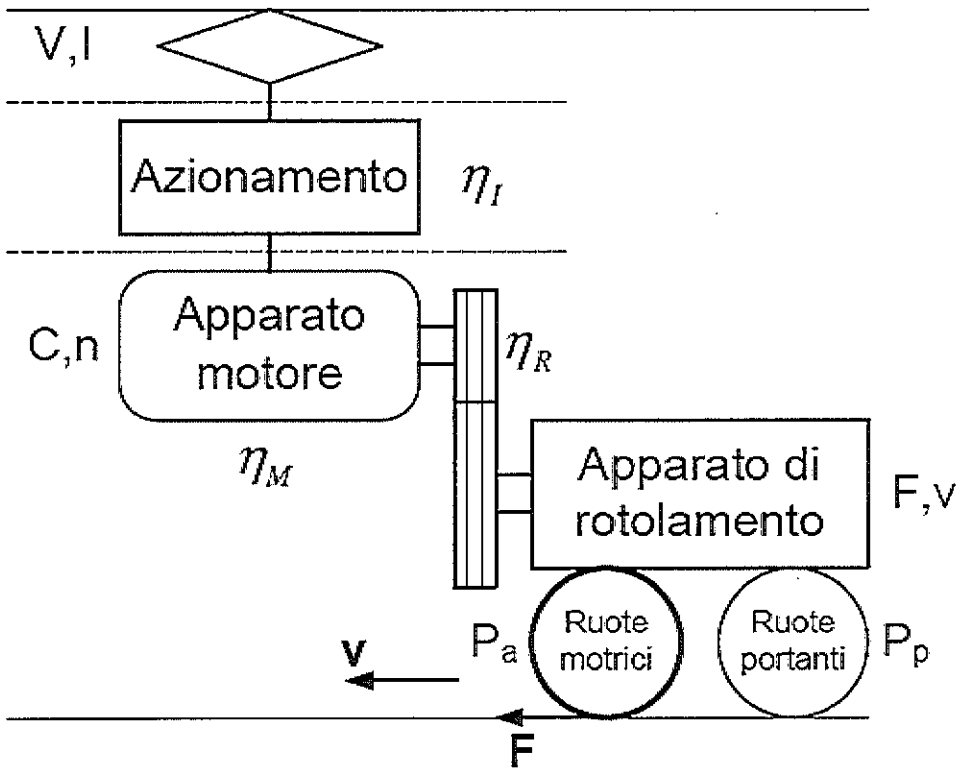
- Impianti vari
  - -Impianto pneumatico (freno, porte)
  - -Impianto idraulico acqua/olio (freno, trasformatore,propulsione)

Parte elettrica – Catena di trazione

- Propulsione
  - Captazione / Linea AT
  - Filtro di ingresso / Trasformatore
  - Convertitore di trazione (monostadio/bistadio)
  - Chopper di frenatura
  - Motori

- Ausiliari
  - Gruppi statici
  - Carichi di media tensione / Linea MT
  - Caricabatterie
  - Batterie
  - Carichi di bassa tensione / Linea BT

Catena dei rendimenti di un mezzo di trazione

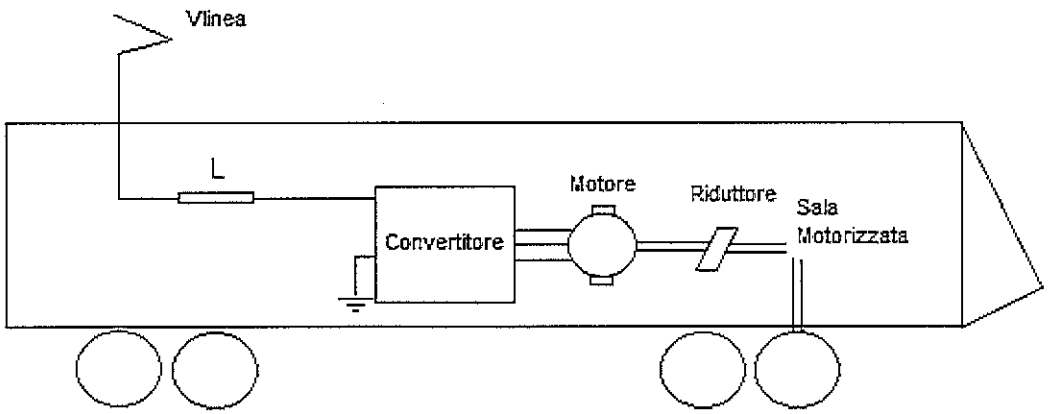


P_{IN}
Potenza di linea

P_{OUT}
Potenza alle ruote

- Forze attive / passive / di inerzia

Modello elettrico di un mezzo di trazione



P_{IN} - Elettrica
Potenza di linea
V * I

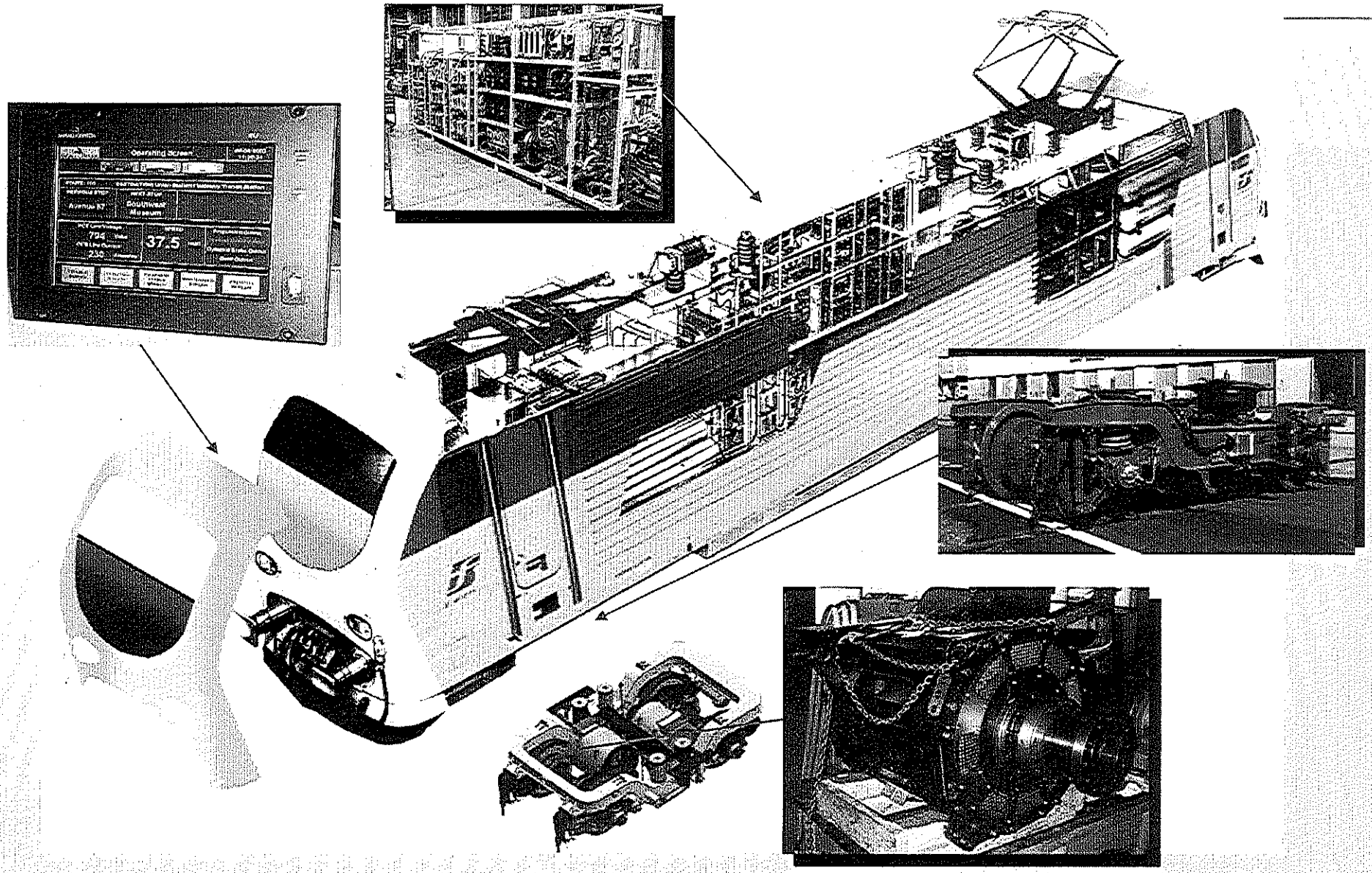
P_{OUT} - Meccanica
Potenza alle ruote
F * v

η (%)
Rendimento catena
di trazione

COMPONENTI DELLA CATENA DI PROPULSIONE

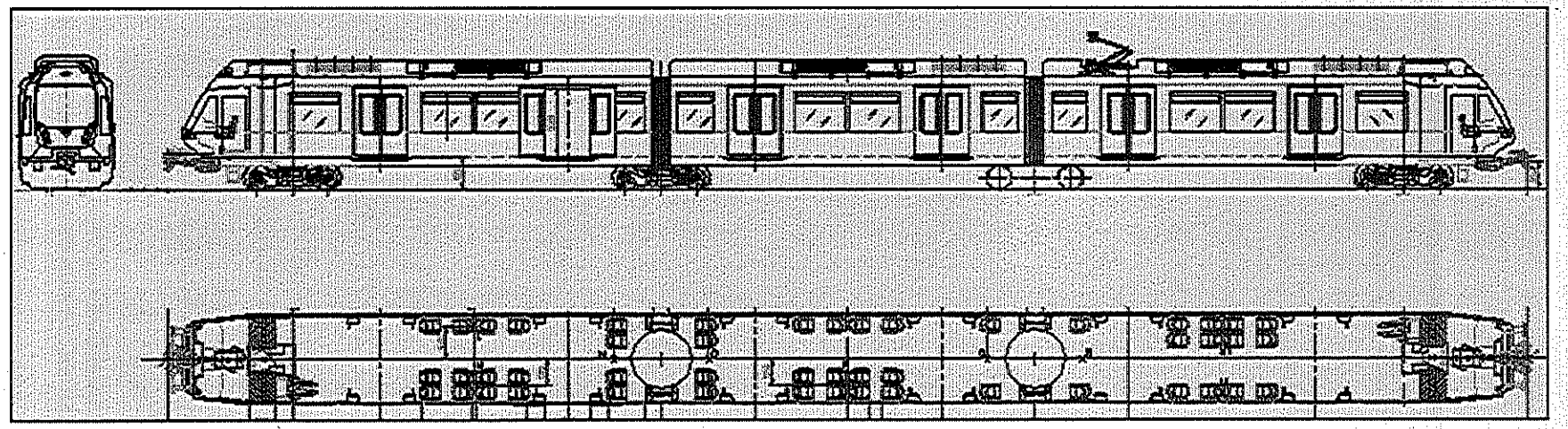
- Riduttore
  - Trasmissione moto da asse motore a ruote
- Motore di trazione
  - Asincrono / Magneti permanenti
- Azionamento di trazione
  - Inverter (monostadio)
  - Chopper / Conv. 4 quadranti (bistadio)
- Reostato di frenatura
  - Veicoli DC / Bitensione
- Induttanze
  - Filtro linea (monostadio, bistadio)
  - Filtro intermedio (bistadio)
  - Filtro risonante (veicoli linee AC)
- Trasformatore
  - Veicoli monotensioni AC / Bitensione
- Convertitori ausiliari
  - Alimentazione media tensione
  - Caricabatterie

PARTI PRINCIPALI CHE COMPONGONO UN VEICOLO ELETTRICO

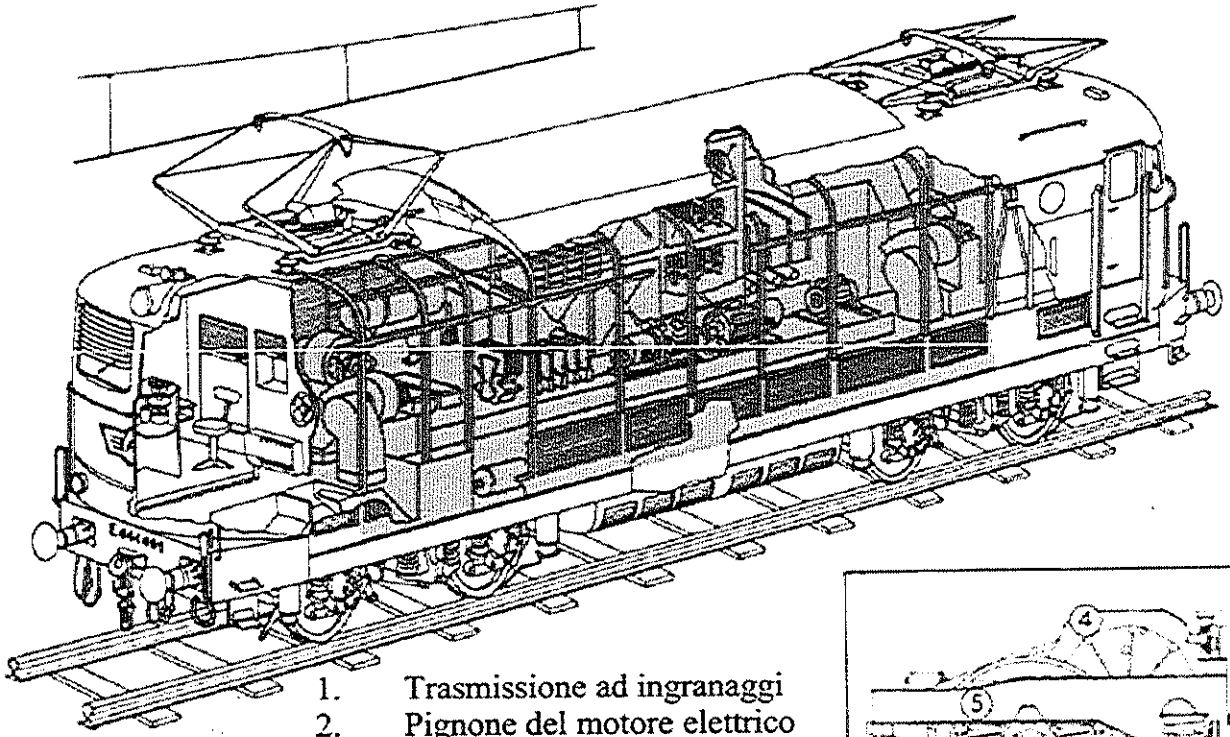


SISTEMA DI TRAZIONE

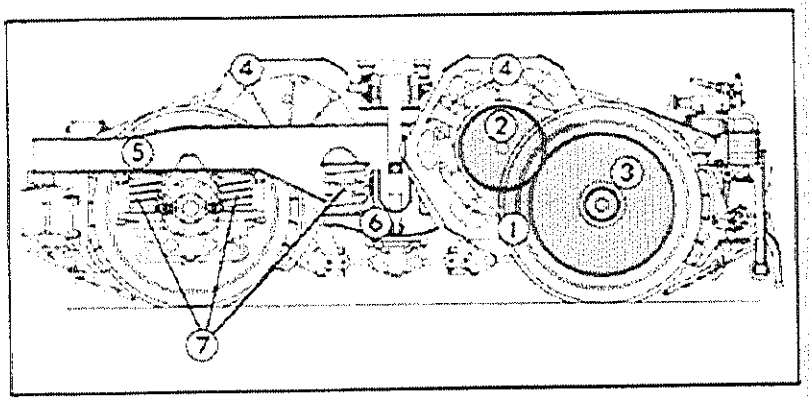
- CATENARIA
- PANTOGRAFO
- AZIONAMENTO
- MOTORE
- CARRELLO

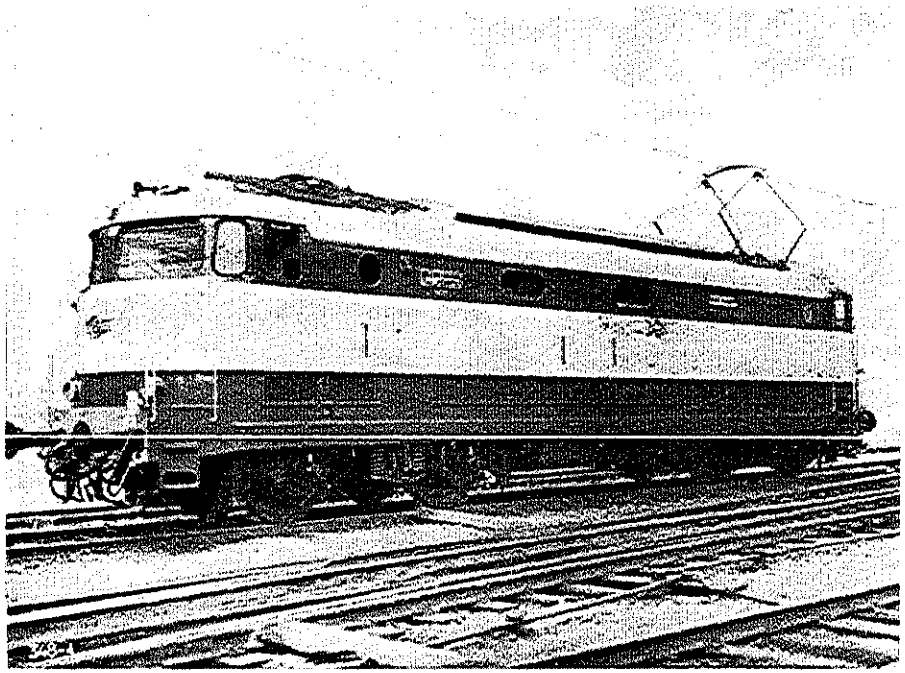


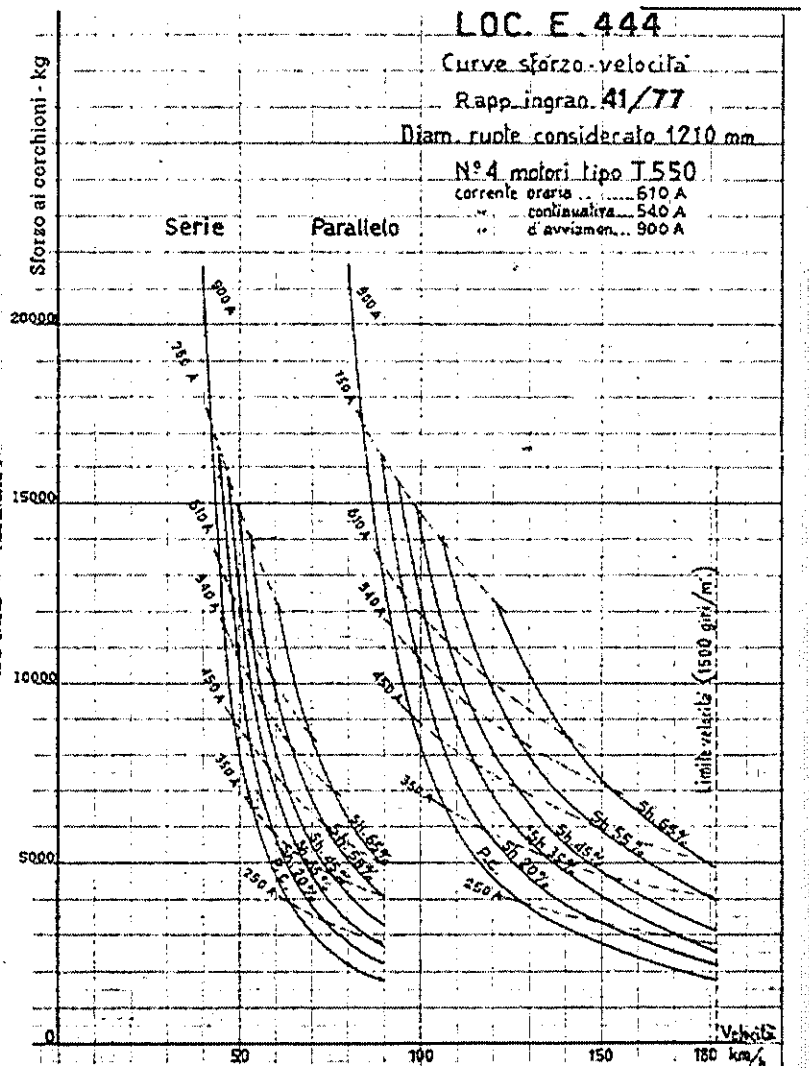
➢ Trazione elettrica



1. Trasmissione ad ingranaggi
2. Pignone del motore elettrico
3. Ruota dentata montata sulla sala motrice
4. Motori di trazione
5. Telaio del carrello
6. Sospensione
7. Molle ad elica



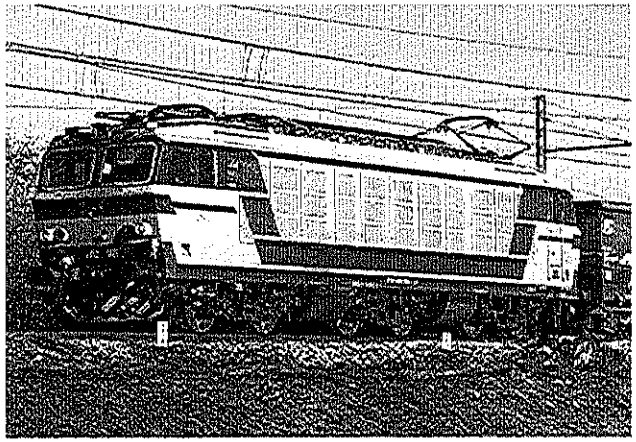


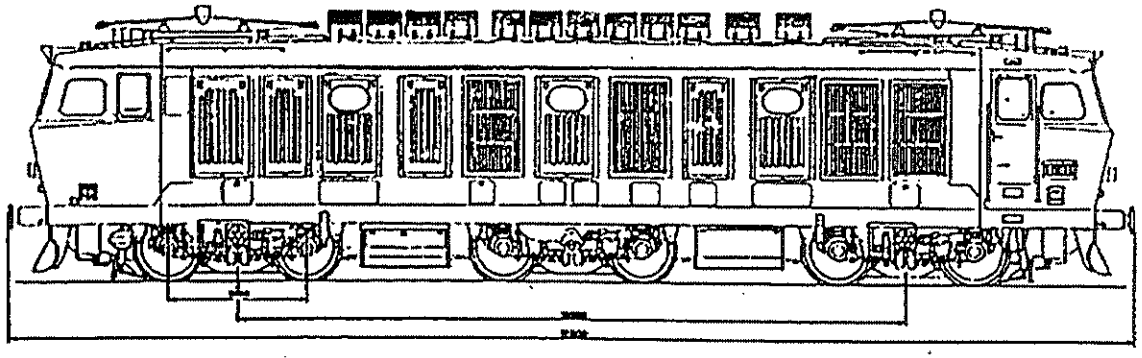


E.444 F.S.

Locomotiva alimentata a 3 kV c.c. con quattro motori a collettore eccitati in serie in fase di trazione (indipendente in frenatura) regolazione tradizionale

E.652 F.S.





CARATTERISTICHE GENERALI

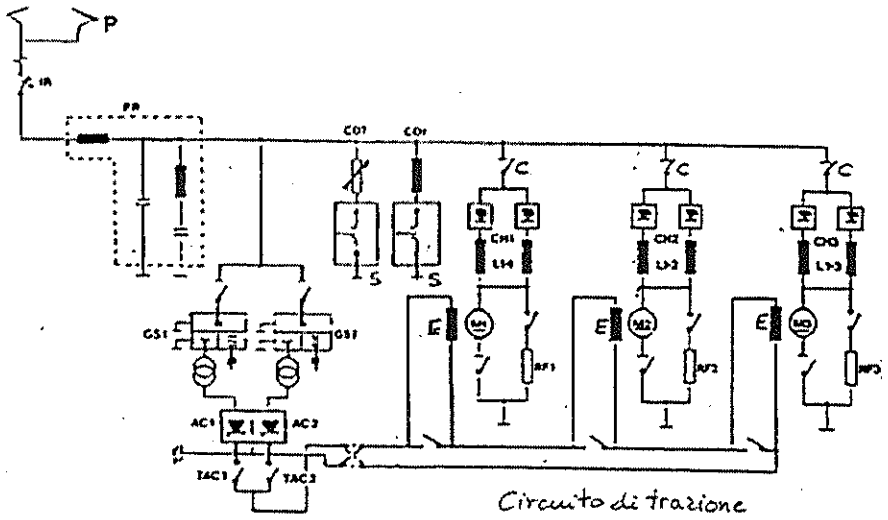
Schema del rodiggio	B-B-B	
Peso in assetto di servizio	106	t.
Peso frenato con freno pneumatico	88	t.
Potenza nominale(secondo UIC 614)	5190	Kw.
Potenza oraria	5000	Kw.
Potenza continuativa assorb. dai motori	5145	Kw.
Potenza continuativa al cerchione	4780	Kw.
sfruttabile da Km/h 98 a km/h 164		
Potenza massica	45,52	Kw/t.
Sforzo di trazione all'avviamento	273	KN.
Sforzo di trazione continuativo	178	KN.
Velocità massima	160	Km/h
Coefficiente di elasticità	1,63	
Giri massimi di funzionamento	1572	g/min'
Giri corrispondenti alla potenza oraria	951	g/min'
continuativa	990	g/min'
Peso del motore completo	5,9	t.

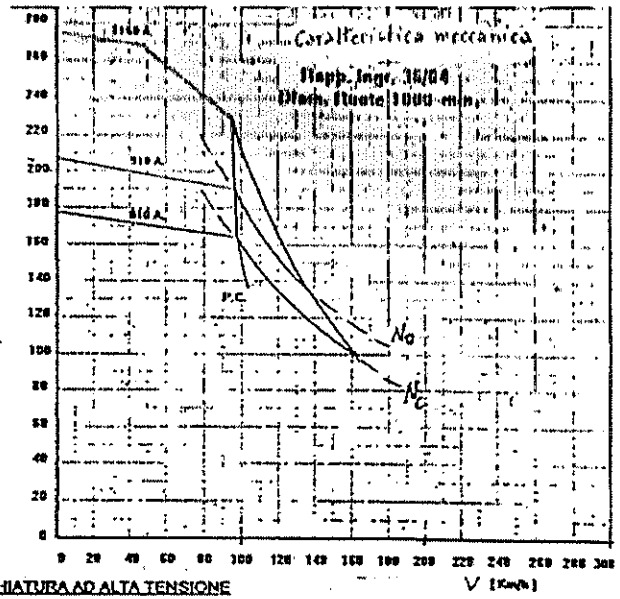
Freno automatico e moderabile ad aria compressa che agisce sui dischi e sui ceppi
Cilindri del freno:N.6 per carrello
Dispositivo lanciasabbia ad aria compressa
Dispositivo antislittante

CARATTERISTICHE MECCANICHE

Locomotiva bidirezionale con due cabine di guida.
Cassa rigida in unico telaio poggiante su tre carrelli monomotori.

Scartamento	1435	mm.
Lunghezza cassa	16500	mm.
Lunghezza fra i respingenti	17800	mm.
Larghezza cassa	3000	mm.
Altezza massima sul p.d.f.in o.d.m.	4360	mm.
Interperno tra i carrelli estremi	10500	mm.
Interperno tra i carrelli intermedi	5250	mm.
Carrello motore tipo	ZD 1040	
Passo del carrello	2150	mm.
Diametro a nuovo delle ruote	1040	mm.
Diametro a massima usura	960	mm.
Sospensione primaria	Molle ad elica	
Sospensione secondaria	Molle ad elica	
Trasmissione del movimento:	Riduttore a 5 ingranaggi albero cavo ed anello danzante interno alla sala	
Rapporto di trasmissione	36/64	
Massa del carrello	17,6	t.
Massa sospesa	90,61	t.
Massa non sospesa	15,39	t.
Massa per asse	17,66	t.
Trazione cassa-carrello	Aste di trazione	
Cedimento sospensione primaria	0,8	mm/t.
Cedimento sospensione secondaria	1,96	mm/t.





CARATTERISTICHE ELETTRICHE

La locomotiva è del tipo con azionamento a chopper per l'alimentazione in parallelo dei tre motori di trazione a tensione variabile, senza reostato ne contattori di avviamento -l'regolazione continua della velocità e frenatura elettrica.
N.1 motore ogni carrello (2 sale montate)- Totale n.3 motori

Motore di trazione : T 910 FS

Il motore è a 6 poli, con avvolgimento di compensazione della reazione d'indotto. L'eccitazione è separata ed è regolata automaticamente anche per l'indebolimento campo. (E – AC)

Potenza motore nominale	1730	Kw.
Potenza motore oraria	1925	Kw.
Potenza motore continuativa	1715	Kw.
Tensione nominale di alimentazione	2200	V.
Corrente oraria	910	A.
Corrente continuativa	810	A.
Corrente avviamento	1150	A.

TARATURA APPARECCHI DI PROTEZIONE

Relè di Temperatura RTFR	ritiro a 1900 V
Interruttore extra-rapido tipo IRA IAP 3033	3300 A.
Cortocircuitatore COI	980 A.
Cortocircuitatore COT	4,3-5,8 KV.
Relè differenziale generale RDG	450 A x spira
Relè di max corrente REC	500 A.

APPARECCHIATURA AD ALTA TENSIONE

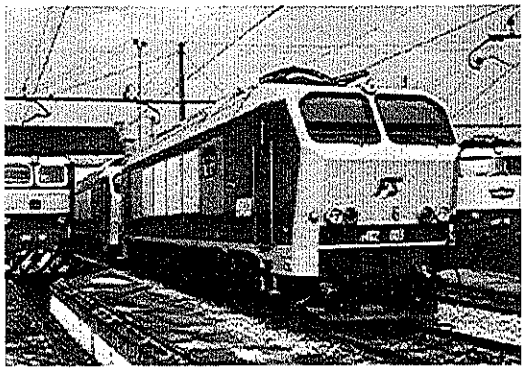
Circuito di trazione full-chopper (2200 V. max.) e del REC

N.2 Apparecchi di presa corrente a pantografo tipo 52FS (P)
N.1 Interruttore extra-rapido tipo CGE IRA IAP 3033 (IR)
N.1 Filtro rete (FR)
N.1 Relè differenziale generale
N.1 Relè di max.REC
N.2 Scaricatori ad ossido di zinco (S)
N.3 Contattori GL 800 (C)
N.1 Contattore REC/350
N.3 Gruppi di induttanza di livellamento (L)
N.2 Gruppo convertit. statico ARSA 3000 V cc/450 V c.a.-60 Hz. (GS)
N.3 Resistori di frenatura (RF)
N.3 Chopper bifase principali (CH)
N.3 Chopper ausiliari (CH)

Servizi ausiliari (450 V - 60 Hz)

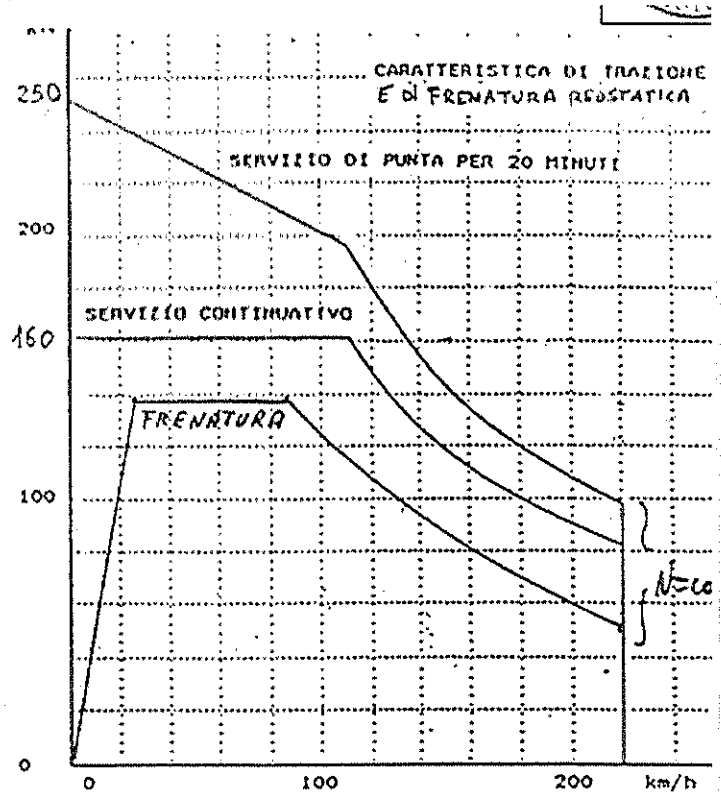
N.2 Convertit. statico ARSA ridondato a 3 Kw-3x450 v-60 Hz.
Potenza: N.2 da 120 KVA
N.3 Motoventilatori centrifughi per la ventilazione motori
N.4 Motoventilatori assiali per le apparecchiature elettroniche di potenza
N.2 Motocompressori rotativi tipo CRV 65 E 10 C - N.1 Batteria di accumulatori 24V - 350Ah

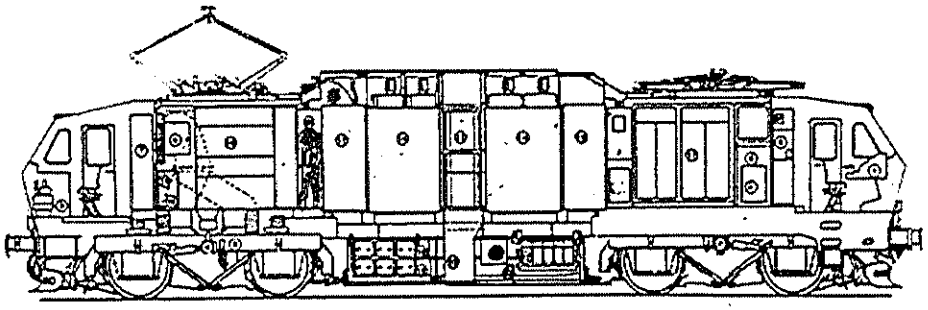
Locomotiva elettrica a 3 kV _ E 402

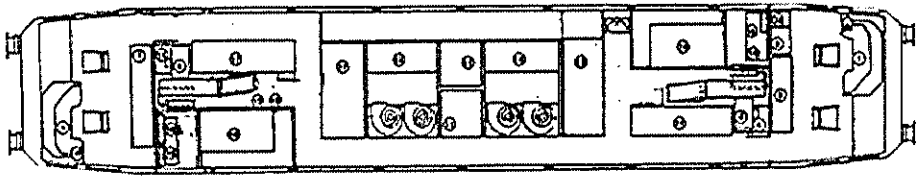


DATI CARATTERISTICI FONDAMENTALI

Scartamento	1,450 mm
Rodiggio	BoBo
Lunghezza ai respingenti	18,440 mm
Larghezza	3,000 mm
Lunghezza cassa (esclusi o respingenti)	17,200 mm
Interperno	10,400 mm
Altezza cassa dal p.d.f.	4,235 mm
Passo carrello	2,850 mm
Massa in ordine di marcia	82 t
Massa per asse	20,5 t
Tensione di alimentazione	3000 Vcc
Velocità massima	220 Km/h
Potenza continuativa	5000 kW
Potenza di punta (30')	6000 kW
Massima forza allo spunto	250 kW
Potenza di frenatura elettrica	3000 kW

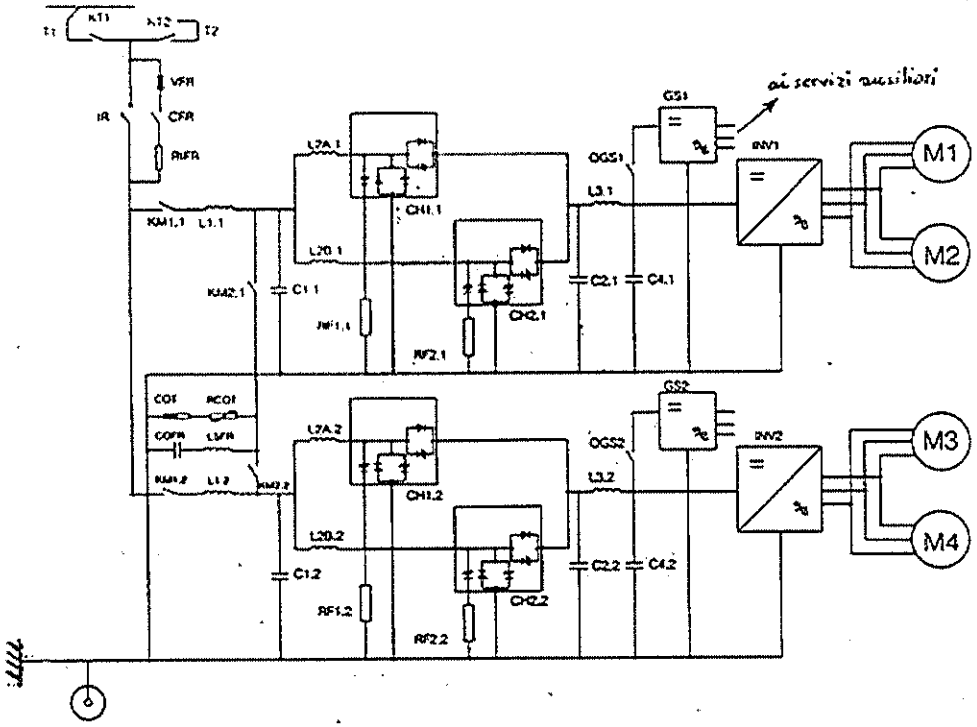






INSIEME DISPOSIZIONE APPARECCHIATURE

1 banco di manovra
2 archetto a pantografo
3 gruppo climatizzazione cabina
4 ripetizione segnali
5 motore di trazione
6 ventilatore motori traz.
7 armadio regolaz. elettron.
8 armadio M.T. - B.T.
9 centralina
11 reostato di frenatura
12 gruppo statico
13 bombole antincendio
14 convertitore di potenza
15 apparecchiat. telefono
16 induttanze
17 armadio AT
18 condensatori di filtro
19 resistenze per condensatori
21 scaricatore
22 batterie accumulatori
23 serbatoi principali
27 accoppiatori AT/BT
28 rivelatore d'armoniche



MOTORE DI TRAZIONE

Il motore MTA-F4-1250V è del tipo asincrono trifase con gabbia di scoiattolo. L'isolamento degli avvolgimenti di statore è in classe H.
Il raffreddamento è ottenuto con ventilazione forzata, con flusso assiale attraverso le regioni esterne del pacco di statore e condotti d'aria nei pacchi di statore e di rotore.
Questo tipo di motori è caratterizzato da un'induttanza di dispersione relativamente elevato che permette di avere bassi contenuti armonici sia di corrente che di coppia.

Caratteristiche fondamentali

Numero di poli	4
Tensione nominale	3200 V
Potenza continuativa	1250 kW
Potenza di punta (30')	1500 kW
Velocità massima di punta	3450 giri/' a 115 Hz'
Massa	2800 Kg

Caratteristiche fondamentali del chopper

Numero di fasi	2
Tensioni di ingresso	1200 - 4000 V
Tensione di uscita	4200 V ± 3%
Corrente di uscita max	1300 A
Potenza	3500 kW
Massima commutabile (valore di picco per fase)	850 A
Frequenza	260 HZ

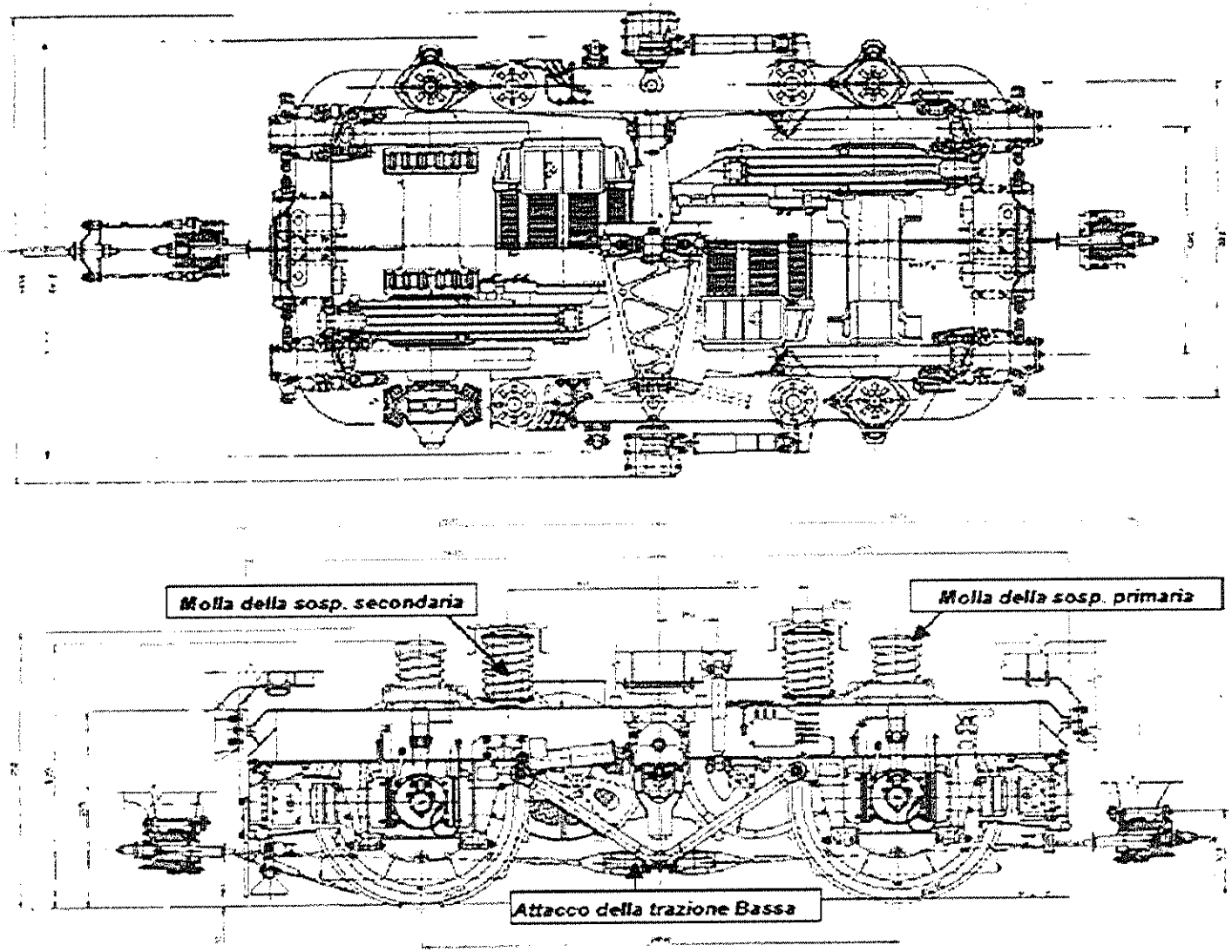
Caratteristiche fondamentali dell'inverter

Numero di fasi	3
Tensione d'ingresso	4200 V ± 3%
Tensione d'uscita	0 ± 3200 V
Massima corrente d'uscita (efficace)	1100 A
Potenza	3400 kW
Massima corrente commutabile (picco)	2300 A
Frequenza d'uscita	0,3 ± 120 HZ
Massima frequenza di commutazione	244 HZ

LOCOMOTIVA E 402

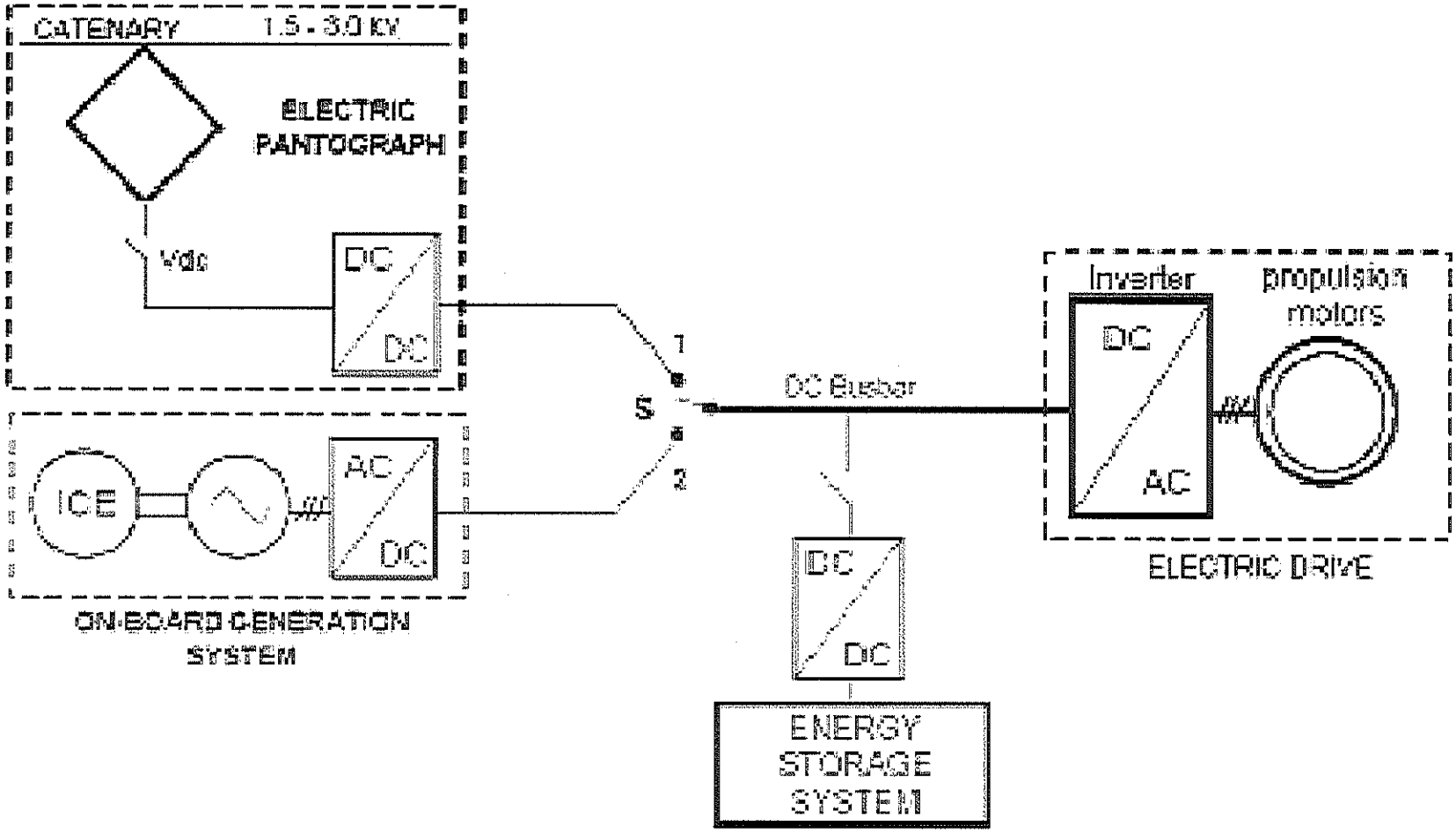
CIRCUITO DI POTENZA

L'equipaggiamento elettrico, basato sull'impiego di inverter e motori di trazione asincroni, consente alla E402 di proporsi come mezzo di trazione polifunzionale, anche se con caratteristiche particolarmente idonee per l'alta velocità, dotato di buon comportamento dinamico ed aderente, elevata elasticità di utilizzo della potenza che si pone ai massimi valori per asse oggi realizzabili.
Il sistema di trazione della E402 è impostato secondo criteri di modularità in modo da ottenere un'elevata affidabilità a livello globale di rotabile e di semplificare le operazioni di manutenzione, dal momento che ciascun modulo funzionale comprende l'intero azionamento di un carrello, compresa una sezione del filtro d'ingresso.
Il singolo azionamento del carrello comprende un convertitore bistadio (chopper elevatore e inverter a tensione impressa) che alimenta due motori di trazione asincroni collegati in parallelo, e consente la realizzazione della frenatura elettrica a recupero, pur disponendo di un reostato di frenatura da utilizzare nei casi in cui la linea non è in grado di ricevere la potenza di frenatura.
I convertitori principali, le induttanze di filtro ed i motori di trazione sono raffreddati a ventilazione forzata.
L'adozione di una configurazione bistadio con chopper elevatore e tensione intermedia stabilizzata a 4200 V ha consentito di ottimizzare il numero totale di semiconduttori e di semplificare la regolazione dell'inverter.
La scelta di una tensione intermedia elevata risulta inoltre in linea con l'evoluzione dei semiconduttori di potenza verso valori di tensioni di blocco sempre più elevate.
L'inverter ed il chopper costituiscono un unico blocco costruttivo con conseguente ottimizzazione del flusso d'aria di ventilazione. I semiconduttori sono dotati di radiatori alettati in rame e costituiscono, con i relativi snubber, unità modulatori agevolmente smontabili.
Il chopper è costituito da due fasi circuitalmente uguali che funzionano sfasate tra loro di 180° elettrici, alla frequenza costante di 260 Hz.
I choppers dei due carrelli sono a loro volta sfasati di 90° elettrici.
L'inverter è costituito da tre circuiti monofasi uguali tra loro che funzionano sfasati di 120° elettrici ed è regolato in modo da realizzare la variazione della tensione di uscita in funzione della frequenza mediante forme d'onda parzializzate che ottimizzano il contenuto armonico della tensione di motore.

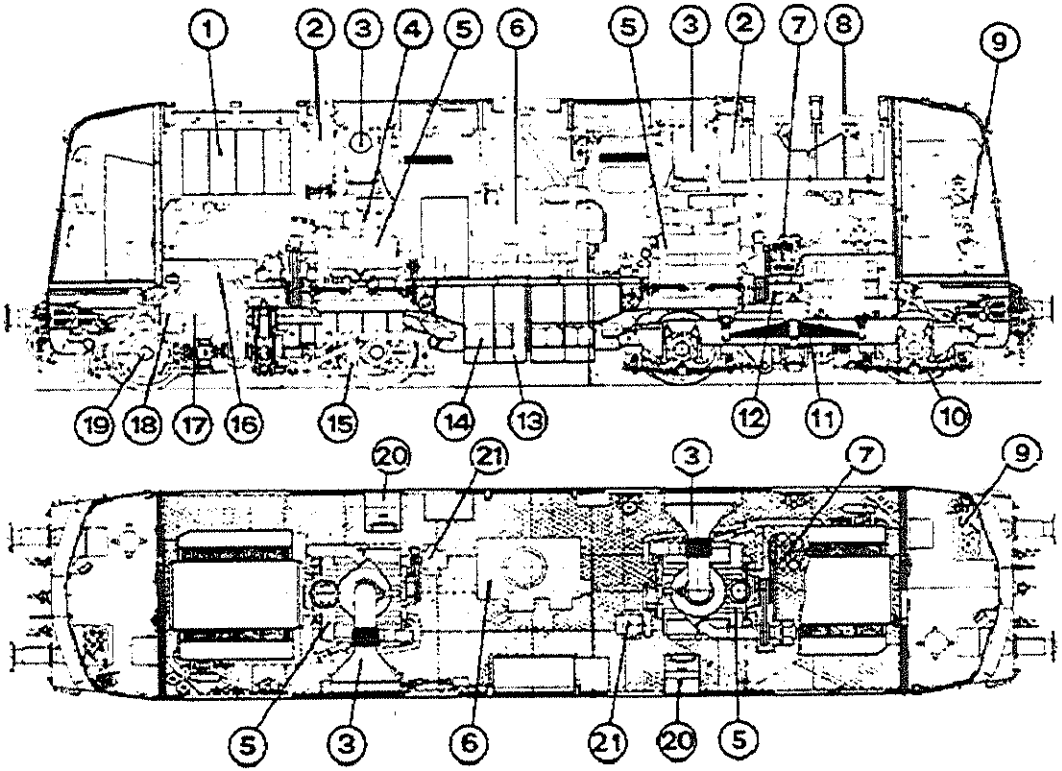


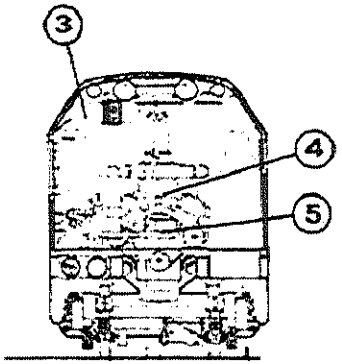
Vista in pianta e laterale del carrello della E 402B

Schema di principio di un veicolo ibrido ferroviario



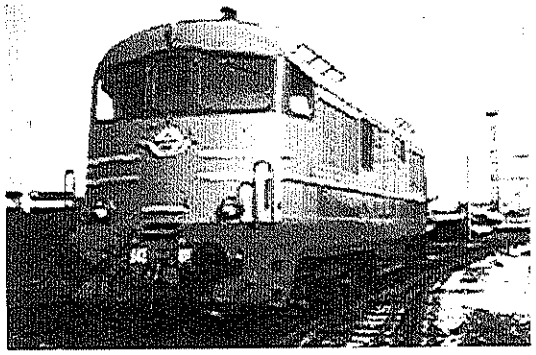
Locomotiva diesel-idraulica



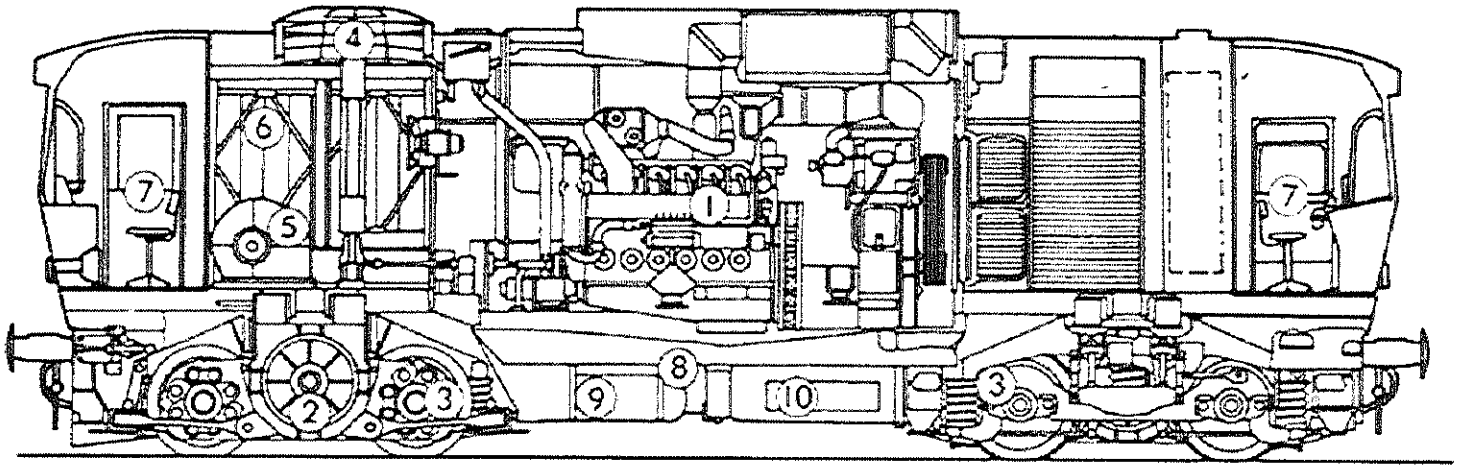


DENOMINAZIONE

1	Radiatore raffreddamento acqua
2	Tubo di scappamento
3	Condotto aspirazione aria turbosoffiante
4	Turbosoffiante sovralimentazione
5	Motore Diesel
6	Caldaia riscaldamento treno (prevista ma non adottata)
7	Compressore aria
8	Ventilatori del radiatore
9	Banco di manovra
10	Sospensione primaria del carrello
11	Sospensione secondaria del carrello
12	Albero di trasmissione motore-cambio
13	Serbatoi combustibile
14	Batteria
15	Ancoraggio del ponte al carrello
16	Scambiatore calore tra olio del cambio e acqua
17	Cambio Mekydro (parte idraulica e parte meccanica)
18	
19	Ponte riduttore
20	Ventilatori comparto motore
21	Dinamo



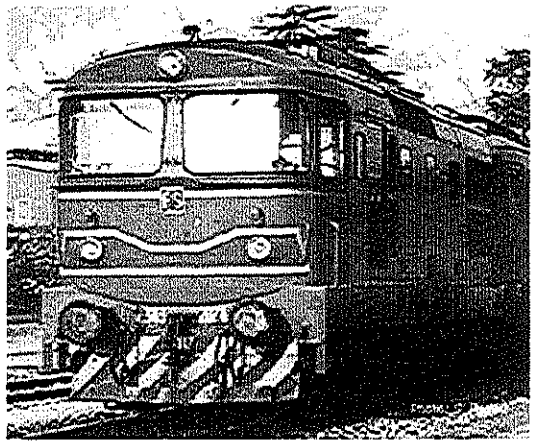
➢ Trazione termica



Locomotiva Diesel-elettrica D343

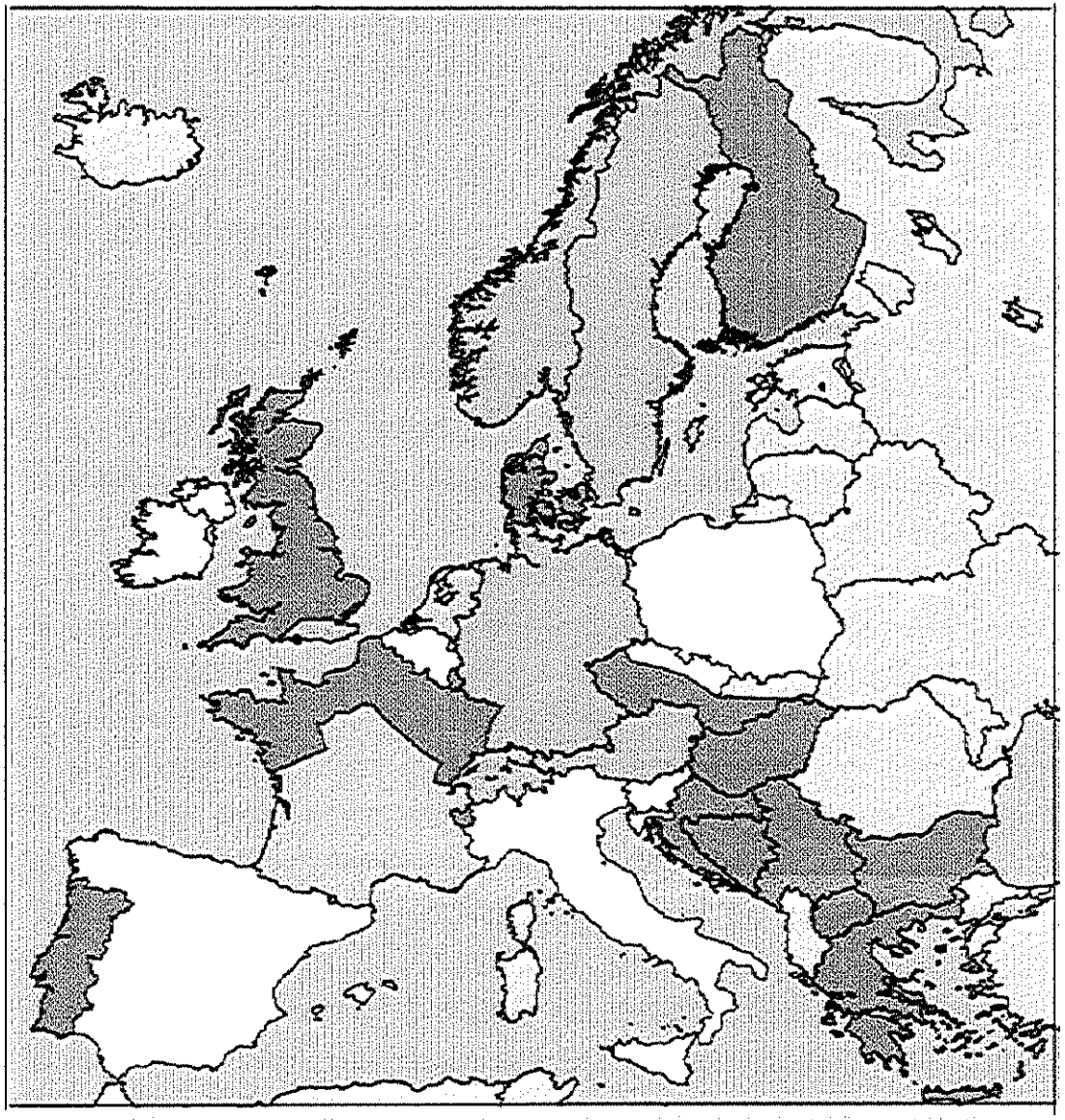
1. Motore Diesel
2. Motore elettrico
3. Gruppo di trasmissione
4. Gruppo ventilatore
5. Gruppo ventilatore motore elettrico
6. Gruppo radiatore per raffreddamento acqua motore
7. Cabina di comando
8. Serbatoi combustibile
9. Cassa batterie
10. Serbatoio aria compressa

Locomotiva diesel-elettrica



Un rotabile è costituito nella generalità dei casi da sette masse, una cassa, due carrelli e quattro assili .
Ciascuna massa è accoppiata alle altre tramite adeguate "sospensioni" con idonei smorzamenti, gli assili, tramite la "sospensione primaria" sono collegati con il telaio carrello, e quest'ultimo tramite la "sospensione secondaria" alla cassa.
Gli assili a loro volta poggiano con le ruote sulla linea ferrata che presenta determinate rigidezze e smorzamenti.
Nella cassa del veicolo tutti questi componenti reagiscono dinamicamente in funzione della velocità, delle discontinuità della linea e delle eccitazioni imposte dai "moti propri" degli assili (serpeggio).
Al fine di definire teoricamente la dinamica di ogni veicolo ferroviario è necessario costruire un opportuno modello matematico per cui bisogna conoscere il peso del veicolo nelle varie condizioni di carico e i pesi dei singoli macro componenti come la cassa, i carrelli e gli assili, oltrechè i loro momenti d'inerzia al rollio, beccheggio e serpeggio attorno al proprio baricentro, nonchè le rigidezze e gli smorzamenti verticali, laterali ed eventualmente longitudinali delle sospensioni secondarie e primarie e l'ubicazione geometrica di ogni singolo componente.
Noti questi parametri è in generale possibile definire la dinamica del veicolo scrivendo 34 equazioni differenziali del secondo ordine, che evidenziano le traslazioni e rotazioni di ciascuna massa in modo assoluto e rispetto alle altre.

Nel caso si consideri la deformabilità della linea ferroviaria, le equazioni differenziali per esempio diventano 42, il modello ulteriormente si complica quando si consideri anche la deformabilità della struttura del veicolo. Rinviamo ai testi e a articoli specializzati di dinamica ferroviaria la trattazione di questi temi; per una introduzione alla materia si veda il volume [La Dinamica del Veicolo Ferroviario] in bibliografia.



75kV corrente continua

15kV 16 2/3 Hz corrente alternata

3kV corrente continua

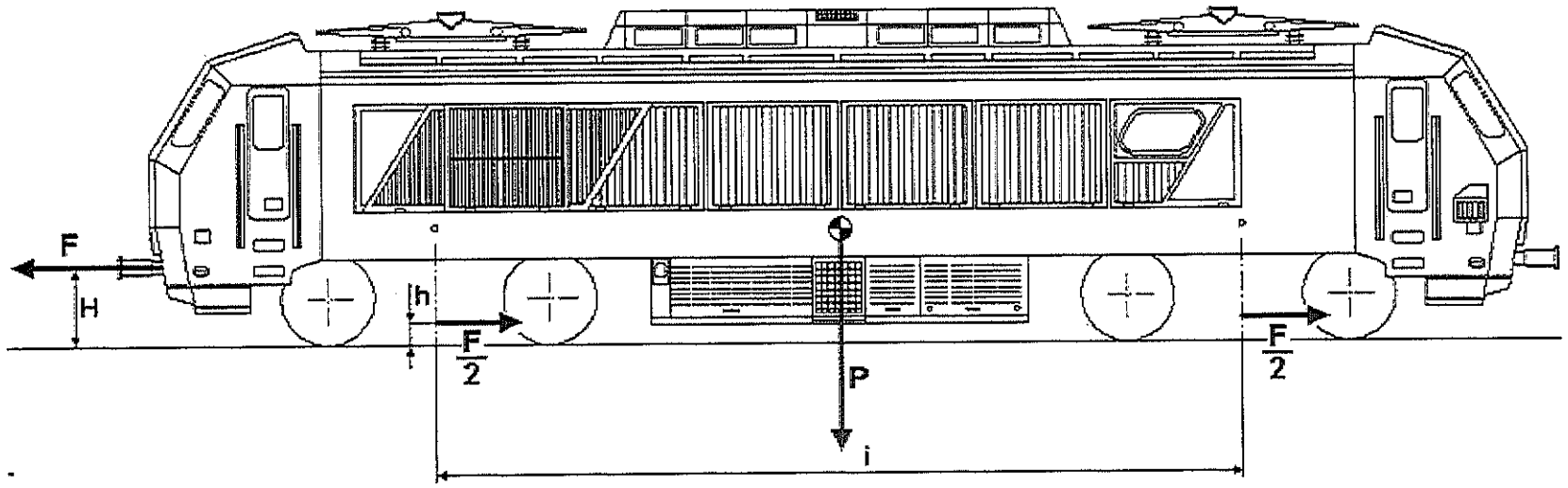
1,5kV corrente continua

25 kV 50 Hz corrente alternata

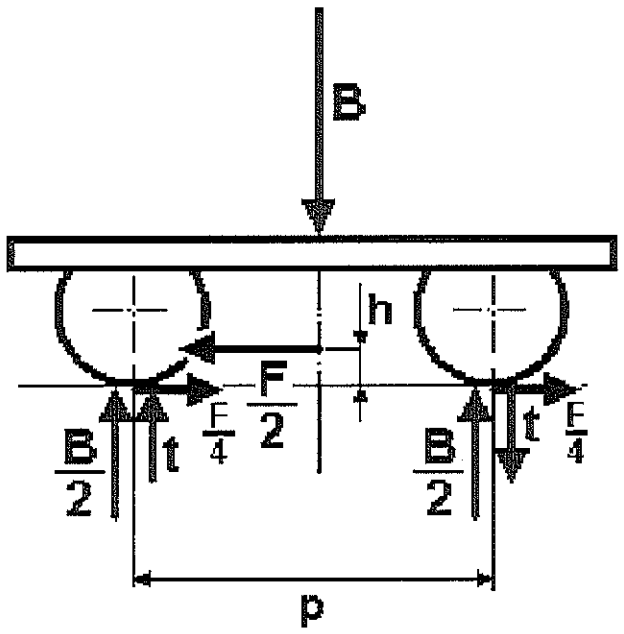
Non elettrificata

Sfruttamento del coefficiente d'aderenza

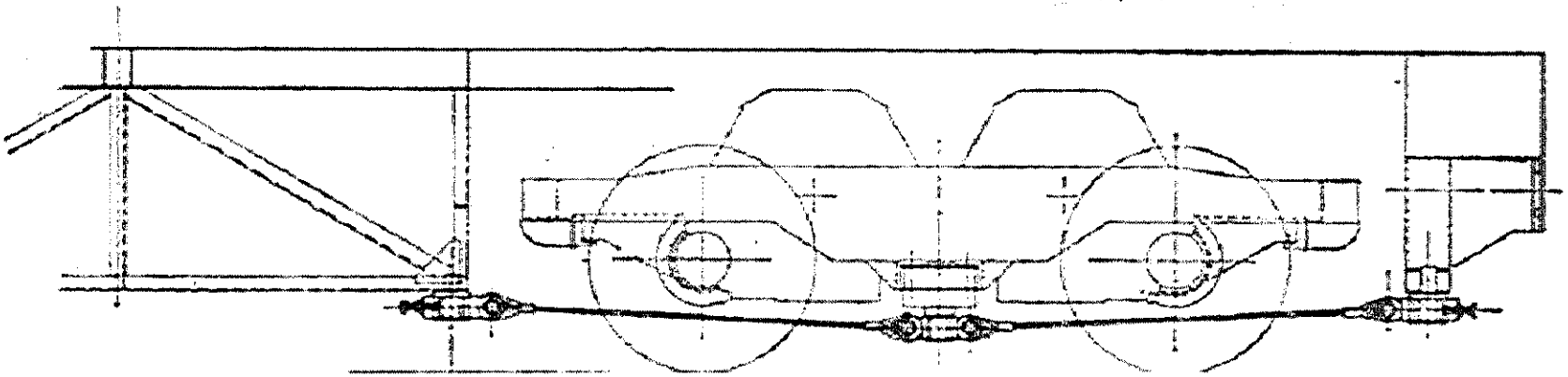
Gli assi destinati a trasmettere gli sforzi di trazione tramite l'aderenza non sono in genere tutti quelli dei convogli ferroviari o tranviari ma una parte di essi.
Nel caso di mezzi di trazione ferroviari (locomotive) possono essere tutti o parte degli assi del mezzo, in caso di tram, automotrici ed elettromotrici ferroviarie, tendenzialmente sono una parte degli assi presenti. Lo si capisce, come visto, dalla designazione del rodiggio.
Esaminiamo il caso più diffuso di mezzo di trazione a quattro assi tutti motorizzati:



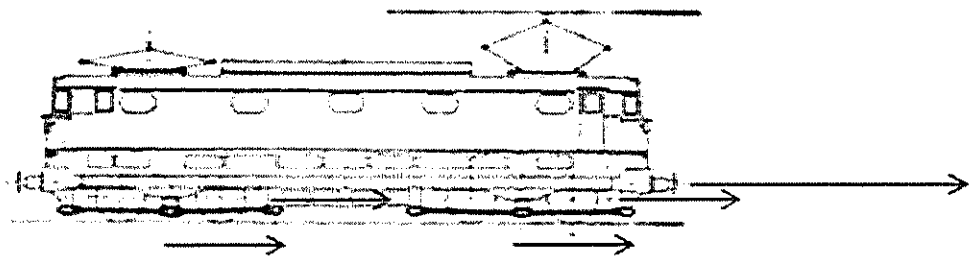
A livello complessivo, la differenza tra H, altezza del punto di applicazione dello sforzo di trazione necessario a movimentare il convoglio (posizione del gancio di trazione), e dei punti di trasmissione dello sforzo di trazione generato dalle ruote sulle rotaie (quota zero o "piano del ferro"), crea una coppia destinata ad innalzare la parte anteriore della locomotiva e ad abbassare la quantità del peso aderente gravante sul carrello anteriore. E' il fenomeno del cabraggio della cassa.
I fenomeni di cabraggio determinano degli squilibri nella distribuzione delle masse sugli assi: limitare il cabraggio del mezzo, e dei carrelli in particolare, significa impedire che a parità di coefficiente d'aderenza sia la diminuzione della massa gravante sugli assi a provocare fenomeni di slittamento e di conseguenza un abbattimento repentino dello sforzo complessivo prodotto dalla locomotiva.

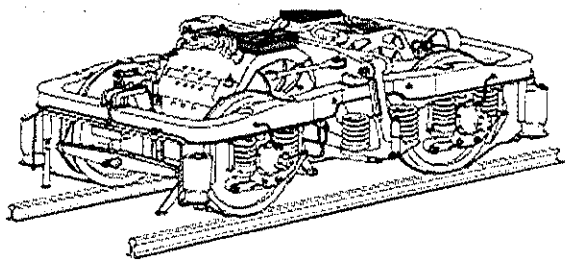


A livello del singolo carrello si potrebbe avere un fenomeno analogo rispetto agli assi motori: il cabraggio dei carrelli viene però evitato, a livello progettuale, portando il punto di trasmissione dello sforzo di trazione generato dal singolo carrello verso l'intero mezzo, di altezza h, ad un livello ribassato (in prossimità al piano del ferro), inferiore rispetto a alla quota di congiunzione meccanica tra il carrello e la cassa del mezzo. La coppia t si trova ad avere verso contrario alla coppia di cabraggio della cassa.



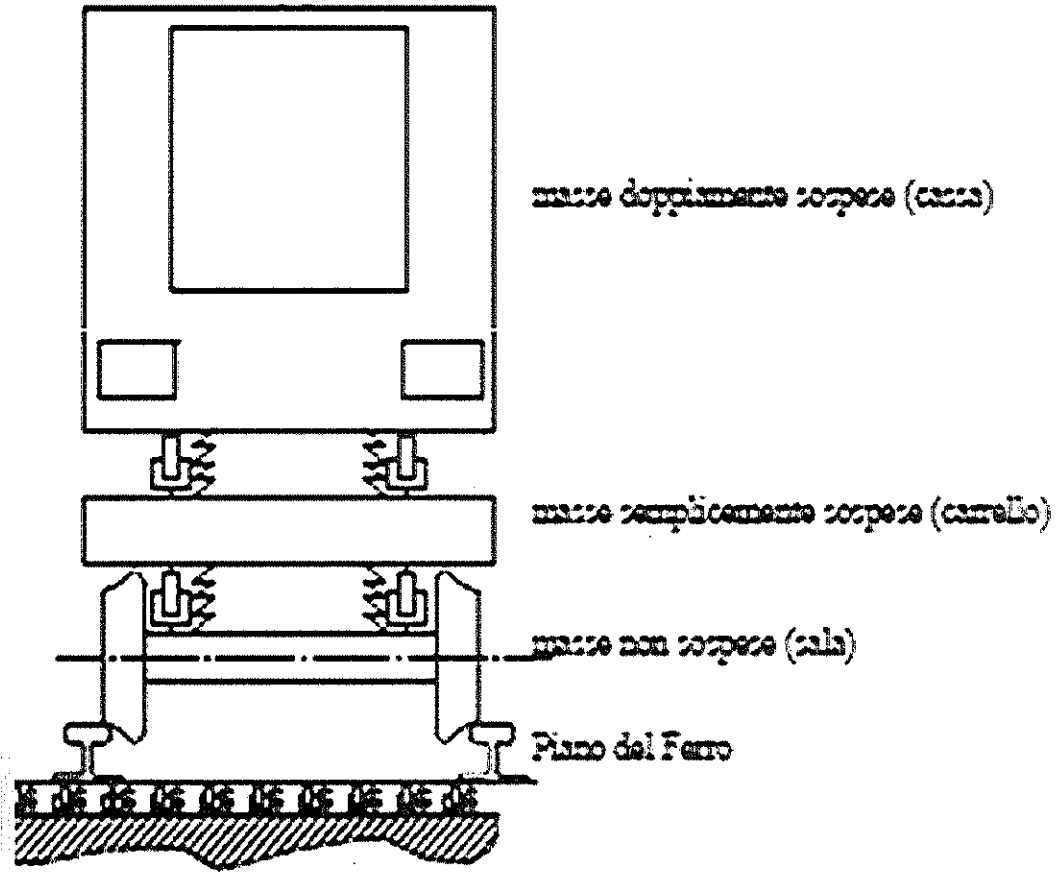
Esempio di"trazione bassa"per il carrello della locomotiva .elettrica FS E.444, realizzata tramite cavi pre-tensionati che collegano un punto inferiore del carrello a dei punti specifici della cassa detti "castelletti di trazione"



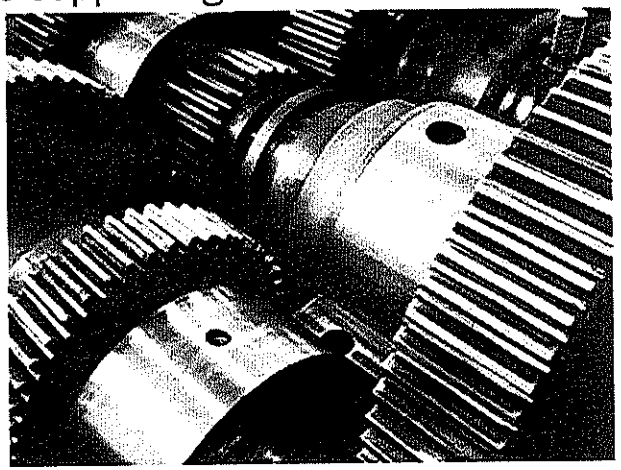


A livello progettuale quindi si adottano tutti gli accorgimenti possibili per distribuire il peso del mezzo uniformemente su tutti gli assi motori disponibili durante tutte le fasi del moto dello stesso, in particolare durante gli "spunti" da velocità nulla

E' naturale pensare che come avviene per i veicoli stradali, i motori di trazione dei rotabili ferroviari siano collocati "a bordo" degli stessi, ovvero nella cassa dei mezzi.
Ciò è vero,come intuibile dallo schema, se il moto prodotto dai motori può poi essere ragionevolmente condotto agli assi tramite degli organi di trasmissione in grado di compiere la loro funzione attraversando gli stadi di sospensione tipici dei mezzi ferroviari,senza influenzarne la funzione.
E ciò è assai difficoltoso, per via soprattutto delle ingenti coppie e potenze da trasmettere



Si ha quindi la necessità di ideare delle trasmissioni del moto (rigide o elastiche) in grado di trasmettere principalmente coppie ingenti, generate dai motori di trazione, sino agli assi dei mezzi con efficacia, regolarità, robustezza e durata.
Tendenzialmente, come è facile immaginare, una trasmissione del moto rigida, priva di cedimenti elastici, sarebbe di gran lunga la più robusta.
L'utilizzo di ruote dentate, per ingranaggi, sia a denti dritti che elicoidali, crea un tipo di trasmissione necessariamente rigido. Sono però praticamente l'unico sistema di trasmissione in grado di sostenere i livelli delle coppie in gioco

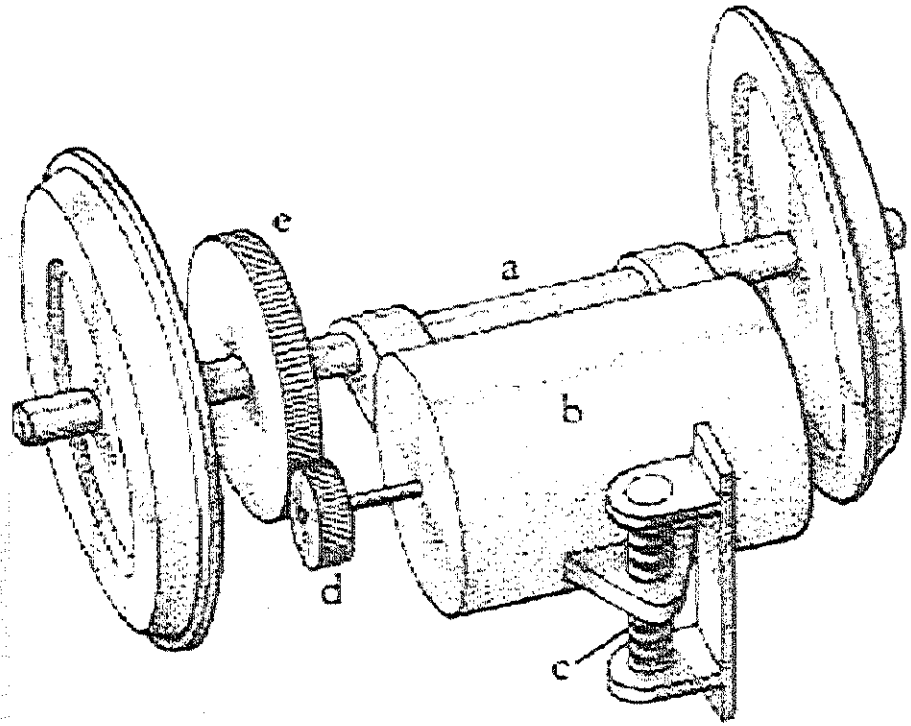


Esiste un'altra importante problematica, legata principalmente a questioni di dinamica di marcia dei rotabili ferroviari, sollecitazioni dei mezzi verso il binario, masse dei motori di trazione impiegati: qualora la trasmissione sia ipoteticamente rigida (vi sono stati alcuni casi nel passato) il motore di trazione, genericamente elettrico, risulta meccanicamente solidale con l'asse ferroviario che movimenta: questo genera un complesso meccanico ad alto momento d'inerzia, molto aggressivo nel moto nei confronti delle sollecitazioni provenienti dal binario, con risposte dinamiche di grande ampiezza che introducono deformazioni al binario stesso. I motori di trazione devono allora essere "sospesi", ovvero resi solidali ai carrelli o, nel caso estremo, alla cassa.

Motori di trazione "semi" sospesi

E' il sistema di trasmissione più antico legato all'utilizzo delle ruote dentate.
Scarica l'asse ferroviario solo parzialmente del gravame della massa del motore di trazione, che in parte viene ad insistere sul veicolo tramite un appoggio. L'appendice del motore necessaria al collegamento con il veicolo (per intero oppure col carrello) viene detta "naso". Dalla parte opposta, il motore poggia sull'asse mediante cuscinetti che garantiscono che la rotazione reciproca, mantenga rigido l'ingranamento delle ruote dentate.
Il sistema è stato adoperato spesso in applicazioni ferroviarie e quasi sempre per i tram, al punto da essere noto come"trasmissione tranviaria del moto".

a) Asse ferroviario
b) Motore elettrico di trazione
c)"Naso" o collegamento col veicolo
d) Pignone
e) Corona

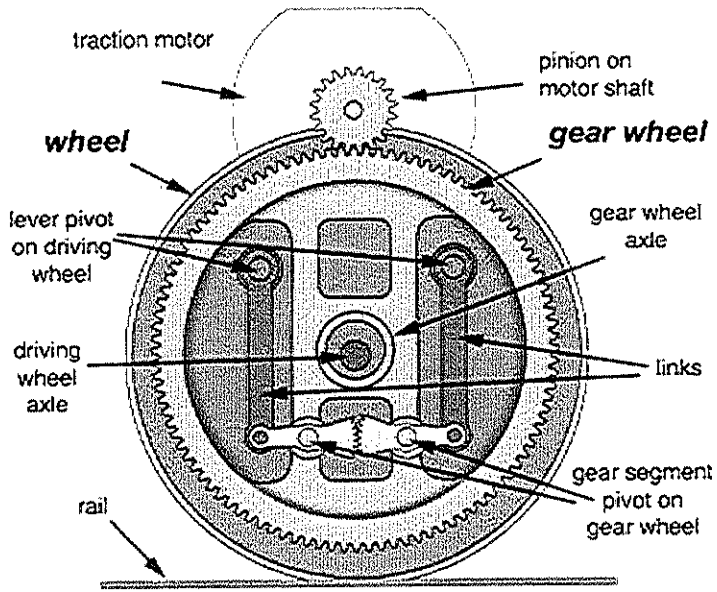


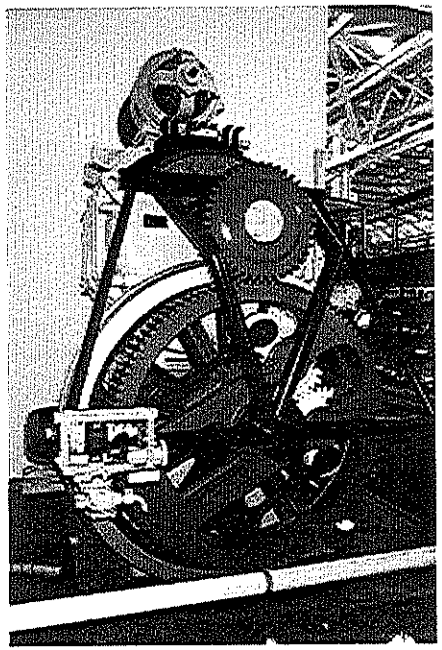
Motori di trazione semplicemente sospesi

Il sistema di trasmissione classico ferroviario, quello realizzato tramite l'utilizzo di bielle e n0ato con la trazione a vapore, garantisce che il motore di trazione risulti rigido con la cassa (o con il carrello) e sia sospeso. Tale sistema di trasmissione comunque introduce molte altre problematiche di natura dinamica (moti eccentrici, masse alterne, bilanciamenti, ecc).

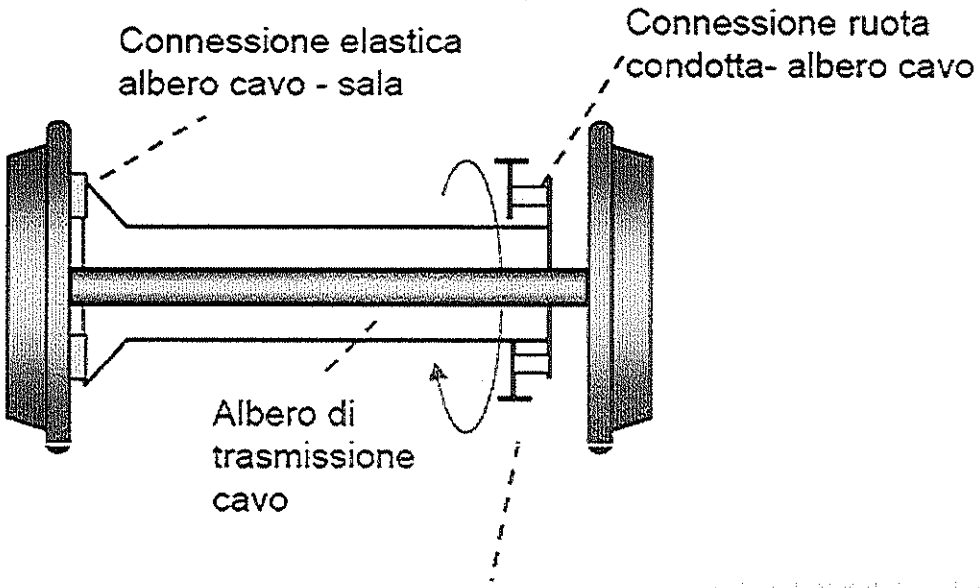
Le trasmissioni che permettono un grado di sospensione tra i motori e gli assi si basano, salvo alcune eccezioni, sull'utilizzo del cosiddetto"asse cavo"ovvero di un secondo asse di trasmissione, concentrico con quello ferroviario, destinato ad essere collegato ai motori di trazione e ad essi meccanicamente solidale. La trasmissione avviene poi in forma elastica tra asse cavo ed asse ferroviario.

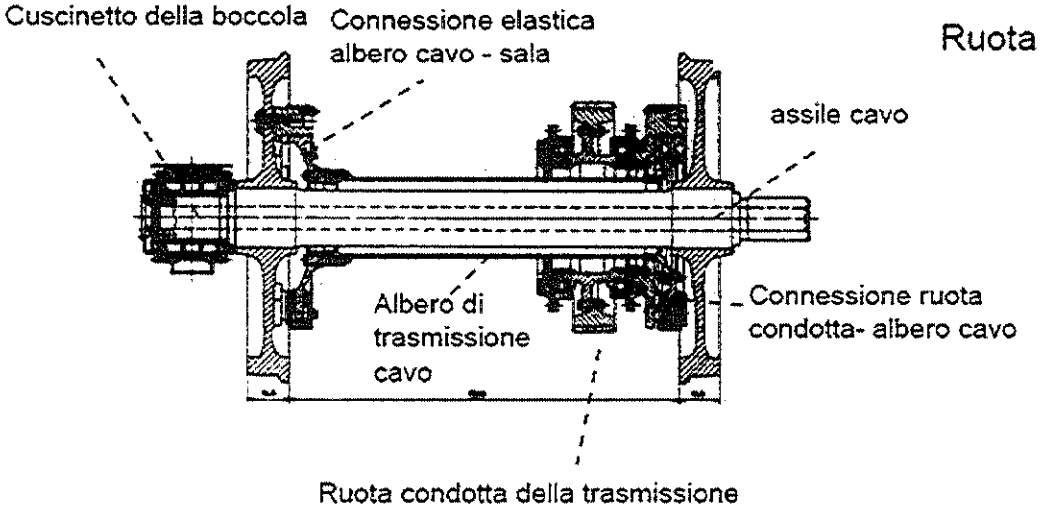
Trasmissione elastica del moto Buchli (senza asse cavo)



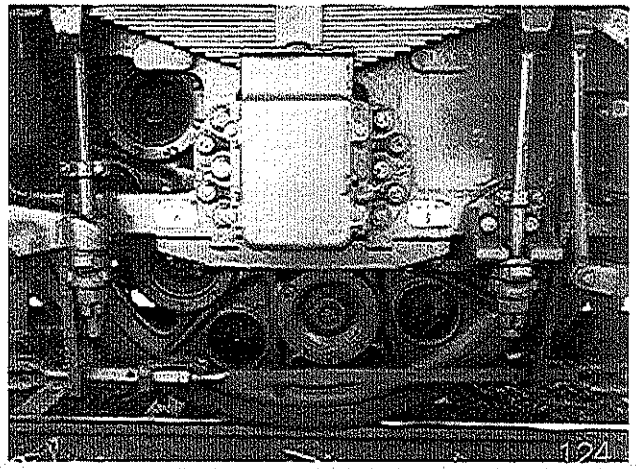


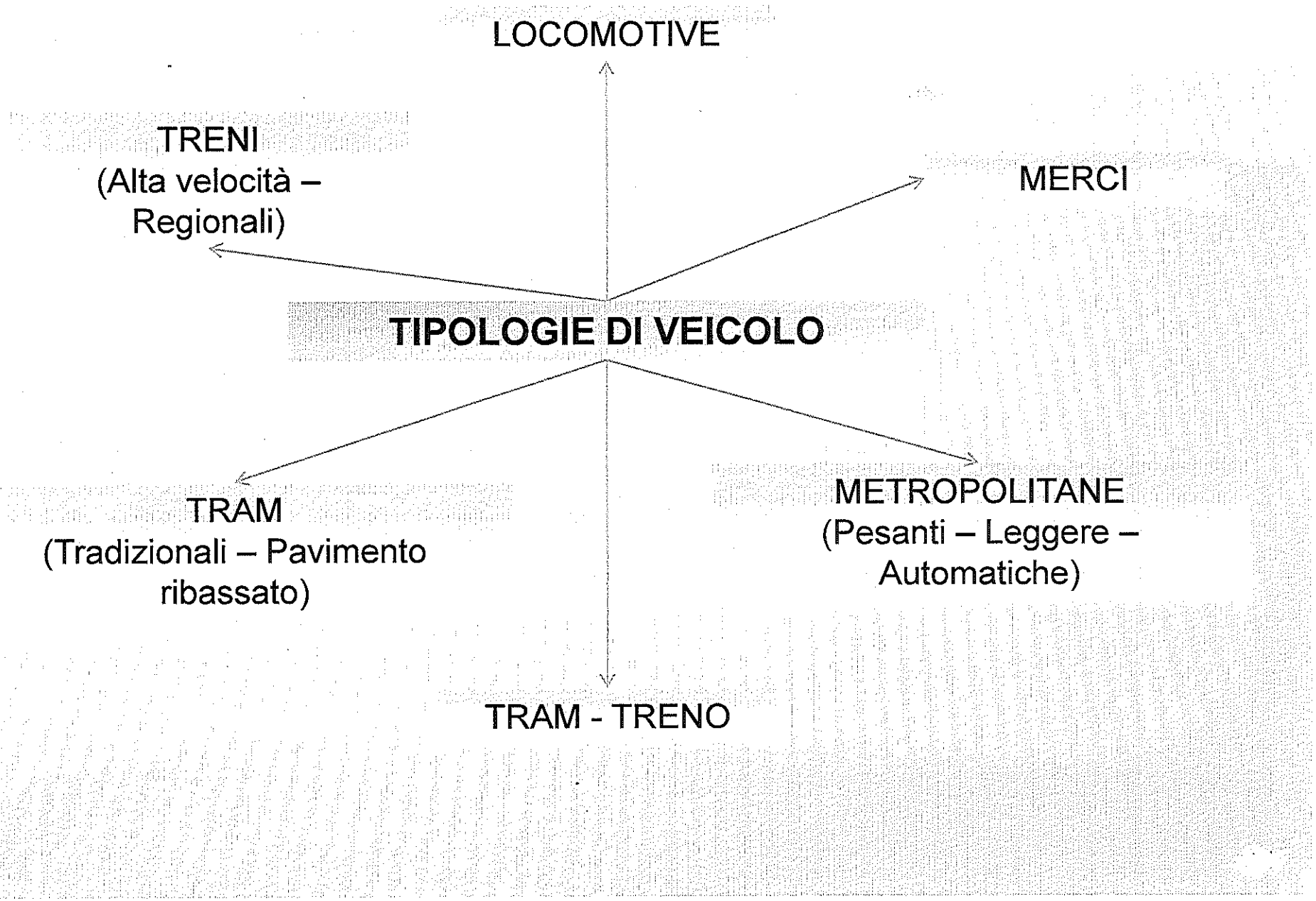
Principio di funzionamento delle trasmissioni elastiche ad asse cavo ed esempi:



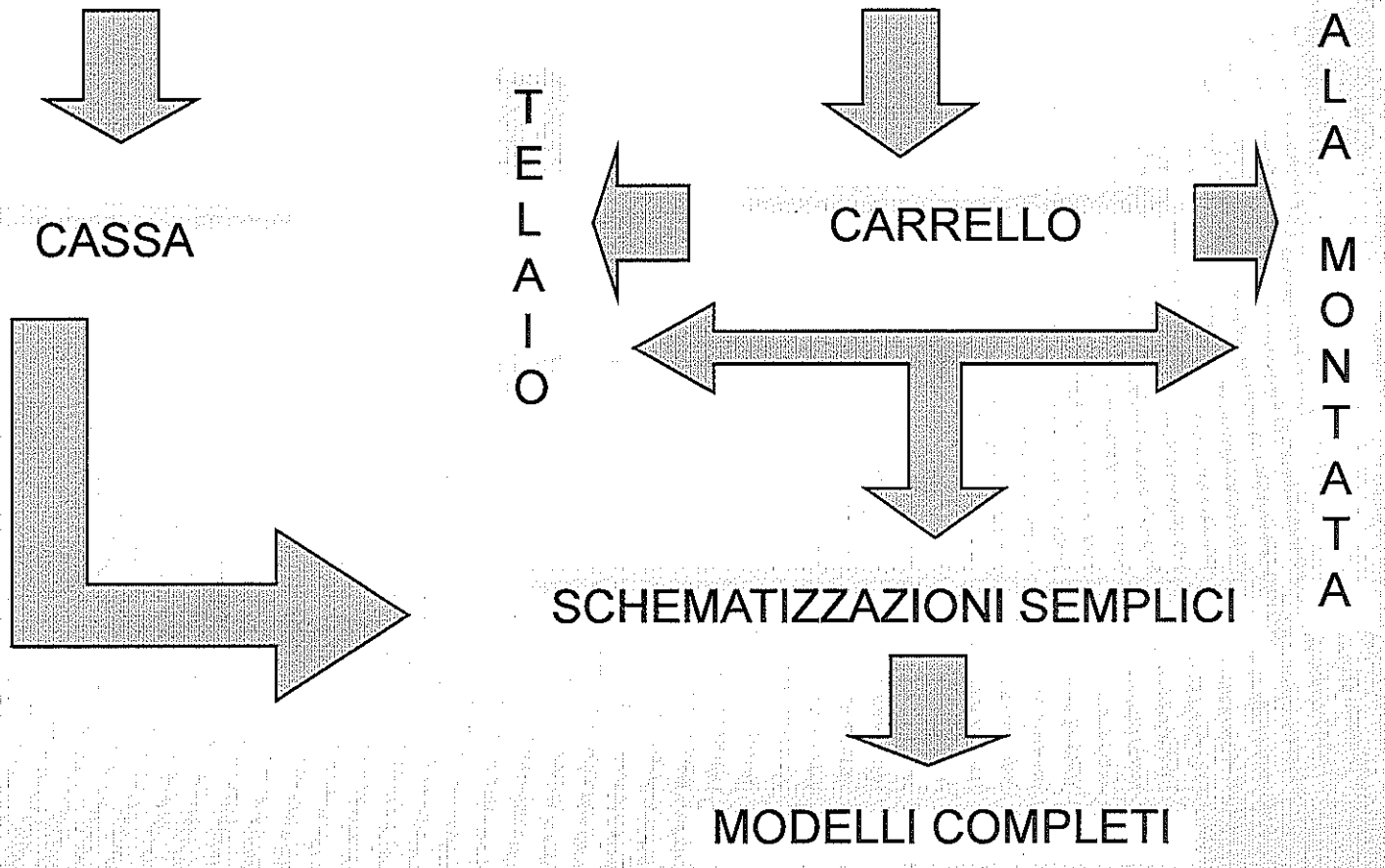
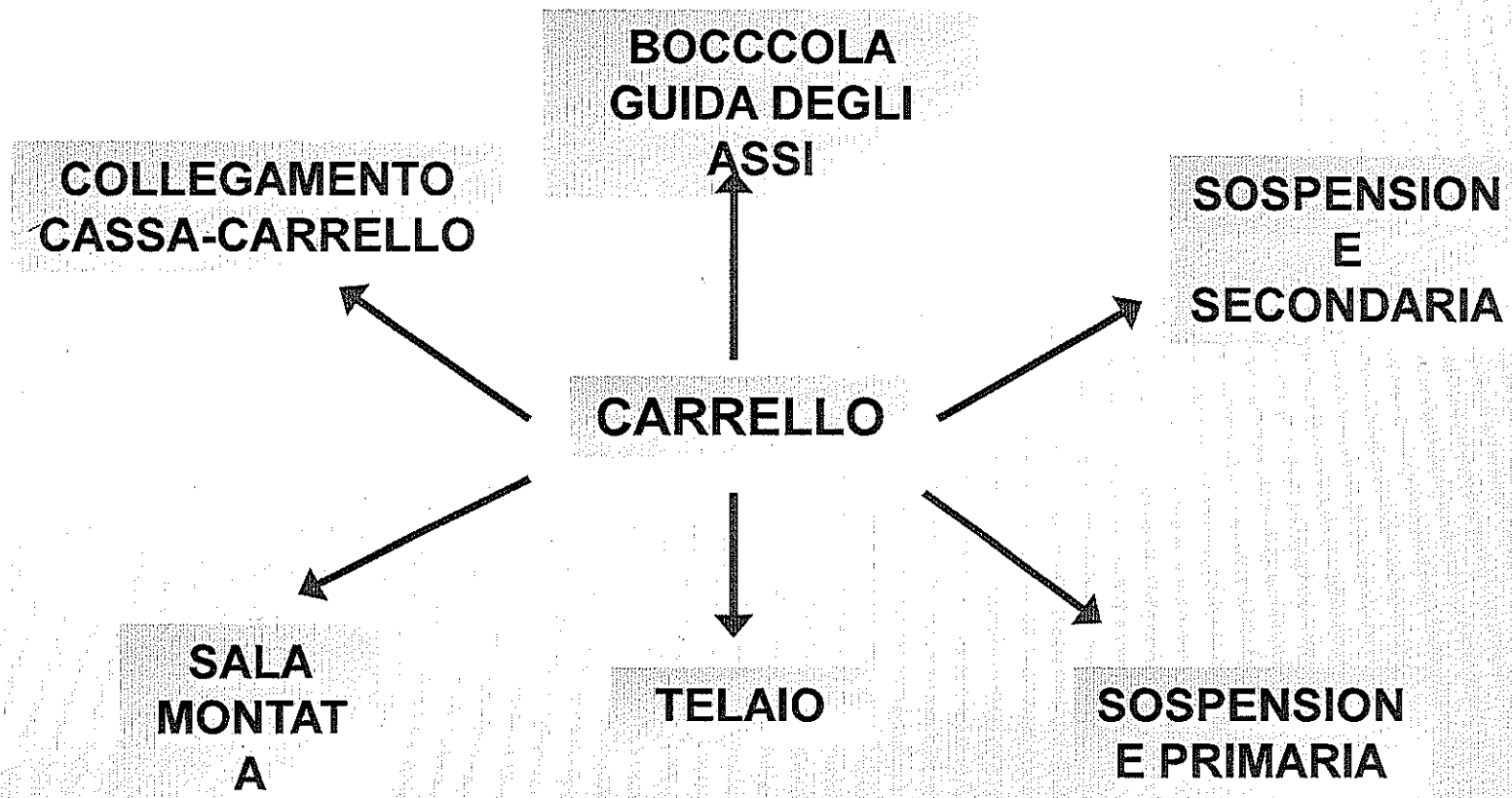


Ruota condotta della trasmissione




LOCOMOTIVE
TRENI
(Alta velocità –
Regionali)
MERCI
TIPOLOGIE DI VEICOLO
TRAM
(Tradizionali – Pavimento
ribassato)
METROPOLITANE
(Pesanti – Leggere –
Automatiche)
TRAM - TRENO

ELEMENTI FONDAMENTALI DEL VEICOLO AI FINI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO



ELEMENTI CARATTERISTICI DEL CARRELLO AI FINI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO