

ing. Renzo Marini

Dalla trazione a vapore a quella elettrica

I disegni provengono dall'archivio della
Direzione Tecnica di Trenitalia

Le fotografie sono state riprese dall'ing.
Renzo Marini salvo diversa indicazione

ing. Renzo Marini



La locomotiva a vapore: origini, evoluzione e prospettive

Le origini

La prima locomotiva a vapore fu realizzata nel febbraio del 1804 da Richard Trevithick.

Tuttavia la prima macchina destinata ad uscire dall'ambito sperimentale fu costruita da George Stephenson per la Ferrovia Stockton-Darlington, aperta all'esercizio commerciale nel 1825 .

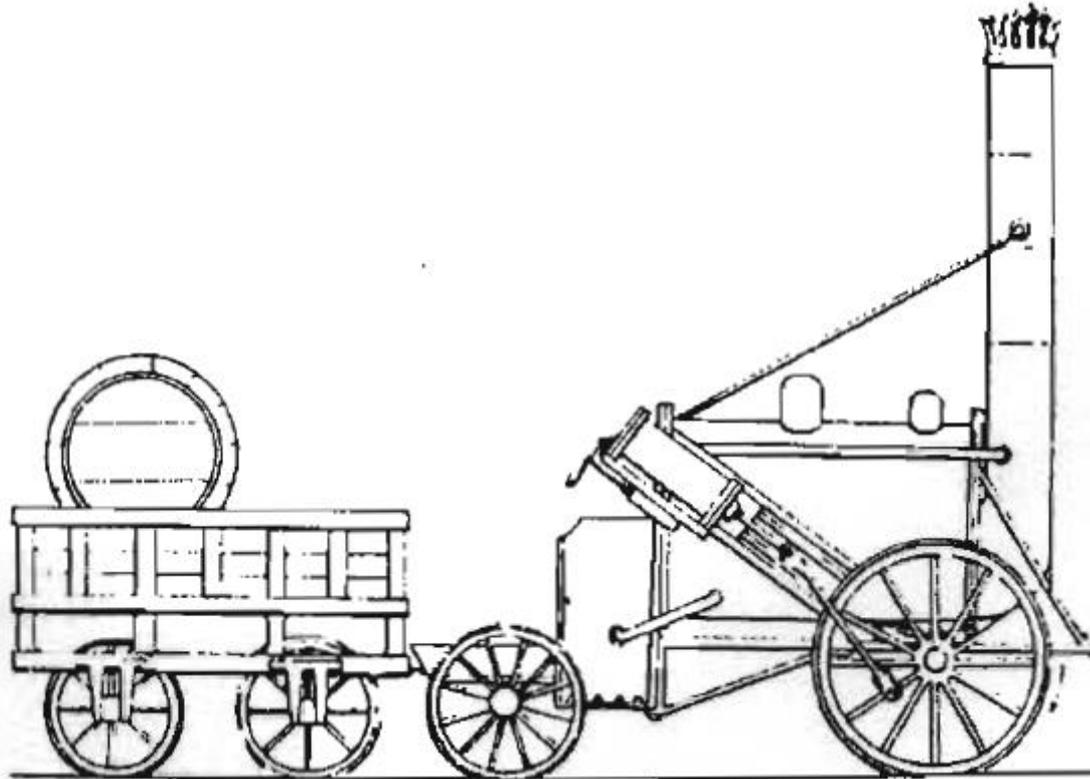
Il limite di questa locomotiva era la modesta produzione di vapore. Occorreva aumentare la superficie di riscaldamento e bruciare molto carbone in un forno relativamente piccolo.

Le origini

Fu lo stesso Stephenson, con suo figlio Robert, a risolvere questi problemi qualche anno dopo con la locomotiva The Rocket (il razzo), destinata alla Liverpool-Manchester, adottando il “sistema tubolare” e il “tiraggio forzato” mediante il vapore di scarico dei cilindri, successivamente impiegato su tutte le locomotive a vapore.

Emerge subito da ciò una caratteristica del tutto particolare e forse unica nella storia della tecnica: la locomotiva a vapore è una macchina che ha conservato nel suo straordinario sviluppo la struttura originaria.

Le origini



Locomotiva a vapore *The Rocket* di G. STEPHENSON (Anno 1829)

La “rivoluzione” indotta dalla locomotiva a vapore

Questa macchina, che fu la prima a sostituirsi alla trazione animale, consentì in breve tempo di mutare l'unità di misura del tempo di viaggio dalla “giornata” all’”ora”, favorendo gli spostamenti e i contatti tra le persone.

In breve rivoluzionò le condizioni di vita e le abitudini.

Nacquero con essa nuovi “mestieri”, comprendenti il personale di condotta, di movimento, d'officina, ecc. e costituì un elemento essenziale dello sviluppo industriale dove il motore a vapore, al di fuori della Ferrovia, ebbe fino ai primi decenni del secolo scorso un esteso impiego.

E' interessante evidenziare che l'Inghilterra non solo vide circolare le prime locomotive, ma fissò anche lo scartamento standard di 4 piedi e 8 pollici e mezzo, pari a 1435 mm, che fu poi estesamente adottato in gran parte del mondo.

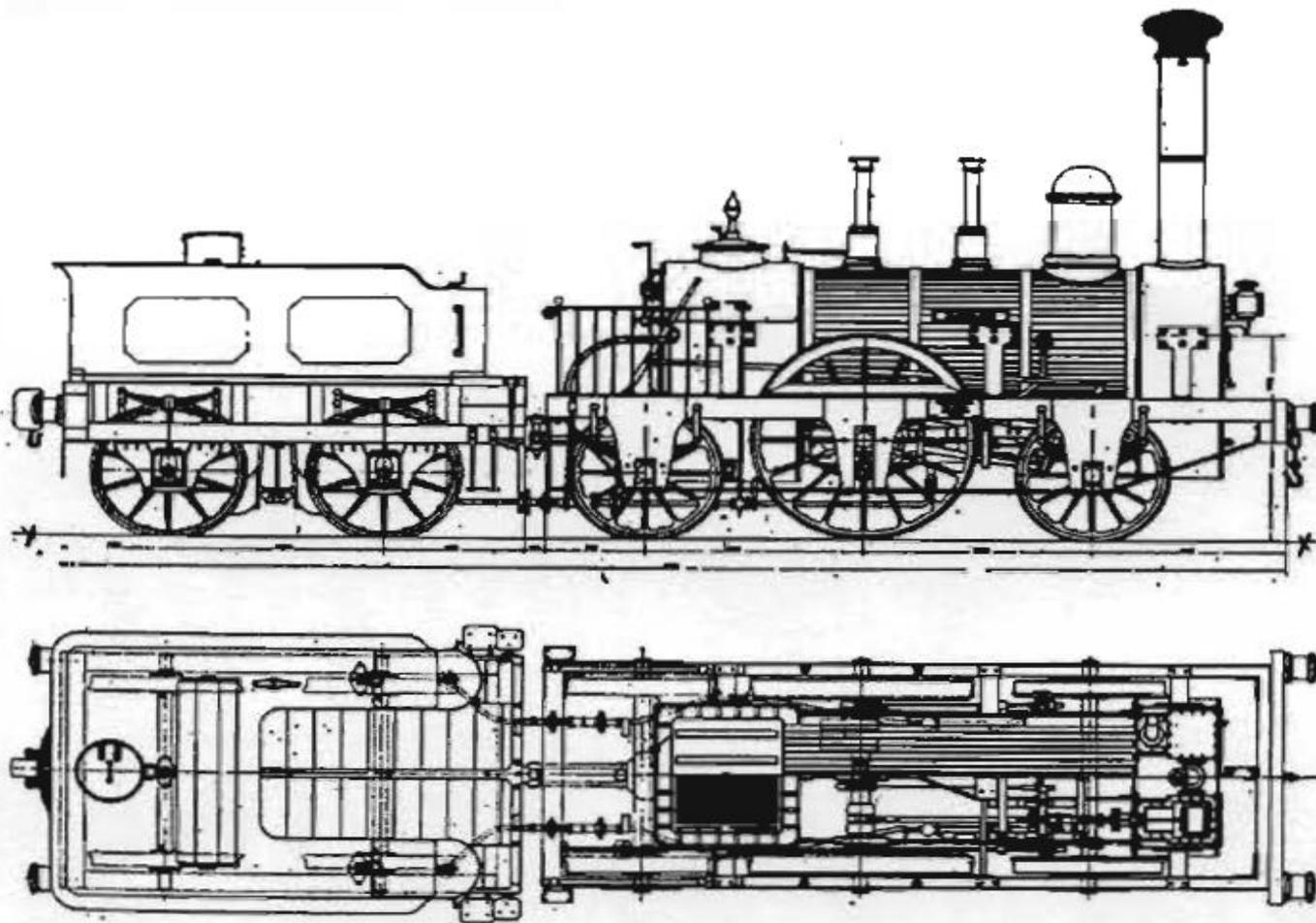
Gli albori della trazione a vapore in Italia

La prima Ferrovia in Italia fu la Napoli-Portici, progettata dal francese Armand Bayard de la Vingtrie, aperta all'esercizio il 3 ottobre 1839 con le due locomotive di costruzione inglese: Bayard e Vesuvio.

Anche per l'Italia partono da qui un sistema di trasporto ed una macchina che negli anni successivi conobbero una grande espansione favorendo uno sviluppo industriale altrimenti inimmaginabile e sostituendo la trazione animale viceversa in rapido declino.

Da quel momento si cominciò a misurare la durata dei viaggi semplicemente in ore.

Gli albori della trazione a vapore in Italia



La locomotiva Bayard (anno 1839)

Gli elementi principali

- Caldaia, che comprende anche il forno ed il camino;
- Meccanismo, costituito dall'apparecchio motore e da quello distributore;
- Carro, che sostiene e trasporta caldaia e meccanismo dal quale riceve il moto;
- Tender, che contiene le riserve d'acqua e di carbone e che nelle unità più piccole forma un corpo unico col carro (locomotive-tender).

La caldaia

Normalmente orizzontale ed a tubi di fumo, comprende il forno o focolare, in rame o in acciaio.

Il primo offre una migliore conducibilità termica, l'altro una maggiore robustezza.

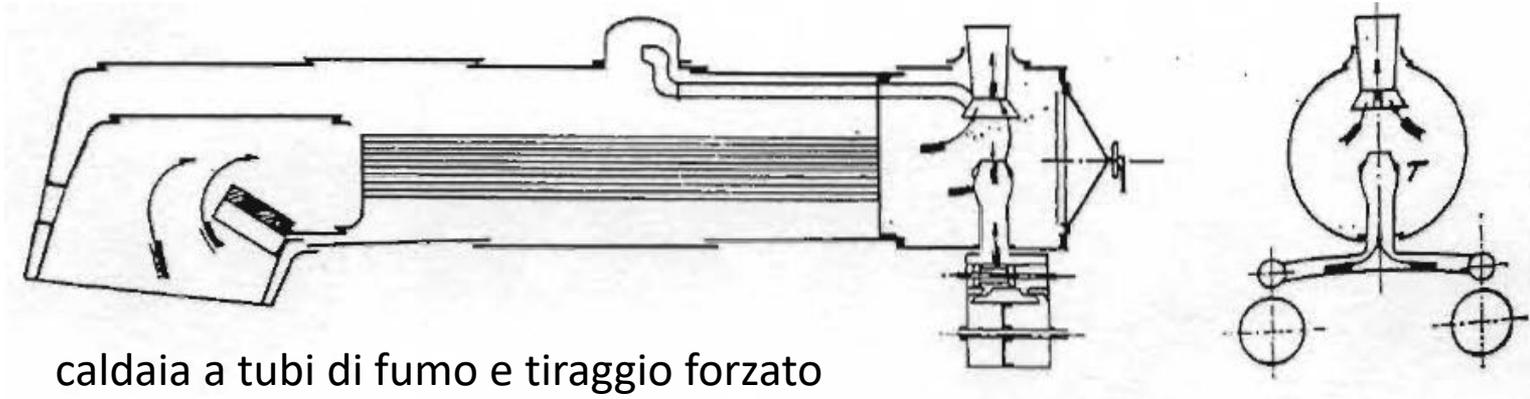
Nella parte inferiore del forno ci sono le griglie, dove arde il carbone.

Le piastre tubiere, posteriore ed anteriore, delimitano lo spazio della caldaia che contiene l'acqua da vaporizzare e sostengono i tubi di fumo, sulla superficie dei quali avviene lo scambio termico tra i gas della combustione e l'acqua, che vaporizza.

La caldaia

Davanti alla piastra tubiera anteriore si trova la “camera a fumo”, dove arriva lo scappamento dei cilindri che, a treno in movimento, favorisce il tiraggio.

A treno fermo la combustione può essere favorita mediante il soffiante, tubo circolare forato che convoglia il vapore nel camino, incrementando il tiraggio.



caldaia a tubi di fumo e tiraggio forzato

Il meccanismo

Le locomotive a semplice espansione sono dotate di due cilindri che agiscono sul medesimo asse motore, le cui manovelle sono calettate a 90° per consentire il movimento anche quando una delle bielle si trova in uno dei suoi punti morti.

I cilindri possono essere disposti all'esterno del telaio o al suo interno.

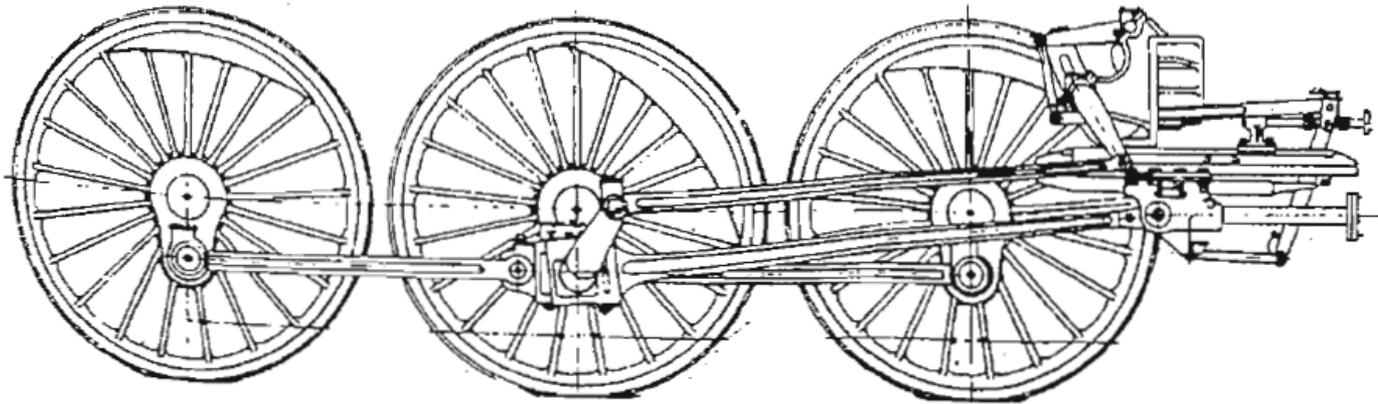
Quest'ultima disposizione consente una marcia più stabile e regolare, ma implica l'utilizzo di un albero a doppio gomito e maggiore difficoltà per la visita e la lubrificazione del meccanismo, interno al telaio stesso.

I cilindri esterni facilitano moti di serpeggio, ma sono la soluzione più usata.

Il meccanismo

La distribuzione può essere a cassetto o a valvole, in base al tipo di dispositivo impiegato per realizzare secondo determinate fasi l'introduzione del vapore nei cilindri ed il successivo scarico.

Le bielle motrici trasmettono il moto all'asse motore e quelle accoppiate collegano questo con gli assi accoppiati



Testa crociata, biella motrice, biella di accoppiamento

Il carro

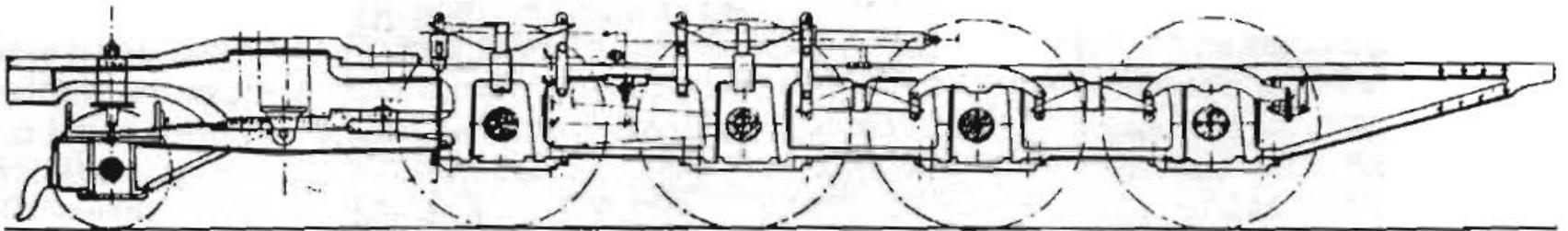
E' composto dal telaio e dal rodiggio.

Il telaio, interno alle ruote della locomotiva, è l'elemento al quale sono fissati il meccanismo, la caldaia, gli assi con le ruote e le rispettive boccole, che servono alla traslazione della locomotiva, nonché la sospensione, che collega mediante pendini e balestre il telaio stesso alle sale montate.

Esso è costituito da due fiancate in lamiera d'acciaio collegate solidamente tra loro mediante robuste traverse.

Il carro

Il rodiggio è costituito dall'insieme degli assi motori e portanti della locomotiva ed è rappresentato da una sigla di lettere e numeri che sintetizza le caratteristiche della macchina.

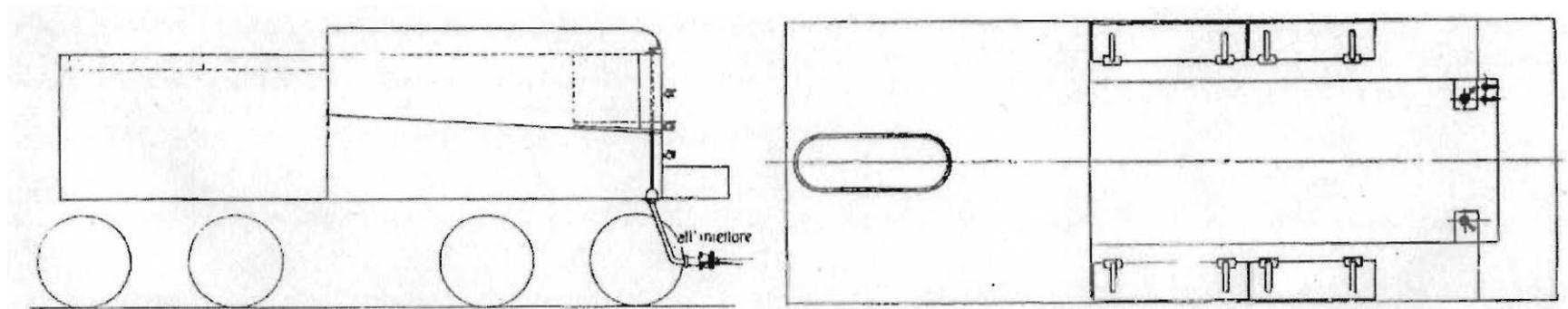


Schema di un telaio del carro

Il tender

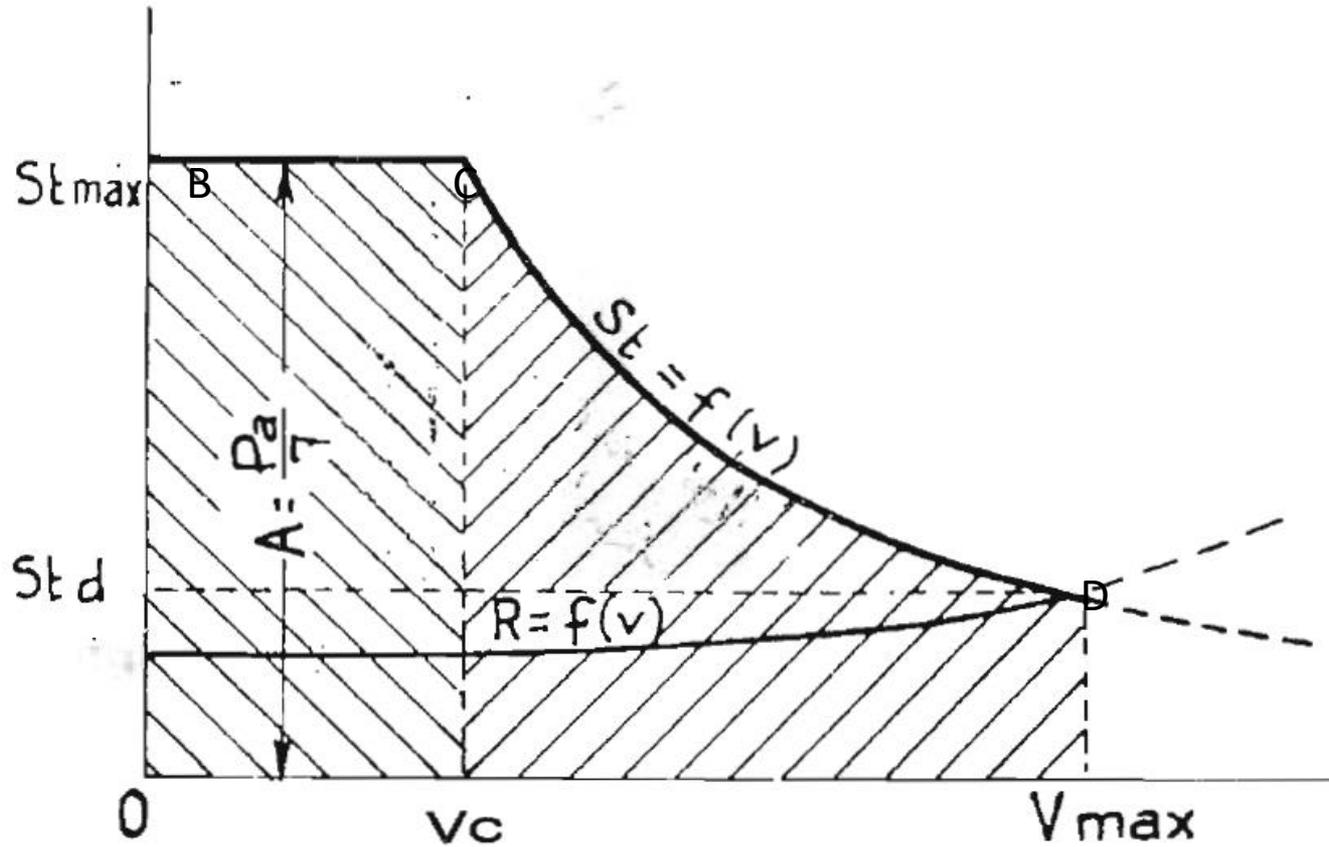
Il tender serve al trasporto di acqua e carbone, necessari per il funzionamento della locomotiva.

Il carbone è contenuto nella parte centrale ed è circondato dalla cassa dell'acqua. In genere la capacità è di 22 m³ d'acqua e 6 tonnellate di carbone.



Sezione e pianta di un tender

Caratteristica meccanica



Fornisce l'andamento dello sforzo di trazione in funzione della velocità.

Lo sforzo max. si ha nel tratto B-C, dove è limitato dall'aderenza.

Caratteristica meccanica

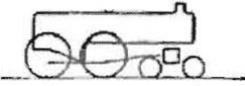
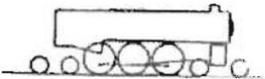
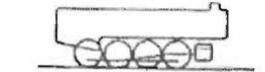
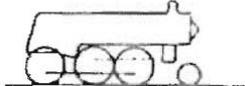
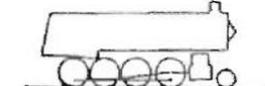
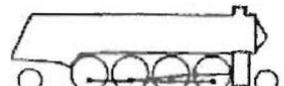
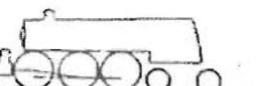
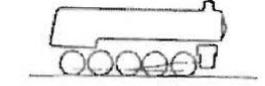
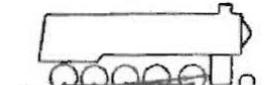
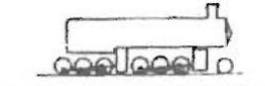
Raggiunta la velocità V_c tutto il vapore prodotto dalla caldaia viene utilizzato dal meccanismo motore e la locomotiva fornisce tutta la sua potenza.

Successivamente all'aumento della velocità deve corrispondere una diminuzione del grado d'introduzione, per mantenere il consumo di vapore costante e pari a quello prodotto dalla caldaia.

Il tratto CD, simile ad un'iperbole equilatera, è a potenza costante, ottimale per la trazione.

Il rendimento varia con la velocità e quindi anche la potenza in realtà varia un po'. La velocità massima è quella in corrispondenza dell'intersezione della caratteristica col diagramma della resistenza al moto.

Tipologie di rodiggio

RAPPRESENTAZIONE DEL TIPO DI LOCOMOTIVA	SCHEMA	NOME CONVENZIONALE	RAPPRESENTAZIONE DEL TIPO DI LOCOMOTIVA	SCHEMA	NOME CONVENZIONALE
	2-2-0	<i>American</i>		2-3-2	<i>Baltic</i>
	0-3-0	<i>Bourbonnais</i>		0-4-0	<i>Sigi</i>
	1-3-0	<i>Mogul</i>		1-4-0	<i>Consolidation</i>
	1-3-1	<i>Prairie</i>		2-4-0	—
	2-3-0	—		1-4-1	<i>Mikado</i>
	2-3-0	—		0-5-0	—
	2-3-1	<i>Pacific</i>		1-5-0	<i>Decapod</i>
				1-3+3-0	<i>Mallet</i>

L'evoluzione della trazione a vapore

si può sintetizzare come segue:

- la massa è passata dalle 4,5 t della Rocket del 1829, alle 27 t della francese Crampton del 1850, alle 50 t delle Express del 1900, fino alle 125 t delle Mountain del 1931;
- la vaporizzazione oraria è passata dagli 800 kg della Fusée di Stephenson ai 5.000 della Crampton del 1850, ai 10.000 delle macchine Express del 1900, fino ai 18.000 – 25.000 delle macchine europee ed ai 50.000 delle più potenti loc. americane dei tipi più recenti;
- La potenza massica, che sintetizza i vari stadi della evoluzione, passa dai 5,9 CV/t del 1829, ai 15 CV/t della Crampton del 1850, ai 21 CV/t della Compound del 1890 fino ai 25,4 CV/t della Mountain del 1931;

L'evoluzione della trazione a vapore

- anche la velocità max è andata aumentando nel tempo, dai 60 km/h della Vesuvio e della Bayard del 1839 ai 120 km/h della francese Crampton, al record mondiale di 202,8 km/h raggiunto in Inghilterra il 3.07.1938 da un convoglio trainato da una locomotiva “Pacific-Mallard”;
- la locomotiva più veloce del parco FS è stata la 691 (130 km/h, realizzata nel 1929 dalla trasformazione della 690, costruzione 1911-1914).

L'evoluzione della trazione a vapore



Locomotiva Gr. 691 a Udine (anno 1960)

L'evoluzione in Italia

Nel 1872 la Società Ferrovie Alta Italia creava a Torino un Ufficio Progettazione Locomotive che diede l'avvio alle realizzazioni italiane, seguita nel 1880 dalla Società Strade Ferrate Meridionali, che costituì il suo Ufficio Studi Locomotive a Firenze.

I due Uffici Studi raggiunsero entrambi un elevato livello tecnico e, quando nel 1905 furono costituite le Ferrovie dello Stato, derivanti dalla fusione delle varie Società, la progettazione delle locomotive confluì a Firenze.

I mezzi più rappresentativi furono quelli indicati nella tabella e la fine della progettazione di nuovi mezzi di trazione a vapore si può collocare attorno al 1930.

L'evoluzione in Italia

All'inizio del XX° secolo attorno all'Ufficio Studi si svilupparono altre strutture, preposte all'Esercizio, ai rapporti con l'Industria, al Personale, ecc.

Nacque così il Servizio Materiale e Trazione, il cui compito non era solo quello di progettare nuovi mezzi trainanti e trainati.

Nei primi 25 anni di attività esso progettò e seguì la costruzione di ben 3429 locomotive, più altre 940 su progetti precedenti, che coprivano tutta la gamma di utilizzazione.

L'evoluzione in Italia

Un'attività meno appariscente ma di grande importanza fu quella di unificazione dei componenti dei mezzi meno recenti.

Caldaie e tubi bollitori in acciaio anziché in ferro o in ottone, caldaie di ricambio comuni a più gruppi, unificazione di sale, respingenti, molle, cerchioni, ecc. che consentirono di ridurre rapidamente il numero di disegni dei pezzi comuni e dei materiali di scorta, semplificando la manutenzione e riducendone i costi.

L'evoluzione in Italia

Successivamente si misero a punto migliorie, anche sostanziali, dei mezzi in esercizio.

La locomotiva più riuscita fu la 685, (circa 400 derivanti in parte dalla trasformazione delle 680, potenza 1.250 CV, Vel. Max. 120 km/h, di limitata massa per asse (15,5-15,8t per gli assi motori), ed atta quindi a circolare quasi dappertutto.

Molto apprezzata dal personale di condotta per le sue ottime caratteristiche di marcia. Nel 1926 fu installata la distribuzione a valvole Caprotti.

L'evoluzione in Italia

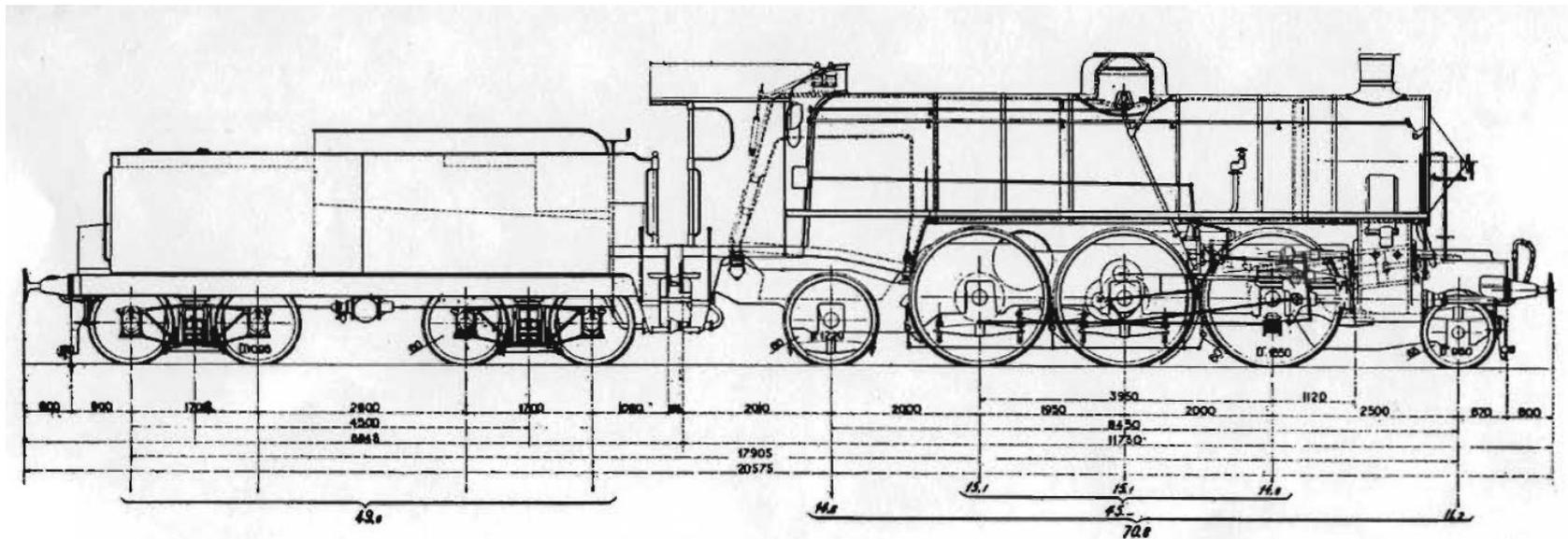
La locomotiva più diffusa fu la 740, realizzata tra il 1911 ed il 1922 in 470 esemplari, con ridotta massa per asse (14 t) e buoni risultati d'esercizio.

Questi suggerirono di derivare da essa una versione reversibile loco-tender Gr. 940 e che hanno determinato la sopravvivenza fino ai giorni nostri di entrambi i gruppi.

L'evoluzione in Italia

Anno	Gruppo	Rodiggio	Massa aderente t	Velocità max km/ora	Potenza CV	Pressione caldaia kg/cm ²	Semplice o doppia espansione	Vapore saturo o surriscaldato	Superficie griglia m ²	Diametro ruote m
1906	730	1-4-0	56,0	60	900	14	Doppia	Saturo	2,80	1,360
1906	630	1-3-0	44,0	100	700	14	»	»	2,42	1,850
1907	680	1-3-1	45,0	110	1 100	16	»	»	3,50	1,850
1907	470	0-5-0	74,8	50	1 000	16	»	»	3,50	1,360
1907	640	1-3-0	44,0	100	800	12	Sempl.	Surrisc.	2,42	1,850
1910	625	1-3-0	43,2	80	800	12	»	»	2,42	1,510
1911	690	2-3-1	51,3	130	1 400	12	»	»	3,50	2,030
1911	740	1-4-0	56,0	60	980	12	»	»	2,80	1,360
1912	685	1-3-1	45,0	110	1 250	12	»	»	3,50	1,850
1913	745	1-4-0	57,1	75	1 250	12	»	»	3,50	1,630
1923	480	1-5-0	75,0	60	1 500	12	»	»	4,30	1,360
1923	746	1-4-1	65,0	100	1 600	14	Doppia	»	4,30	1,850
1924	744	1-4-0	59,2	75	1 250	12	Sempl.	»	3,50	1,630
1929	691	2-3-1	60,0	130	1 750	16	»	»	4,30	2,030

L'evoluzione in Italia



Locomotiva Gr. 685 (anno 1912)

L'evoluzione in Italia



Locomotiva Gr. 740 a Decimomannu (anno 2016)

L'evoluzione in Italia



Locomotiva Gr. 940 D.L. Firenze (anno 1962)

Una delle più grandi locomotive del mondo

L'americana Union Pacific Railroad commissionò tra il 1941 ed il 1944 25 locomotive rodiggio 2'DD2', con potenza di 4700 kW, per il traino di treni merci di oltre 3600 t a 60 km/h sulle linee dell'Utah e dello Wyoming, utilizzando carbone di bassa qualità.

A causa degli alti costi d'esercizio queste locomotive (Big Boy) cessarono di essere utilizzate tra il 1959 ed il 1962.

Una di esse, la 4014, è in corso di riparazione a Cheyenne a cura della Union Pacific, che conta di ultimare i lavori entro il maggio 2019, in occasione del 150° anniversario della prima Ferrovia Transcontinentale degli Stati Uniti.

Una delle più grandi locomotive del mondo



La locomotiva americana Big Boy

Miglioramenti del rendimento termodinamico

Il primo tentativo fu realizzato con l'adozione della doppia espansione (o compound) sistema che sfrutta la residua capacità di espansione del vapore già utilizzato, con locomotive a due ed a quattro cilindri, che realizzano anche una migliore continuità dello sforzo di trazione.

Altro miglioramento fu realizzato con l'adozione del vapore surriscaldato, che presenta rispetto alla doppia espansione il vantaggio di una meccanica più semplice.

Miglioramenti del rendimento termodinamico

Il primo di questi provvedimenti ebbe una limitata applicazione sulle locomotive italiane.

L'ultimo provvedimento adottato per migliorare il rendimento termodinamico fu in Italia l'adozione del preriscaldatore Franco-Crosti, su alcune unità dei gruppi 740, divenute 743 o 741, e 625, divenute 623, che consente in certi casi un'economia di carbone fino al 12%.

Molte di queste trasformazioni furono eseguite nell'OGR di Verona.

Miglioramenti del rendimento termodinamico



Locomotiva Gr. 741 del Parco Storico in Val d'Orcia (anno 2015)

Sviluppo e declino della progettazione

Dal 1920 al 1940 la trazione a vapore era ancora prevalente sulla Rete FS, ma l'attività di studio e progettazione andava sempre più orientandosi verso la trazione elettrica.

Furono progettate in quegli anni le 746, per treni diretti pesanti e le 744 per treni derrate su linee con armamento "leggero" e si sarebbe dovuta progettare la 695, una Pacific a tre cilindri con una massa per asse di 21 t, un diametro delle ruote motrici di 2050 mm ed una velocità massima di 140-150 km/h.

Il progetto fu abbandonato e si preferì modificare le 690 in 691, che assicurarono la trazione dei treni rapidi sulle linee Milano-Venezia, Venezia-Udine e Milano-Bologna fino alla loro elettrificazione.

Sviluppo e declino della progettazione



Locomotiva Gr. 746 D.L. Ancona (anno 1962)

Sviluppo e declino della progettazione



Locomotiva Gr. 744 D.L. Napoli Smistamento (anno 1963)

ing. Renzo Marini

Il declino del vapore

L'estensione dell'elettrificazione determinò il declino del vapore nonostante l'evoluzione raggiunta dalle ultime locomotive, costruite nei primi anni trenta.

I principali motivi:

- basso rendimento (rapporto tra l'energia assorbita e quella resa) pari al 10% circa nel motore a vapore e ad oltre il 90 % in quello elettrico;
- bassa potenza specifica (ad es. per una 470 9,8 kW/t contro i 22,2 di una E550);
- costi di manutenzione, comprese le "cicliche" in una loc. trifase pari a circa un terzo di una loc. a vapore;

Il declino del vapore

- assenza della frenatura elettrica (reostatica o a recupero) e rinuncia, quindi, al vantaggio di ridurre l'usura di ceppi e cerchioni;
- bassa utilizzazione per esigenze della loc. a vapore (rifornimento d'acqua ogni 150-200 km, dopo una decina di ore di servizio accudienza per la pulizia del fuoco, della camera a fumo, dei tubi bollitori, ecc);
- conseguente forte differenza delle percorrenze mensili (oltre 25000 km per una loc. elettrica, circa 6000 per una a vapore.

Il declino del vapore

Queste motivazioni riflettono la situazione degli anni venti e trenta, quando la trazione a vapore cominciò ad essere sostituita estesamente da quella elettrica, prima trifase e poi continua.

Oggi, nonostante qualche tentativo effettuato senza successo negli USA, non sarebbe neppure ipotizzabile realizzare con questa tecnologia le prestazioni richieste ad una moderna locomotiva (6000 - 6500 kW continuativi, 200 km/h, percorsi di migliaia di km senza cambio trazione).

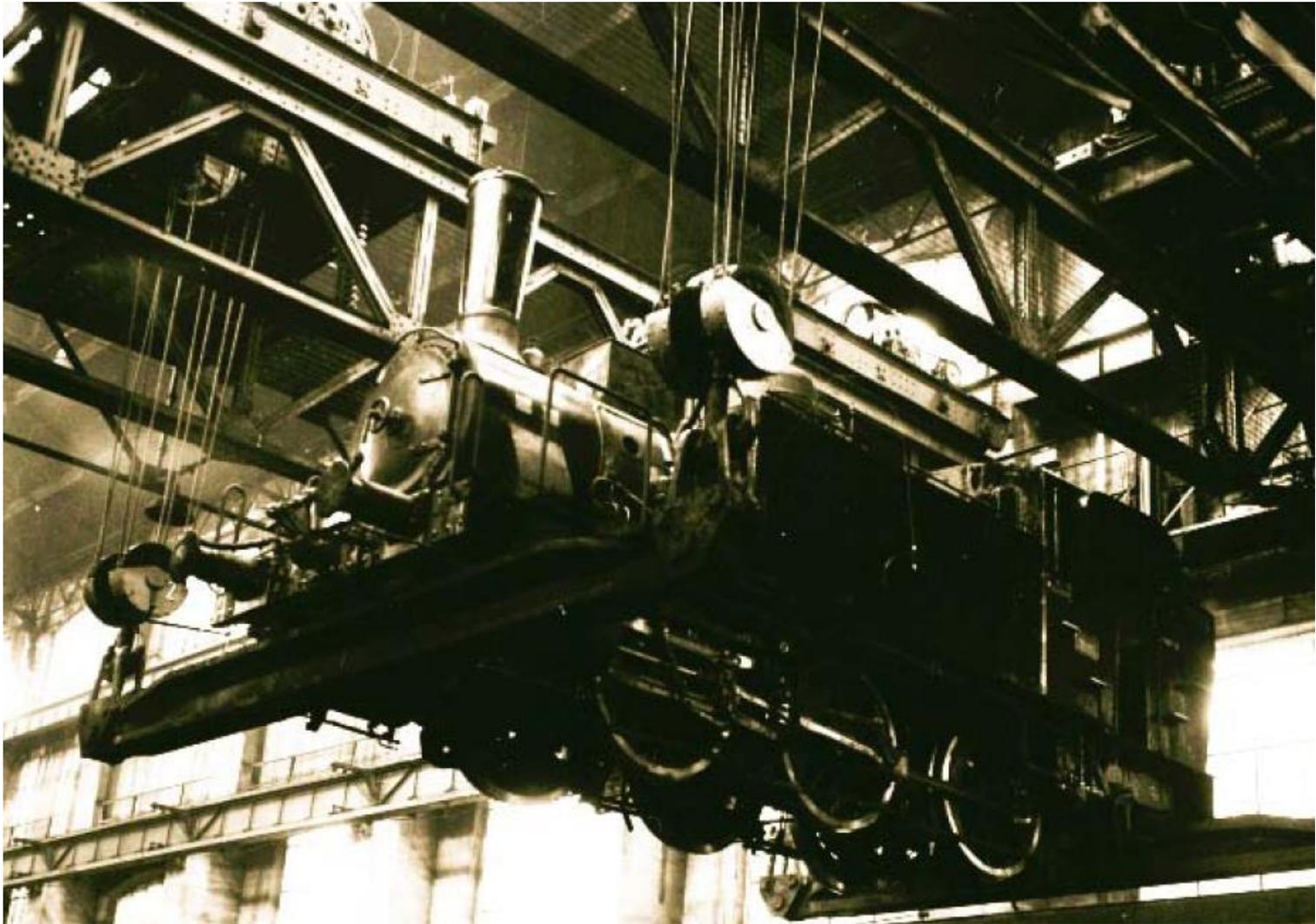
La riparazione delle locomotive a vapore

Queste macchine, come tutti i rotabili ferroviari, sono sottoposte a vari interventi manutentivi in corrispondenza di scadenze prefissate.

L'intervento di massimo rilievo è la “grande riparazione”, che comporta il completo smontaggio della locomotiva ed il ripristino delle caratteristiche di progetto di ogni suo componente.

Le grandi riparazioni venivano eseguite nelle Officine di Torino, Rimini, Napoli Pietrarsa e Verona.

La riparazione delle locomotive a vapore



Loc. GR. 835 in riparazione presso OGR (attuale OMC) di Verona

ing. Renzo Marini

La riparazione delle locomotive a vapore



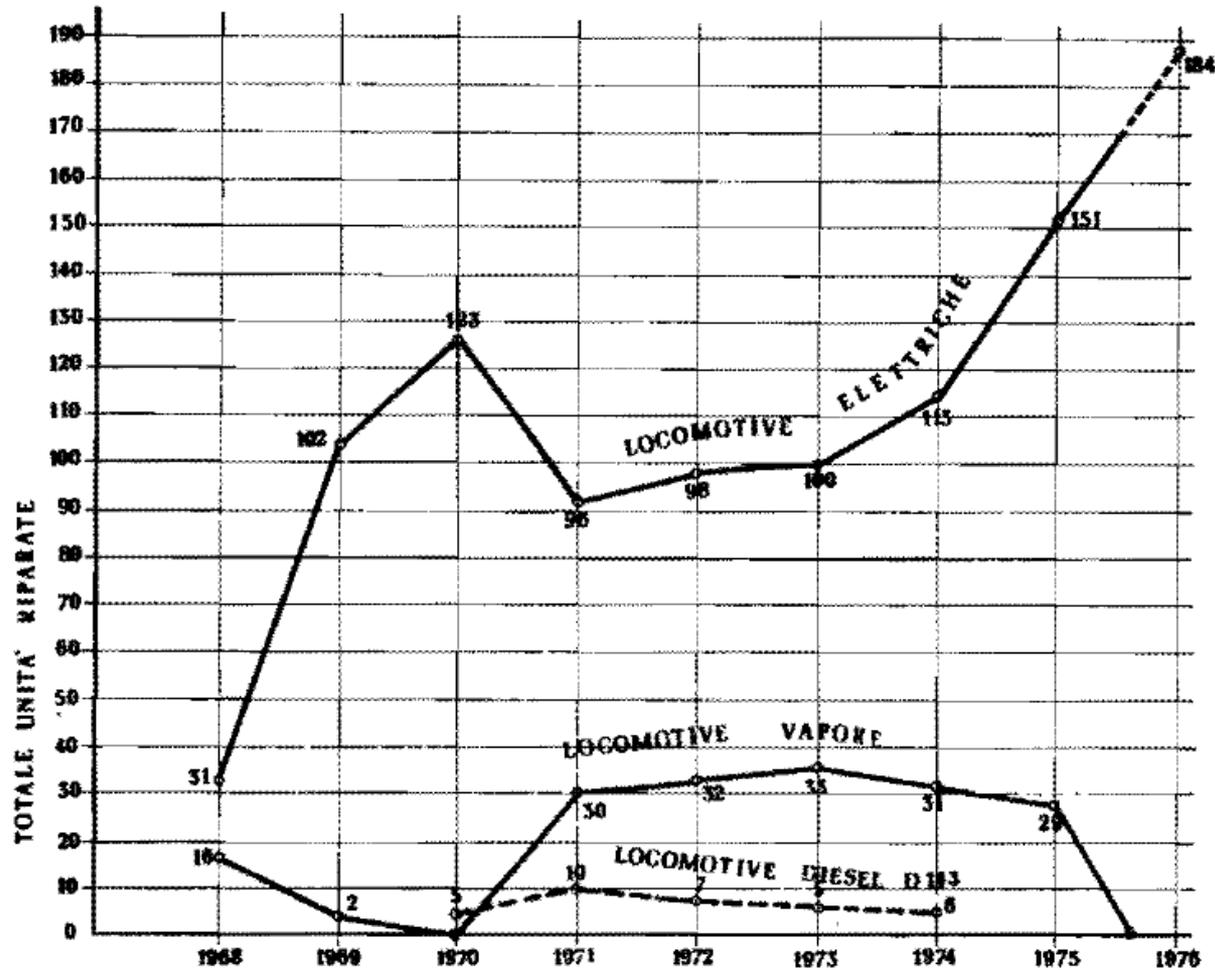
Loc. GR. 640 riparata presso OGR Verona pronta per la restituzione all'esercizio

La riparazione delle locomotive a vapore

L'ultima Officina a cessare quest'attività fu Verona nel 1976, riconsegnando all'esercizio la 740.287, dopo averne riparate circa 10.000 dal 1851, anno della sua realizzazione, diretta dall'ing. Luigi Negrelli, nome legato alla costruzione del Canale di Suez. Terminò così il periodo di transizione TV/TE e l'Officina venne definitivamente convertita per la riparazione delle locomotive elettriche.

Attualmente gli interventi sulle unità del Parco Storico vengono eseguiti presso il DL di Pistoia, costruito nel 1864 a servizio della Porrettana ed ora importante sito manutentivo della Fondazione FS Italiane, o presso l'Industria Privata.

La riparazione delle locomotive a vapore



OGR Verona – transizione dalla TV alla TE

La riparazione delle locomotive a vapore

Il diagramma mostra l'andamento delle riparazioni TV (in esaurimento) e di quelle TE (in aumento) durante gli anni di coesistenza delle due attività (dal 1968 al 1975).

Successivamente l'OGR subì importanti interventi per svolgere al meglio la nuova attività (per es. realizzazione di un carro trasbordatore, i nuovi capannoni per la riparazione dei motori di trazione, delle casse, dei componenti elettro-pneumatici, lavaggio, verniciatura, acquisizione di nuovi macchinari, sostituzione dei mezzi di sollevamento, ecc.) assumendo definitivamente la fisionomia di un moderno impianto riparatore.

La fine dell'esercizio a vapore in Italia

L'avvento delle grandi elettrificazioni degli anni '60 segnò la fase finale di questo fenomeno, che vide ridursi il numero delle locomotive a vapore da 1812 nel 1958 a 1287 nel 1963 fino a 481 nel 1973 (di cui solo 118 in turno).

L'ultimo servizio commerciale a vapore fu quello delle loc. gruppo 981 sulla linea a cremagliera Paola-Cosenza, per il traino (o meglio...la spinta, dato che la locomotiva doveva essere sempre ubicata lato valle) della carrozza diretta Roma-Cosenza. Nel 1981 questo servizio fu soppresso.

L'ultimo treno a vapore sui binari FS fu un convoglio materiali da Cosenza a San Fili, trainato dalla 981.005.

La fine dell'esercizio a vapore in Italia



Locomotiva Gr. 981 in testa ad un treno a Castiglione Cosentino (anno 1966)

Il futuro della locomotiva a vapore

L'esercizio commerciale a vapore è scomparso ormai quasi dappertutto nel mondo, ma il fascino dei treni a vapore permane e anzi tende ad aumentare.

In quasi tutti i Paesi d'Europa esistono organizzazioni che, con ampio ricorso all'opera di volontari-appassionati, curano l'effettuazione di treni storico-turistici con notevole successo.

In Italia la Fondazione FS gestisce un Parco Storico di oltre 200 rotabili, di cui 30 locomotive a vapore atte al servizio.

Il futuro della locomotiva a vapore

Queste sono mantenute secondo i rigorosi programmi di manutenzione dei tempi d'oro e con esse la Fondazione assicura ogni anno un nutrito programma di treni su linee di particolare interesse panoramico (per es. Sulmona-Carpinone, Val d'Orcia, ecc.) che riscuotono un crescente favore.

Le prospettive di questo settore, sia pure “di nicchia”, sono pertanto certamente favorevoli.

Il “baricentro dell'organizzazione vapore” è diventato il DL della Fondazione FS di Pistoia.

ing. Renzo Marini



LA TRAZIONE ELETTRICA FERROVIARIA IN ITALIA

Le fasi principali dell'evoluzione nelle FS

I primi esperimenti:

Accumulatori (Milano-Monza e Bologna S. Felice)

Corrente continua (Milano Varese 3^a rotaia 650 V cc)

Corrente trifase 3400 V 15 periodi
(Linee Valtellinesi e Sempione)

Successivamente:

- trifase 3600 V 16 2/3 Hz
- corrente continua 3kV
- monofase 25 kV 50 Hz

I primi esperimenti

1. Accumulatori

Milano – Monza (Società Mediterranea 1899 – cessata nel 1904)

Bologna – S. Felice (Società Adriatica 1901 – esperimento abbandonato con la costituzione delle FS nel 1905)

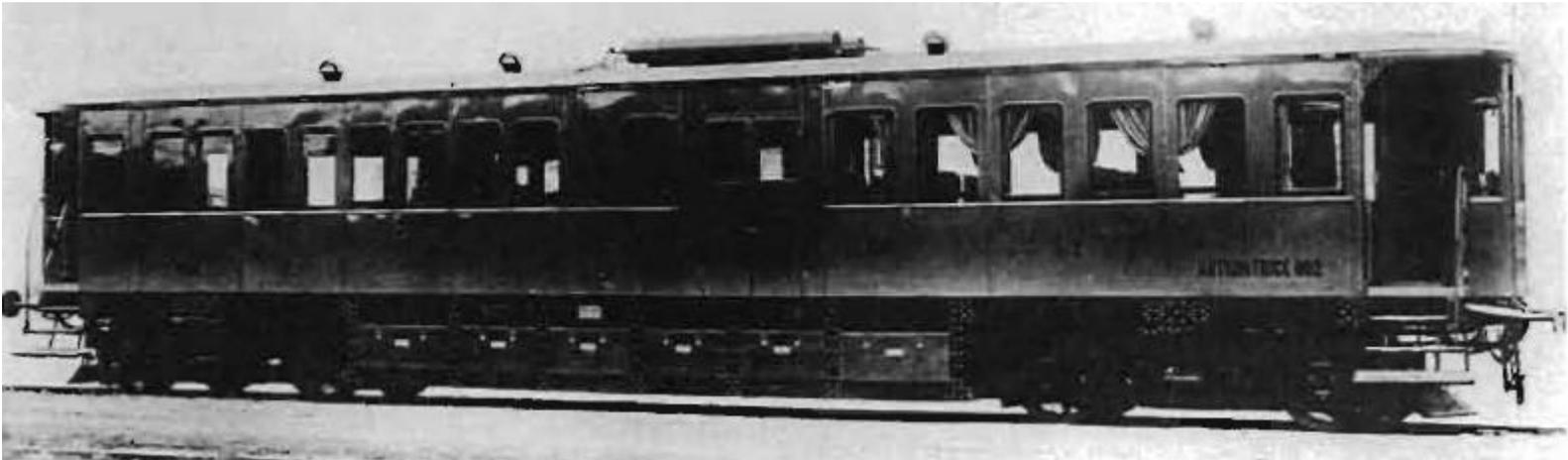


Fig. 1 Automotrice della Bologna-San Felice

I primi esperimenti

2. Corrente Continua

Milano – Varese 650 V cc terza rotaia (Società Mediterranea 1901)

Loc. E320

Caratteristiche principali

Potenza 1200 kW

Massa totale 71,8 t

Massa aderente 46,8 t

Velocità max 95 km/h

Prestazioni:

- treni viaggiatori da 220 t a 95 km/h
- treni merci da 400 t a 45 km/h

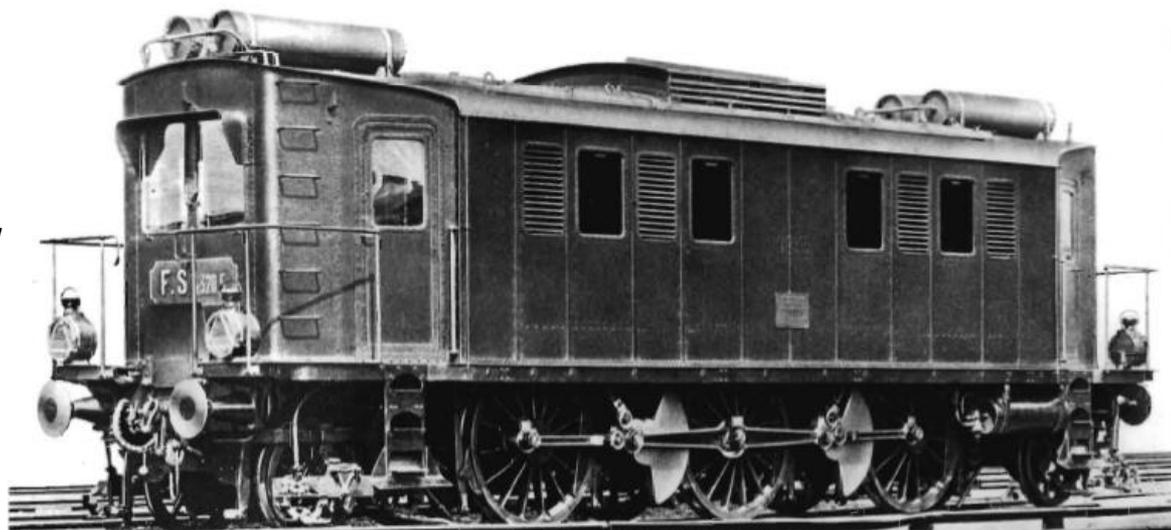


Fig. 2 Locomotiva Gr. E.320 (650 Vcc terza rotaia 1913)

I primi esperimenti

3. Corrente trifase 3400 V 15 periodi linee Valtellinesi (Lecco – Colico e Sondrio – Chiavenna) 1901

adottata successivamente sulla linea del Sempione

- Principali problemi:
 - Tensione e frequenza
 - Trasmissione del moto
 - Velocità
- Soluzioni adottate
 - Tensione 3400 V – max compatibile con l'isolamento
 - 15 periodi (la frequenza delle reti era 45 Hz) per avere motori relativamente lenti (trasmissione a bielle) bassa reattanza quindi ridotta sez. linea di contatto e > distanziamento sottostazioni elettriche
 - Per la velocità, inizialmente collegamento dei motori in cascata e successivamente variando il numero dei poli

I primi esperimenti

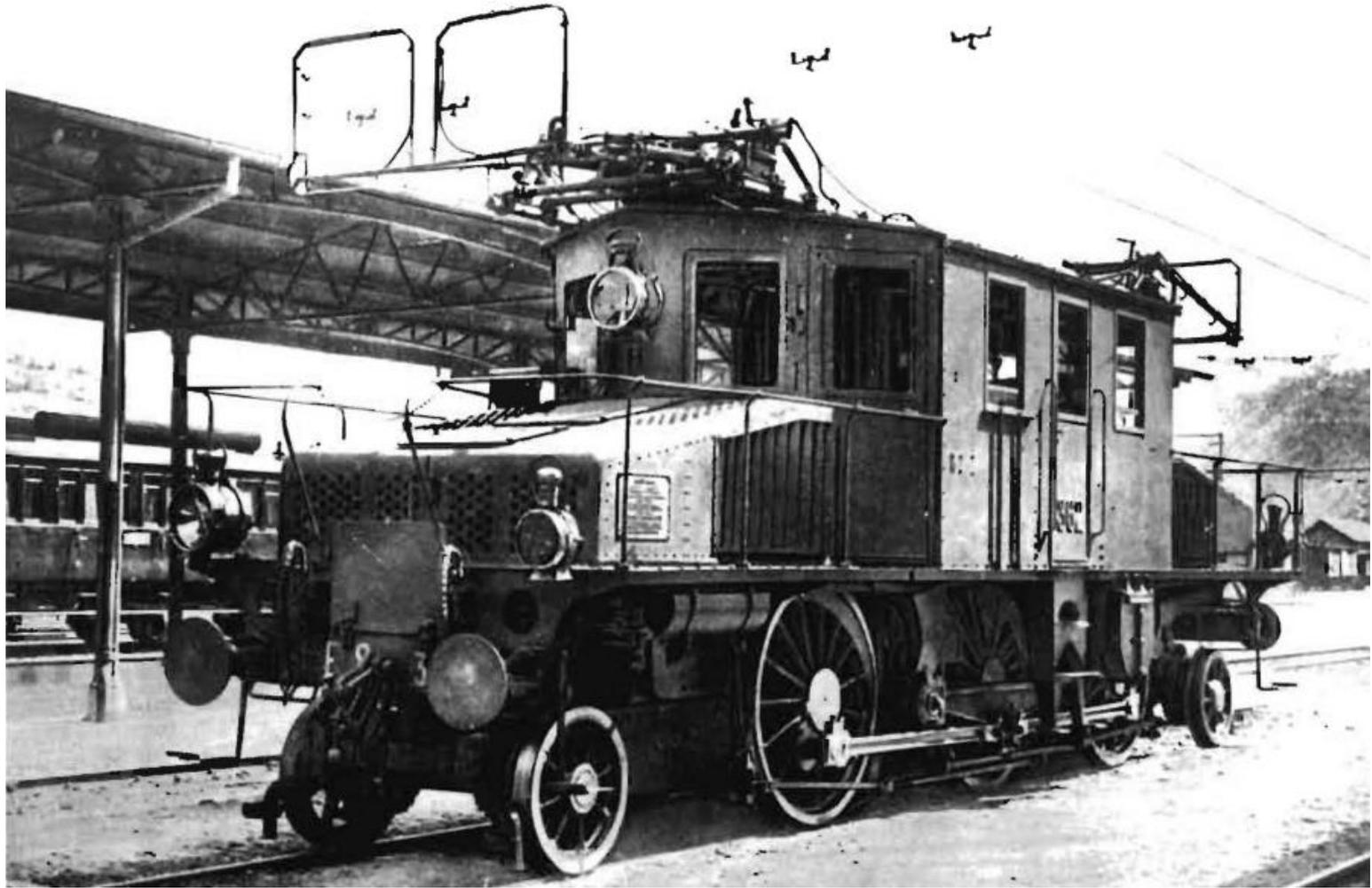


Fig. 3 Locomotiva Gr. E.360 sulla linea del Sempione

Le prime applicazioni del trifase

- 15 giugno 1905 costituzione delle Ferrovie dello Stato
- Tra i problemi prioritari: potenzialità linea dei Giovi
- Da Genova al Piemonte due linee: via Busalla e via Mignanego
- Con trazione a vapore 2000 carri/giorno pari a 36000 t/giorno
- Inizio lavori elettrificazione Pontedecimo – Busalla ai primi del 1907. Fine lavori 1916
- Dopo l'elettrificazione treni in doppia trazione con massa rimorchiata di 380 t a 50 km/h ogni 10'
- Frenatura elettrica a recupero
- Tutto il traffico merci sulla vecchia linea
- Doppia trazione per tutti i treni
- Massa rimorchiabile da ogni Loc. 190 t
- 45 km/h sia in salita che in discesa
- Per trainare 380 t a 45 km/h sul 35‰ servivano 1840 kW (2 loc. E550)

Confronto prestazioni TE-TV sul 35‰ (*)

Loc. vapore 470

- Massa 103 t
- Assi accoppiati 5
- Prestazione 170 t a 25 km/h



Fig. 4

Loc. trifase E 550

- Massa 60 t
- Assi accoppiati 5
- Prestazione 190 t a 45 km/h

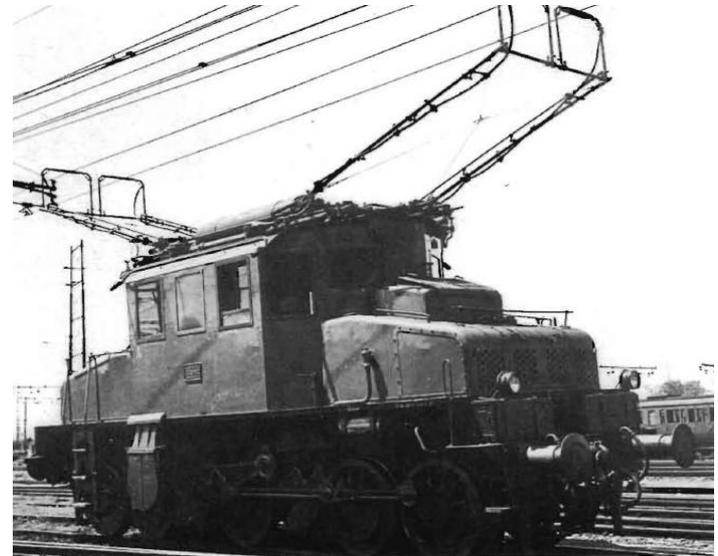


Fig. 5

(*) Max pendenza ammessa sulla rete FS (Tab. 35 P.G.O.S.)

Il trifase si espande

- Le prime locomotive furono le E 550, già citate e le E 551 (*)
- La tensione di alimentazione fu elevata da 3400 a 3600 V
- La frequenza fu portata nell'industria a 50 periodi e, di conseguenza, in FS fu elevata da 15 a 16,7 periodi
- Il parco si ampliò con nuove locomotive di pari passo con l'estensione dell'elettrificazione
- Le E 432 con 2200 kW, 3 velocità di regime (50-75-100 km/h) in parallelo ed una in "cascata" (25 km/h) e trasmissione con biella articolata, furono le ultime locomotive trifasi costruite dalla Breda a partire dal 1927 (40 unità) per le FS con ottimi risultati
- Alle prime elettrificazioni trifasi seguirono quelle della Savona-Ceva (1914), della Sampierdarena-Savona (1916), della Torino- Modane (1920) e delle linee ad esse collegate

(*) le E 551 differivano dalla E 550 per la potenza, 2000 kW invece di 1500, la massa 75 t invece di 70 t e lo sforzo di trazione max ai cerchioni: 13500 kg a 50 km/h contro 11500

Il trifase si espande

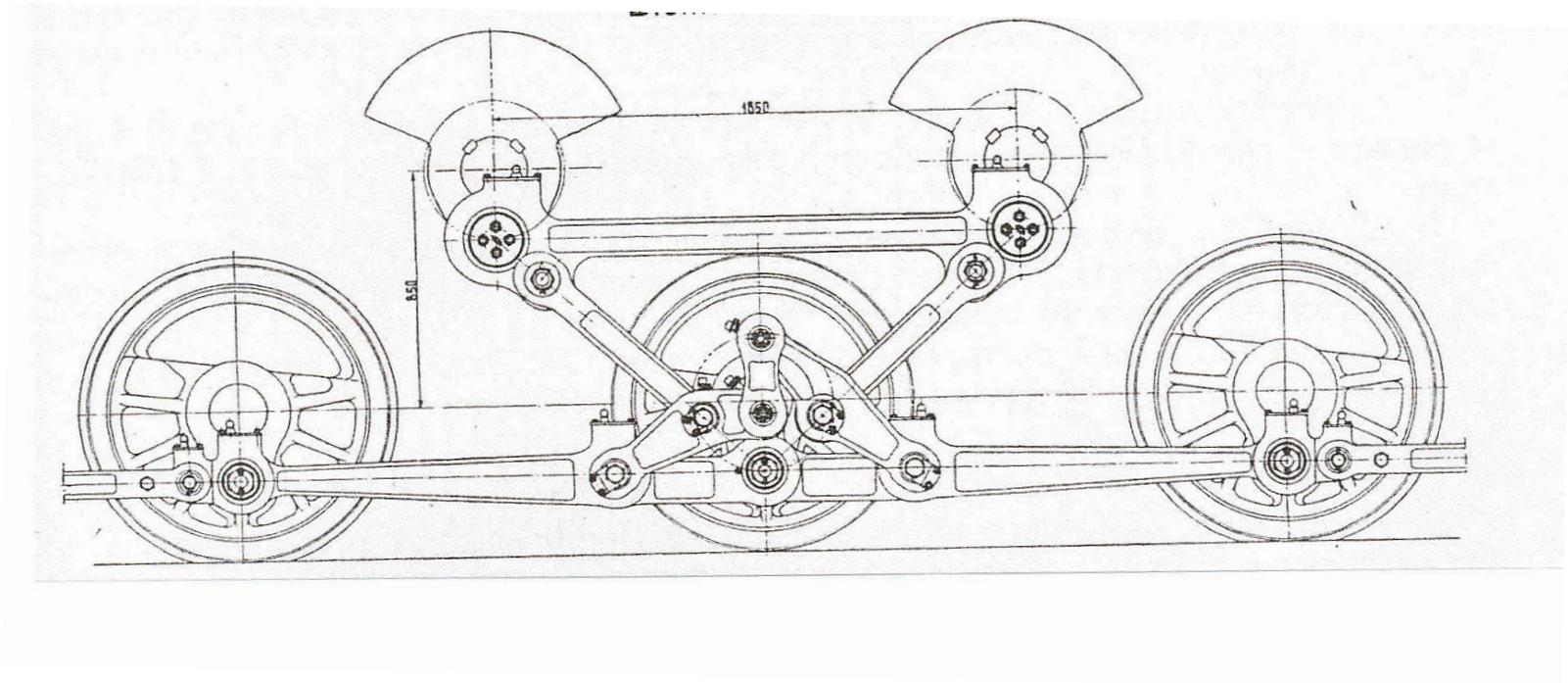


Fig. 6 – Biella articolata

Il trifase si espande

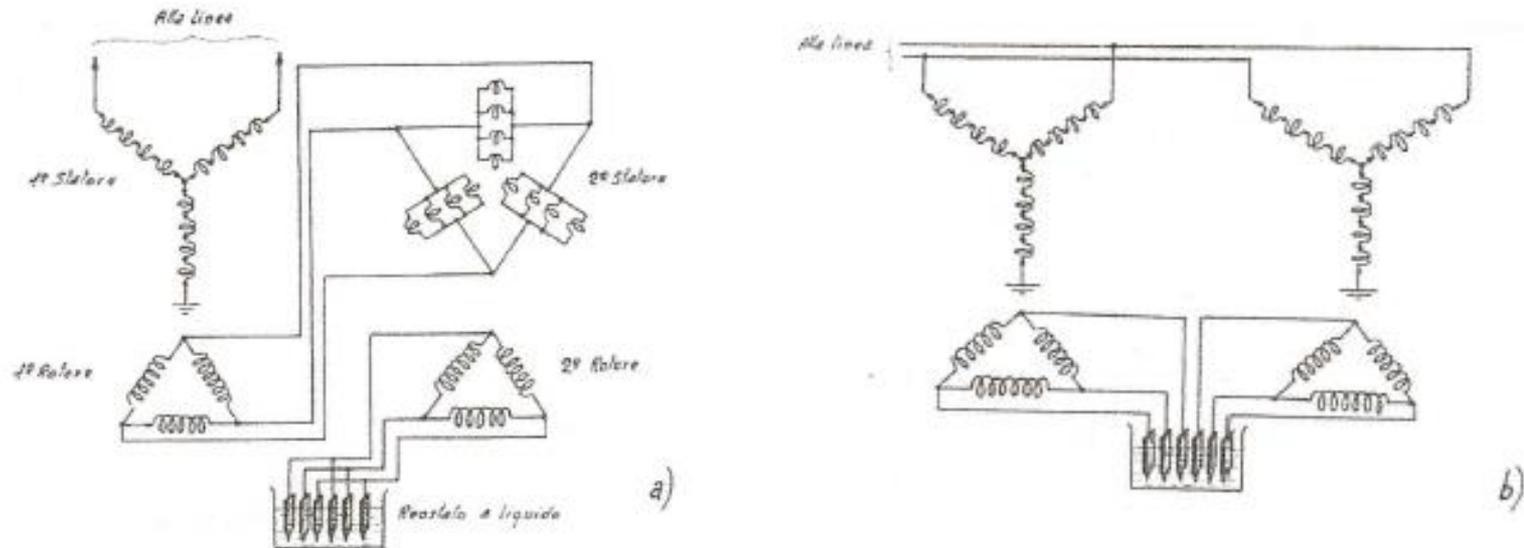


Fig. 7

Collegamenti elettrici dei motori trifase nelle vecchie locomotive a corrente alternata.

a) Collegamento in cascata.

b) Collegamento in parallelo.

Linee elettrificate in c.a. trifase 16,7Hz

Linea	km di linea	Doppio binario	Attivazione	Disattivazione
Lecco - Sondrio	79,3	—	1902	1952
Colico - Chiavenna	26,3	—	1902	1952
Genova P. - Ronco	61,1	61,1	1911/15	1961
Torino - Modane	104,4	79,3	1912/20	1961
Savona - Ceva	45,6	—	1914	1973
Lecco - Monza	37,3	6,9	1914	1950
Sampierdarena - Savona	39,9	29,9	1916	1965
Torino B. Sangone - Torre P.	54	—	1917/21	1961
Bussoleno - Susa	8	—	1919	1961
Bricherasio - Barge	11,7	—	1921	1961
Trofarello - Chieri	8,6	—	1921	1961
Torino Dora - Torino P.N. - Ronco	150,4	146,7	1921/22	1961
Ronco - Arquata - Tortona	36,3	36,3	1923	1961
Alessandria - Tortona - Voghera	38,1	38,1	1924	1961
Novi - Tortona	20,4	20,4	1924	1961
Scali marittimi porto di Genova	22,3	—	1924/26	1961
Genova P. - Viareggio	193,5	153,5	1925/26	1961
Bologna - Pistoia - Firenze	131,8	38,8	1927	1934
Sampierdarena - Ovada - Alessandria	73,7	9,4	1928	1961
Bolzano - Brennero	89,3	89,3	1928	1965
Trento - Bolzano	56	56		1952
Savona - Ventimiglia	108	18	1936	1968
Fossano - Cuneo (Ventimiglia)	122	—	1931/35	1973
Trofarello - Ceva (Via Bra)	86	15	1935	1961/73
Carmagnola - Ceva (Via Fossano)	73	73	1935	1973
Bivio Madonna Olmo - Borgo S. D.	12	—	1937	1960
Alessandria - S. Giuseppe di C.	82	7	1937	1976
Asti - Acqui - Ovada	60	—	1937	1974/76
Ceva - Ormea	35	—	1938	1973
S. Giuseppe - Altare - Savona	21	—	1954	1973
Totale	1887	878,7		

La locomotiva E 550 (il piccolo gigante dei Giovi)

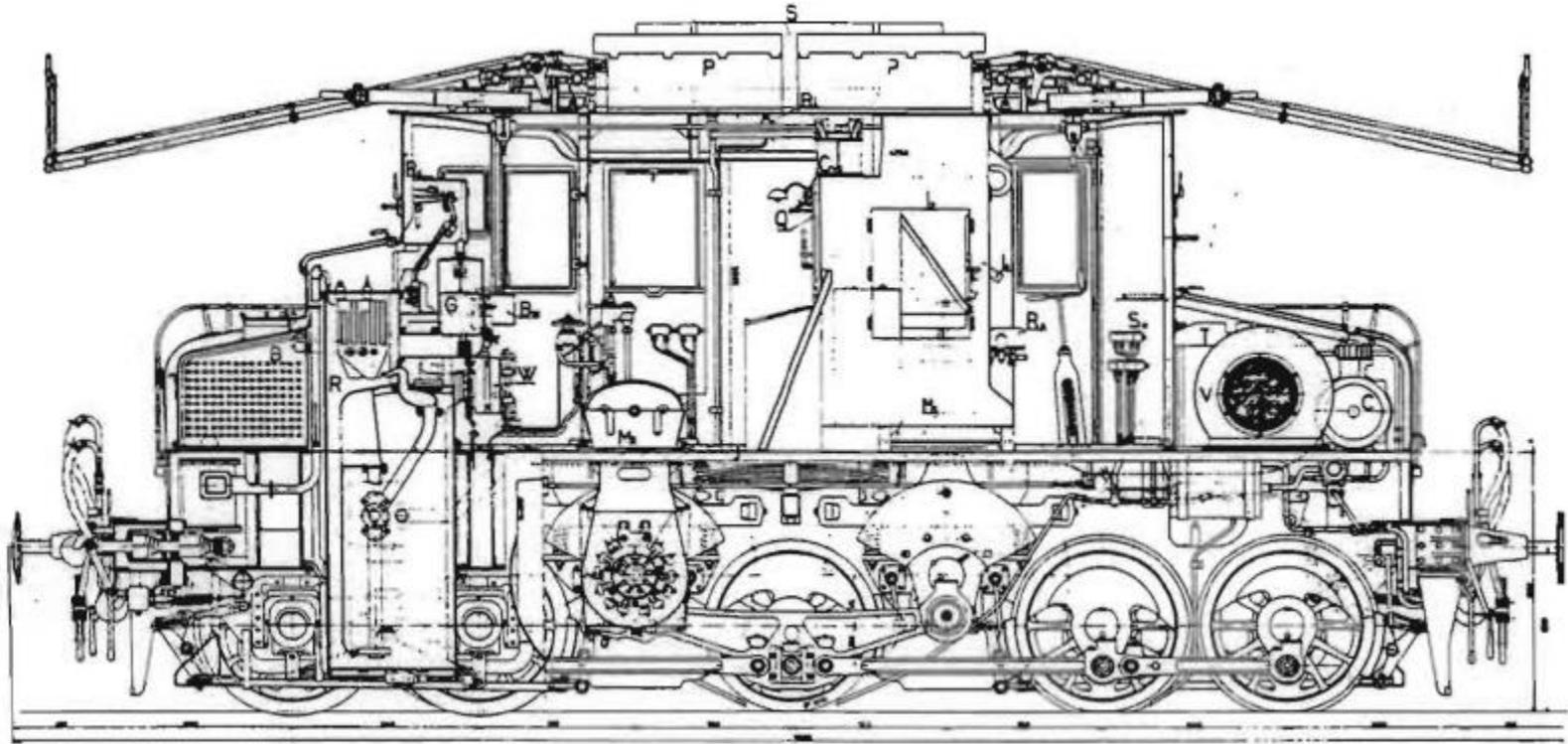


Fig. 8 Locomotiva Gr. E.550

La locomotiva E 550 (il piccolo gigante dei Giovi)

Caratteristiche principali delle E 550 (369 unità)

Rodiggio	E
Lunghezza tra i respingenti	9500 mm
Passo totale	6120 mm
Passo rigido	3840 mm
Diametro ruote motrici	1070 mm
Numero dei motori asincroni trifasi	2
Potenza oraria a 50 km/h	2x750 kW
Velocità con motori in cascata o in parallelo	25/50 km/h
Sforzo di trazione ai cerchioni a 50 km/h	120 kN
Massa totale aderente:	
dalla 001 alla 085	60,1 t
dalla 086 alla 110	61,4 t
dalla 111 in poi	62,3 t

Il trifase si espande



Fig. 9 - Locomotiva Gr. E.432

Il trifase si espande

Rodiggio	1' D 1'
Lunghezza tra i respingenti	13910 mm
Passo totale	12810 mm
Diametro ruote motrici	1630 mm
Diametro ruote portanti	1110 mm
Numero di motori asincroni trifasi	2
Potenza oraria alla velocità di 75 km/h	2 × 1100 kW
Velocità ottenibili mediante commutazione di poli (12, 8 e 6 poli) e collegamento cascata-parallelo (8 poli)	37,5/50/ 75 /100 km/h
Sforzi di trazione continuativi corrispondenti ai cerchioni	80/83/100/140 kN
Massa totale	93 t
Massa aderente	71 t

Caratteristiche della Locomotiva Gr. E.432

Vantaggi e limiti del sistema trifase

Principali vantaggi

- Perdite ridotte
- Buon rendimento
- Esercizio economico
- Frenatura elettrica

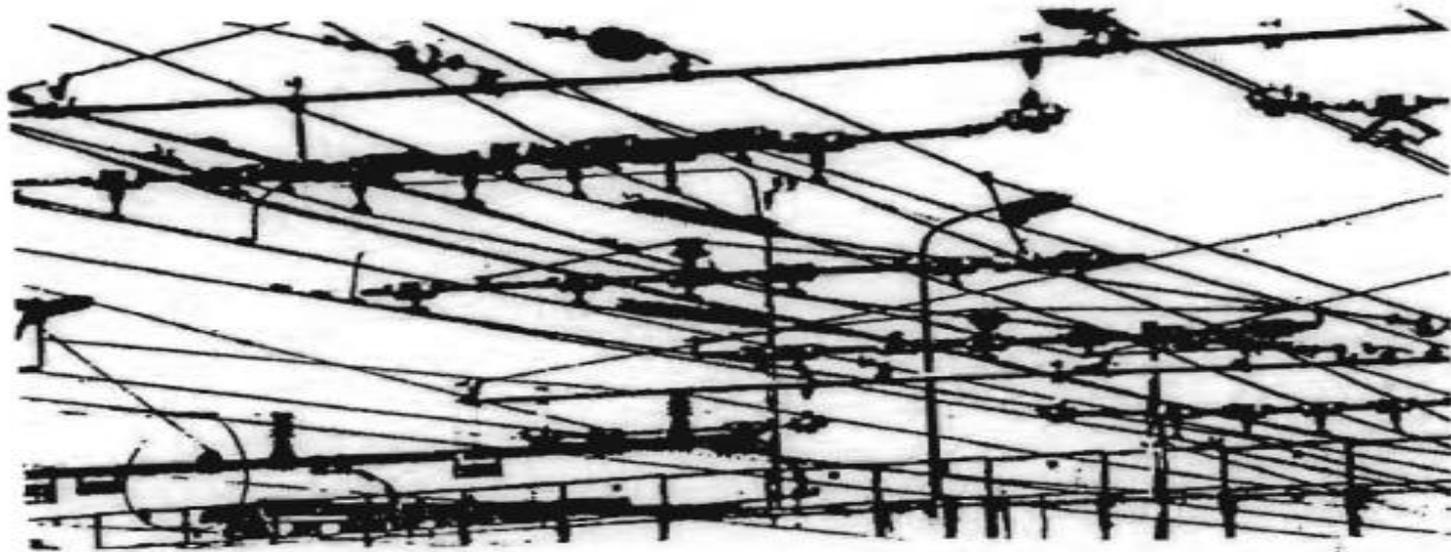


Fig. 10 – Linea di contatto trifase su uno scambio inglese

Vantaggi e limiti del sistema trifase

Principali inconvenienti

- Linea di contatto bifilare
- Conseguenti complicazioni costruttive e di esercizio
- Velocità di regime in numero limitato
- Velocità max 100 km/h, invalicabile con linea di contatto a due fili
- Conseguente frequenza di guasti e maggiore indisponibilità di mezzi
- Difficoltà di mantenere continuità meccanica ed elettrica linea di contatto su scambi e incroci
- Necessità di gruppi rotanti di conversione di frequenza
- Complicazioni e perditempi per “cambi trazione” nelle stazioni di confine tra i due sistemi (trifase e c.c.)
- Per limitare questi, furono realizzati complessi motrice in c.c. - rimorchiata con pantografi per linea trifase ed apparecchiatura per la conversione in c.c.

Vantaggi e limiti del sistema trifase



Fig. 11 – Convoglio bitensione ad Acqui Terme nel 1974 (foto W. Hardmeier)

La corrente continua comincia ad affermarsi

- Nel 1920 la rete italiana elettrificata comprendeva 913,4 km, di cui 767,4 in trifase
- Nel frattempo altri sistemi si erano andati sviluppando:
 - Monofase in Svizzera
 - Continua negli USA
 - Trifase a frequenza ferroviaria in Italia
- Poiché nessuno dei tre si era dimostrato superiore agli altri, fu deciso di proseguire col trifase
- Fu deciso, tuttavia, di sperimentare la corrente continua, che fu adottata dalle Nord Milano (3000 V c.c.) e dalla Torino-Ciriè-Lanzo (4000 V c.c.)
- Nel 1919 deliberata l'elettrificazione di 6000 km di linee e nel 1920 decisa quella in c.c. 3000 V nella Foggia-Benevento e di altre linee del Sud
- Si delineava così quello che sarebbe stato per lunghi anni l'assetto della rete elettrificata:
 - Completamento dell'elettrificazione delle linee del Nord col sistema trifase
 - Adozione dapprima sperimentale (Foggia-Napoli) e poi definitiva della corrente continua 3000 V al Centro-Sud, al di sotto della trasversale Pisa-Firenze-Faenza
 - In questo contesto apparve la Loc. E 626 che ebbe un'ampia diffusione

La corrente continua comincia ad affermarsi



Fig. 12 - Locomotiva Gr. E.626

L'esperimento a corrente trifase 10000 V 45 periodi

- La cosiddetta frequenza ferroviaria (16,7 periodi) richiedeva appositi Impianti per produzione e trasmissione dell'energia.
- Essa permetteva però:
 - Impiegare motori non troppo veloci ed evitare le trasmissioni ad ingranaggi, non ancora affidabili.
 - Di contenere le cadute di tensione in linea e, quindi, di aumentare le distanze tra le sottostazioni.
- Nel 1927, però, studi ed esperimenti avevano mostrato la possibilità di elevare la tensione molto al disopra dei 3000-3300 V compensando così le cadute di tensione derivanti da una eventuale frequenza $> 16,7$ periodi.

L'esperimento a corrente trifase 10000 V 45 periodi

- Nel 1927 pertanto fu deciso di sperimentare il sistema a frequenza industriale (45 periodi) 10000 V sulla Roma-Sulmona, linea con forti pendenze lunga 172 km di cui 20 in galleria.
- Le sottostazioni risultarono semplificate per l'identità della frequenza a quelle della rete di distribuzione e maggiormente distanziate per il più elevato valore della tensione e le conseguenti più limitate cadute.
- Per l'esercizio furono costruite le locomotive E472 (1925), E470 (1927) ed E570 (1927) dotate di un trasformatore riduttore e di ingranaggi che trasmettevano il moto ad una biella triangolare.
- I risultati furono discreti ed il sistema rimase in esercizio fino alla 2^a guerra mondiale che ne distrusse gli impianti.

L'esperimento a corrente trifase 10000 V 45 periodi

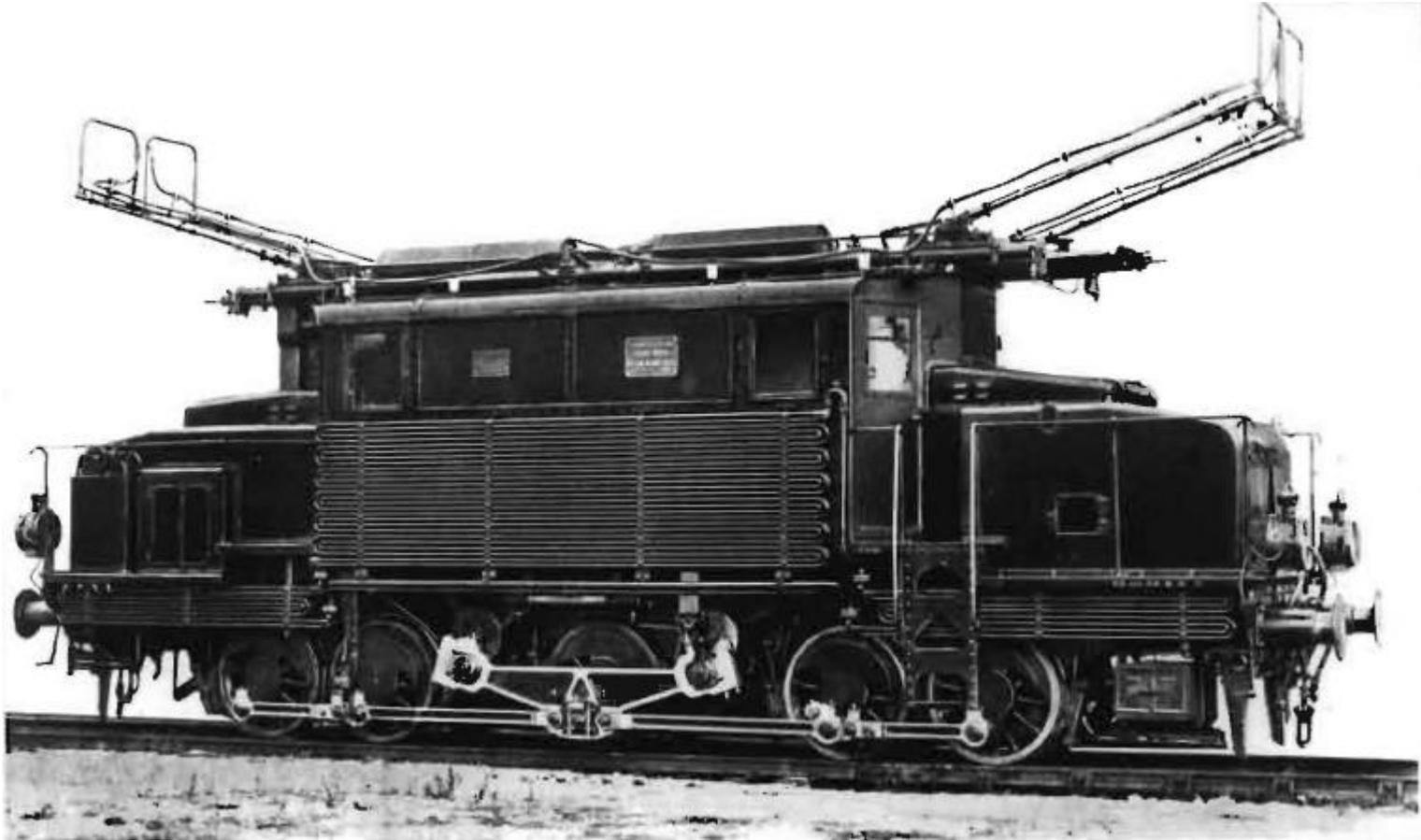


Fig. 15 – Loc. Gr. E570

Il tramonto del trifase e la definitiva affermazione della continua

- Il 3000 V c.c. sulla Benevento-Foggia nel 1928 mostrò la possibilità d'impiego di motori veloci a c.c. e dei primi raddrizzatori a vapore di mercurio.
- Le elevate affidabilità e prestazioni, la semplicità della linea di contatto (non più bifilare) la grande elasticità di marcia delle locomotive (caratteristica iperbolica del motore a c.c. eccitato in serie) avevano orientato la scelta in modo definitivo.
- Furono elettrificate in c.c. la Napoli-Reggio Calabria, la Napoli-Roma-Bologna-Milano, la Roma-Genova, ecc.
- Mentre il 3000 c.c. si espandeva il trifase arrestò il suo sviluppo e ne derivò il duplice sistema di cui si è detto.
- Pertanto nel 1939 fu deciso di trasformare a 3000 c.c. tutte le linee, a cominciare da quelle a terza rotaia, anche per rinnovare impianti e mezzi ormai obsoleti e inadeguati, ma la 2^a guerra mondiale arrestò tutto.

Il tramonto del trifase e la definitiva affermazione della continua

- Negli anni '50, completata la ricostruzione, si pose il problema della rete Ligure-Piemontese, del Brennero, ecc.
- All'inizio degli anni '60 cominciò la trasformazione in c.c. delle linee ad intenso traffico afferenti a Torino, Genova e Voghera.
- Il declino del trifase, iniziato nel 1952 con la trasformazione della Lecco-Sondrio e della Colico-Chiavenna, si concluse con quella della Alessandria-S. Giuseppe di Cairo il 25 maggio 1976.
- Dopo l'arrivo ad Arquata Scrivia di quell'ultimo treno a trazione trifase fu dato lo storico "fermo" al grande macchinario di conversione di Arquata.
- Questo fu il "canto del cigno" del sistema dopo 75 anni di onorato servizio.

Il tramonto del trifase e la definitiva affermazione della continua

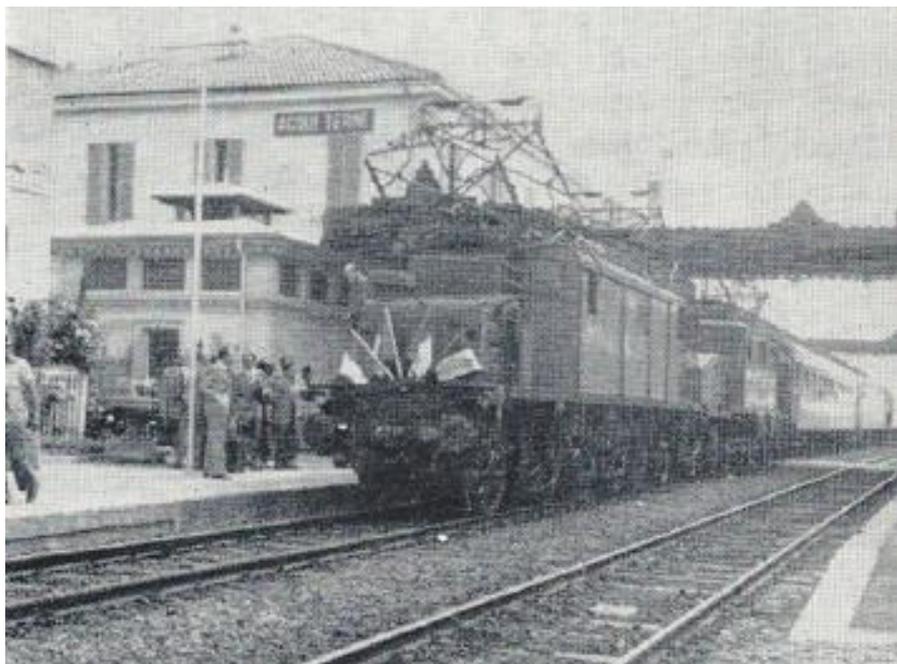


Fig. 16 – L'ultimo treno trifase entra in stazione di Acqui Terme (foto CIFI)



Fig. 17 – Il primo treno a cc parte da Acqui Terme (foto CIFI)

I mezzi di trazione a corrente continua

- Alla decisione di procedere ad un vasto programma di elettrificazioni a 3000 V a c.c., seguì quella di realizzare un adeguato parco di locomotive.
- Fissato in 20 t/asse il limite di peso assiale furono progettate le seguenti locomotive:
 - E 626 per treni viaggiatori e merci su linee di montagna.
 - E 326 per treni rapidi e leggeri su linee di pianura
 - E 428 per treni viaggiatori e pesanti su linee di pianura a forte traffico.

I mezzi di trazione a corrente continua

Anni di costruzione	1928-39
Numero di unità	385
Potenza oraria	6 × 350 kW
Potenza continuativa	1890 kW
Rapporti di trasmissione (1)	21/76 24/73
Velocità massima	95 95 km/h
Rodiggio	B ₀ 'B ₀ 'B ₀ '
Diametro ruote motrici	1250 mm
Lunghezza totale	14950 mm
Passo totale	11550 mm
Massa in servizio e aderente	93 t

(1) Rapporto 21/76 104 unità
» 24/73 281 »

Caratteristiche della Loc. E626

I mezzi di trazione a corrente continua



Fig. 19 – Locomotiva Gr. E326

I mezzi di trazione a corrente continua

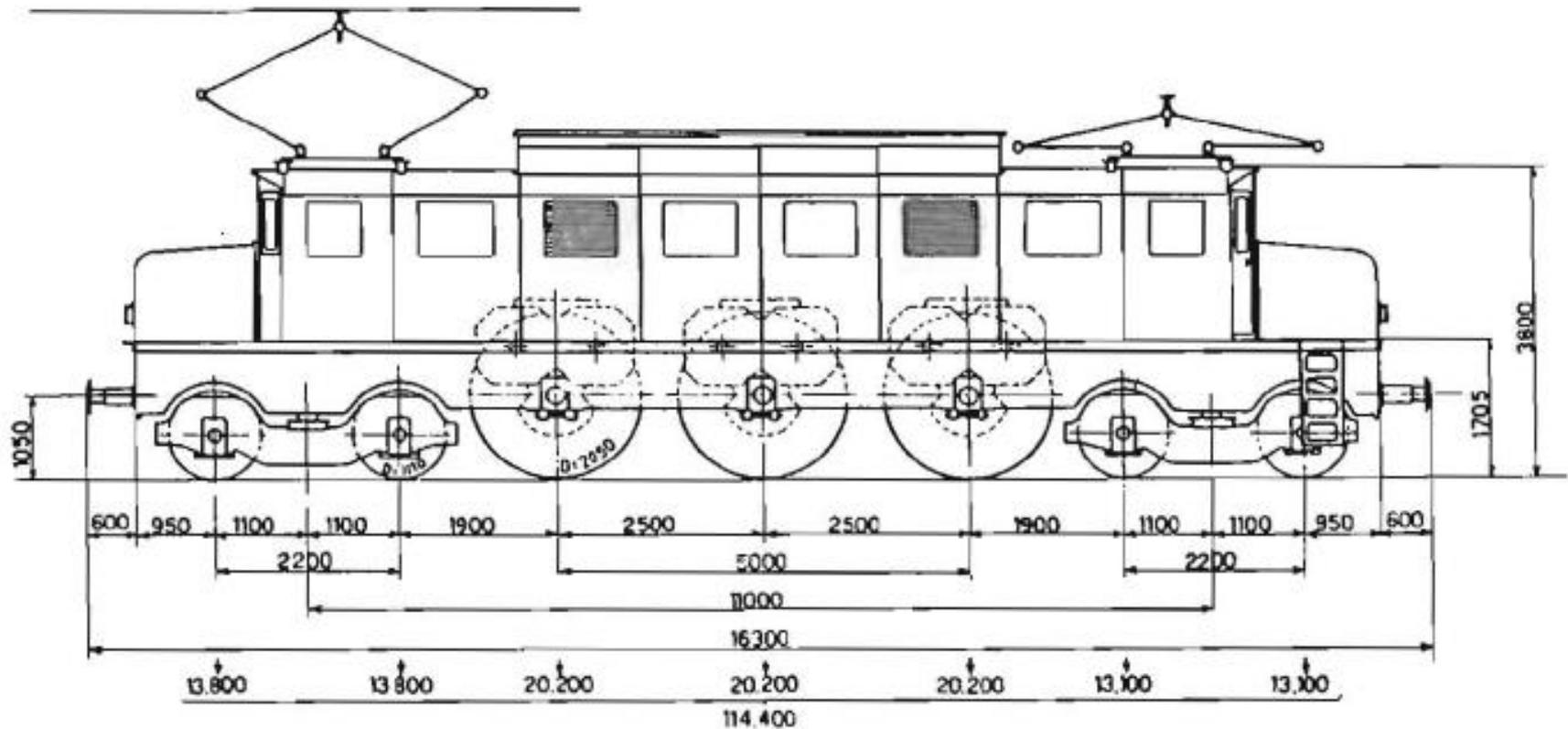


Fig. 20 Locomotiva Gr. E.326

I mezzi di trazione a corrente continua

Anni di costruzione	1930-33
Potenza oraria	6 × 350 kW
Potenza continuativa	1890 kW
Rapporto di trasmissione	29/103
Velocità massima	90 km/h
Rodiggio	2'C _o 2'
Diametro ruote motrici	2050 mm
Lunghezza totale	16300 mm
Passo totale	13200 mm
Massa in servizio	114,4 t
Massa aderente	60,6 t

Caratteristiche Loc. E326

I mezzi di trazione a corrente continua



Fig. 21 – Locomotiva Gr. E428 (123 – 203)

I mezzi di trazione a corrente continua



Fig. 22 – Locomotiva Gr. E428 (001 – 122)

I mezzi di trazione a corrente continua

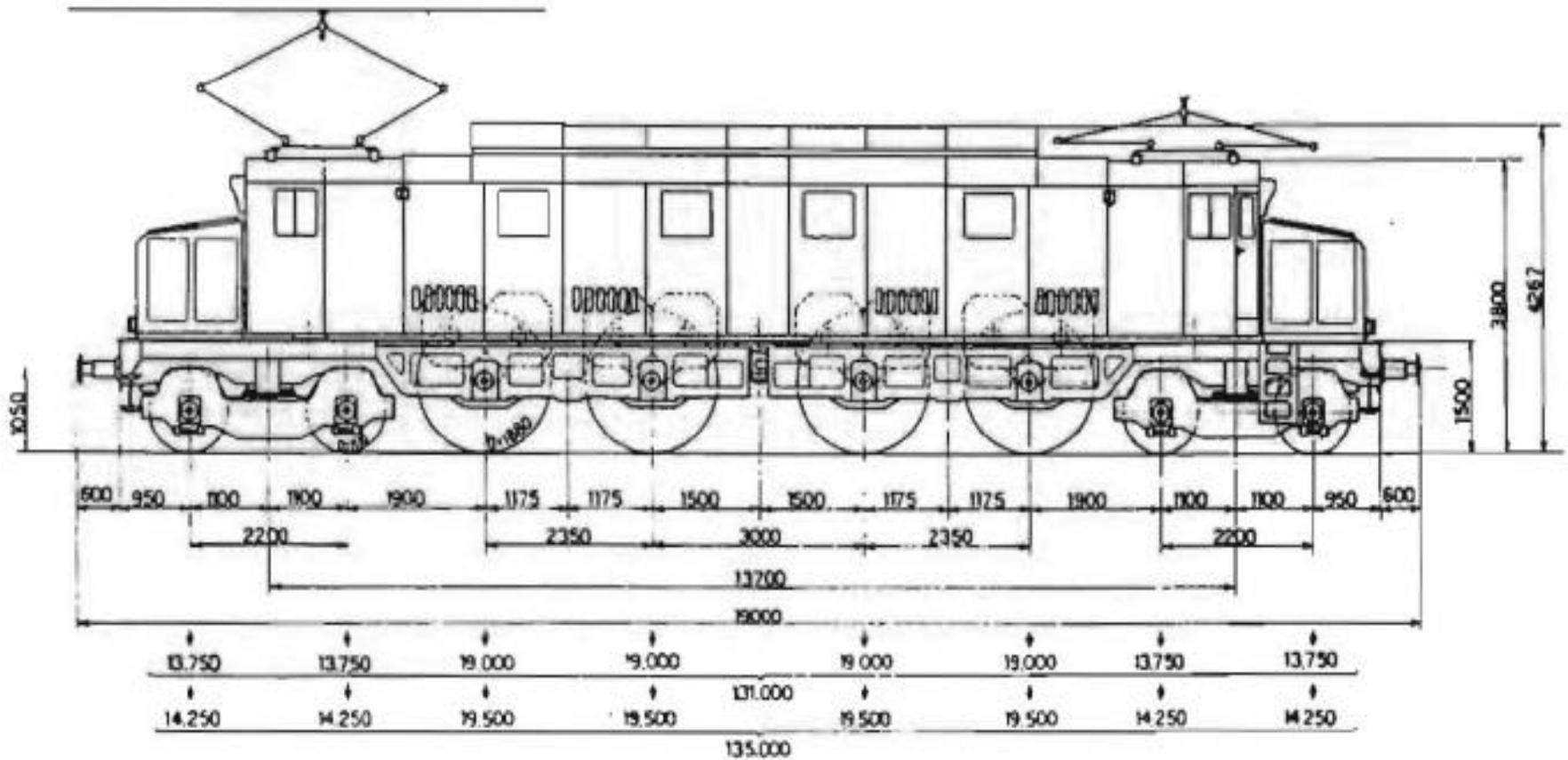


Fig. 23 - Locomotiva Gr. E.428

I mezzi di trazione a corrente continua

	E. 428.001 ÷ 122	E. 428.123 ÷ 203	E. 428.204 ÷ 242
Anni di costruzione	1934-38	1939-40	1939-43
Numero di unità	117	79	37
Potenza oraria	8 × 350 kW	8 × 350 kW	8 × 350 kW
Potenza continuativa	2520 kW	2520 kW	2520 kW
Rapporti di trasmissione (1)	29/103 31/101	29/103 31/101	29/103 31/101
Velocità massima (2)	100/100 km/h	100/100 km/h	100/100 km/h
Rodiggio	(2'B _o) (B _o 2')	(2'B _o) (B _o 2')	(2'B _o) (B _o 2')
Diametro ruote motrici	1880 mm	1880 mm	1880 mm
Lunghezza totale	19000 mm	19000 mm	19000 mm
Passo totale	15900 mm	15900 mm	15900 mm
Massa in servizio	136 t	136 t	136 t
Massa aderente	78 t	78 t	78 t

(1) Rapporti
 » 29/103 47 unità 29/103 54 unità 29/103 15 unità
 » 31/101 70 » 31/101 25 » 31/101 22 »

(2) Vel. max fu ridotta per entrambi i rapporti di trasmissione a 100 km/h per limitare l'usura del binario trattandosi di locomotive molto aggressive

Caratteristiche Loc. E428

I mezzi di trazione a corrente continua

- Queste locomotive, ed in particolare le E626 e le E428, assicurarono per molti anni la maggior parte dei servizi.
- Nel 1940 apparvero le E636 che, col rodiggio Bo' Bo' Bo' e la cassa suddivisa in due semicasse, diedero inizio ad una soluzione costruttiva ripresa in locomotive successive , dotata di elevata aderenza, ottima per la configurazione delle linee FS .
- Con 460 unità il Gruppo E636 fu il più numeroso fino all'arrivo delle E464 con 717 unità (di cui 110 Trenord), l'ultima delle quali consegnata recentemente.

I mezzi di trazione a corrente continua

- La soluzione con due semicasse e tre carrelli motori (Loc. E636) trovò applicazione nel 1958-59 sulle successive locomotive dei Gruppi E645 ed E646 e nel 1975 su quelle del Gruppo E656.
- Questa configurazione rimase unica al mondo, con l'eccezione di 2 locomotive svizzere da cui deriva e di 7 locomotive con scartam. 1067 mm. delle Ferrovie della Nuova Zelanda.
- Naturalmente le prestazioni dei gruppi più recenti erano ben più elevate di quelle dell'E636.

I mezzi di trazione a corrente continua



Fig. 24 - Locomotiva Gr. E.636

I mezzi di trazione a corrente continua

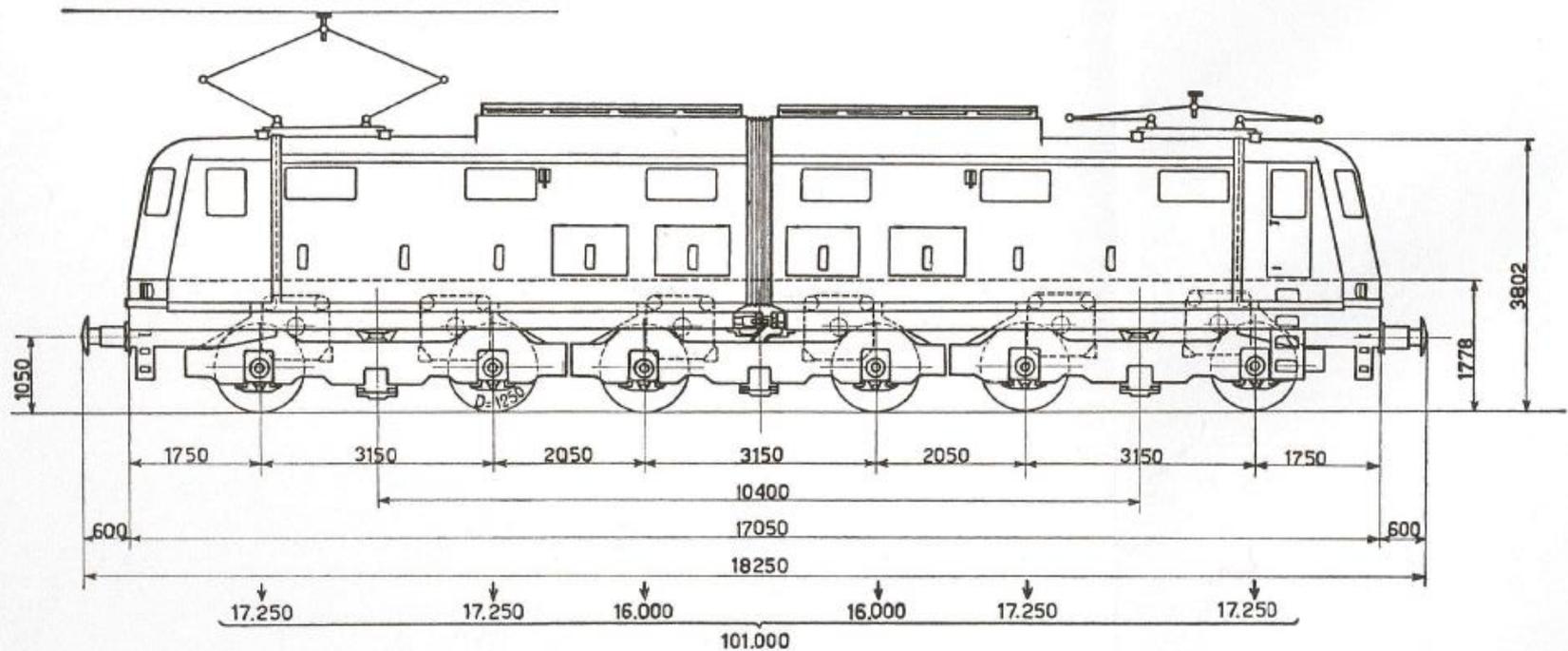


Fig. 25 - Locomotiva Gr. E.636

I mezzi di trazione a corrente continua

Anni di costruzione	1940-62
Numero di unità	460
Potenza oraria	4 × 350 kW
Potenza continuativa	1890 kW
Rapporti di trasmissione (1)	21/65 24/74 28/65
Velocità massima	110 / 110 / 120 km/h
Rodiggio	B ₀ B ₀ B ₀
Diametro ruote	250 mm
Lunghezza totale	18250 mm
Passo totale	13550 mm
Massa in servizio e aderente	101 t

(1) Rapporti 21/65 417 unità
» 24/74 1 »
» 28/65 42 »

Caratteristiche Loc. Gr. E.636

I mezzi di trazione a corrente continua

- Con l'estensione delle elettrificazioni vennero realizzati tra gli anni '60 e gli '80 altri Gruppi di locomotive, alcune ancora in funzione.
- Meritano un cenno tra queste le E444, le E645, le E646 e le E656.
- La E444 fu realizzata per effettuare treni con velocità maggiore di 140 km/h, accessibili fino ad allora solo ai mezzi leggeri (Ale ed ETR).
- Il raggiungimento di una velocità max di 180 km/h nelle unità della prima serie e di 200 km/h nelle successive impose l'adozione di un'elevata potenza per asse, di carrelli di concezione nuova e della frenatura elettrica.

I mezzi di trazione a corrente continua



Fig. 26 – Loc. E 444 ed E402B

I mezzi di trazione a corrente continua

- I buoni risultati forniti dalle E636, Gruppo più numeroso del parco FS, indussero a ripeterne le caratteristiche fondamentali nelle nuove E646 e nella loro versione “merci” E645, destinate a realizzare prestazioni più elevate.
- Le E646 sono dotate anch’esse di una cassa articolata poggiante su tre carrelli a due assi ciascuno.
- Questi sono simili a quelli delle E636, con migliore qualità di marcia e minori sollecitazioni del binario, grazie all’abbassamento del baricentro ed alla riduzione del passo (da mm 3150 a mm 2850).
- Ciò grazie all’impiego di motori doppi, con potenza maggiore e minore ingombro, dotati di un’unica carcassa con due indotti in serie tra loro.
- Dotati di sei poli con eccitazione serie ed avvolgimenti compensatori permettono un funzionamento regolare anche con una percentuale di shuntaggio dei campi del 65%.

I mezzi di trazione a corrente continua



Fig. 27 – Loc. E646

I mezzi di trazione a corrente continua

- Le E646 subentrarono alle E428 sulle linee principali, con aumento della massa rimorchiata ed eliminazione delle “spinte” sulle tratte acclivi.
- Infatti una E646 a 130 km/h nella combinazione di parallelo col massimo grado di shuntaggio assorbe 2520 kW, pari al 91% della potenza continuativa, e può trainare, in piano, 700 t. Alla stessa velocità una E428 (rapp.31/101) assorbe 1320 kW, pari al 52% della potenza continuativa, e può trainare, in piano, solo 260 t.
- Nei primi anni '80 tutte le E646 furono trasformate col telecomando e quindi adibite al servizio con treni “reversibili”.
- Le E645 differiscono dalle E646 per:
 - Rapporto di trasmissione
 - Velocità massima
 - Massa
 - Dispositivo anticabraggio

I mezzi di trazione a corrente continua

- Nei primi anni '70 si rese necessaria la fornitura di nuove locomotive per treni viaggiatori pesanti su linee fondamentali. Le loc più recenti erano le E444, ma dotate di 4 assi motori e quindi poco adatte per motivi di aderenza.
- Cominciavano anche all'estero le prime applicazioni dell'elettronica di potenza, ma si trattava di tecnologie non ancora "mature" per costruzioni di serie.
- Dati i buoni risultati forniti dalle E645 ed E646 fu deciso di replicare questo tipo di macchina con le modifiche ed i miglioramenti suggeriti dall'esperienza dell'esercizio.
- Le E656 differiscono dalle E645/646 per alcune innovazioni concernenti principalmente la cassa, i motori di trazione, i circuiti di comando e blocco e gli ausiliari.
- I motori di trazione hanno classi d'isolamento più elevate (F per gli statori ed H per gli indotti). Ciò ha permesso di elevare la potenza della locomotiva dell'11%.
- E444 ed E656 sono ancora in esercizio, anche se, per lo più, solo fino alla scadenza chilometrica per la prossima riparazione ciclica

I mezzi di trazione a corrente continua

- I mezzi costruiti fino ai primi anni '70 furono interamente progettati dagli Uffici Studi del Servizio Materiale e Trazione di Firenze.
- Non potendo evidentemente qui entrare nel dettaglio dei singoli Gruppi, si farà cenno ad alcuni elementi comuni.
- I motori di trazione sono del tipo classico, eccitati in serie, e con classi di isolamento crescenti (gli ultimi in classe H).
- La regolazione della velocità avviene variando la tensione d'alimentazione ed il flusso d'induzione dei motori.

I mezzi di trazione a corrente continua

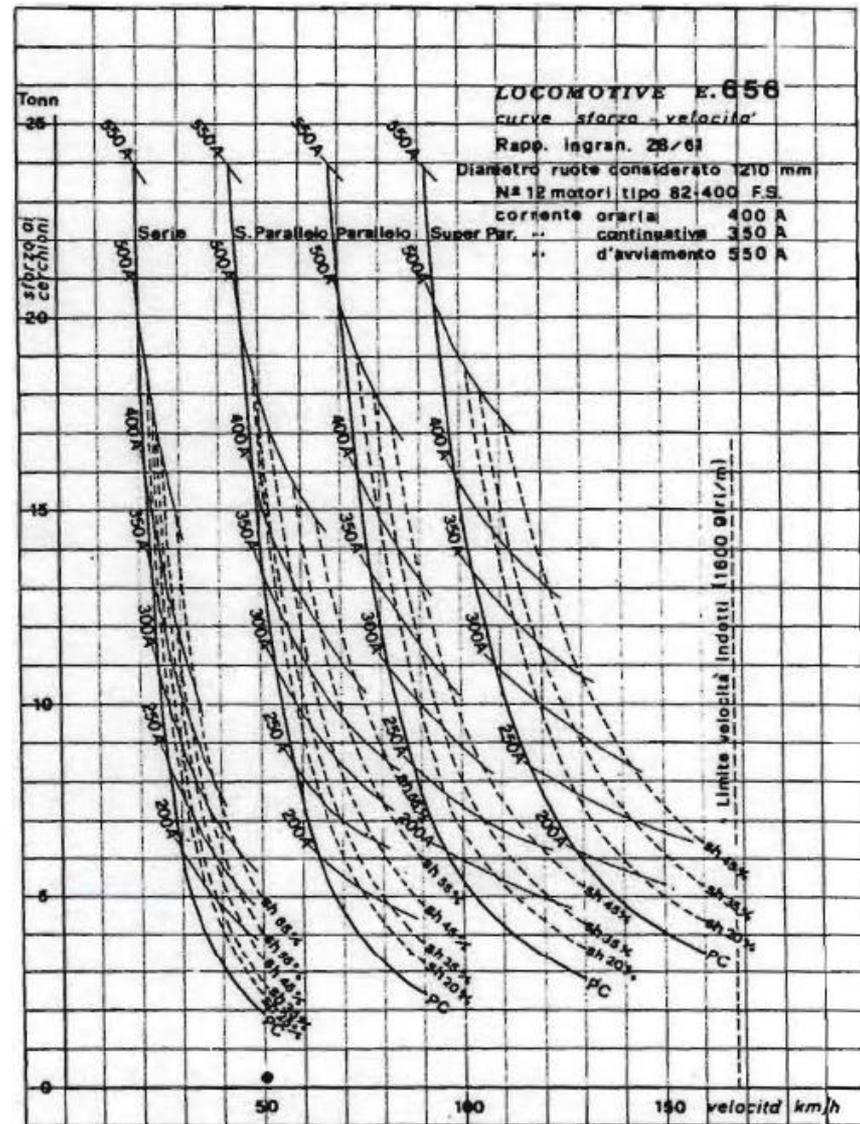
- La prima si gradua disponendo in serie ai motori una resistenza di elevato valore (regolazione reostatica), che determina una caduta di tensione e ricorrendo a varie combinazioni dei motori.
- All'avviamento sono disposti in serie e la corrente (e la coppia motrice) possono essere mantenuti prossimi ai valori max consentiti dall'aderenza riducendo la resistenza del reostato al crescere della velocità, fino alla sua esclusione.
- A questo punto la combinazione viene cambiata da un'unica serie di n motori a 2 di $n/2$ disposte in parallelo tra loro (serie-parallelo) e facendo ancora uso del reostato fino alla sua esclusione.

I mezzi di trazione a corrente continua

- Il procedimento viene ripetuto fino a ridurre i motori in serie per ciascun ramo a due, per avere ai morsetti di ciascuno di essi $V_{max} = 1500$ V.
- L'esclusione del reostato avviene mediante contattori elettropneumatici comandati dal banco di manovra, dal quale si effettua anche la combinazione dei motori attraverso un servomotore (combinatore).
- La variazione del flusso d'induzione si effettua escludendo alcune spire degli avvolgimenti di campo o disponendo in parallelo agli stessi delle induttanze.

I mezzi di trazione a corrente continua

Fig. 28 - Curve sforzo di trazione - velocità di una Locomotiva Gr. E656



I mezzi di trazione a corrente continua

- Le E656, destinate a sparire via via che raggiungono le scadenze chilometriche per le riparazioni cicliche, sono state costruite in un arco di 14 anni
- Ne derivano differenze soprattutto per la scomparsa dei gruppi rotanti e l'adozione di gruppi statici
- Alcune unità, divenute E655, sono state modificate per il servizio merci, con adozione di un rapporto di trasmissione più «corto» e conseguente riduzione della velocità max a 120 km/h.

I mezzi di trazione a corrente continua



Fig. 29 – Loc. Gr. E656

I mezzi di trazione a corrente continua

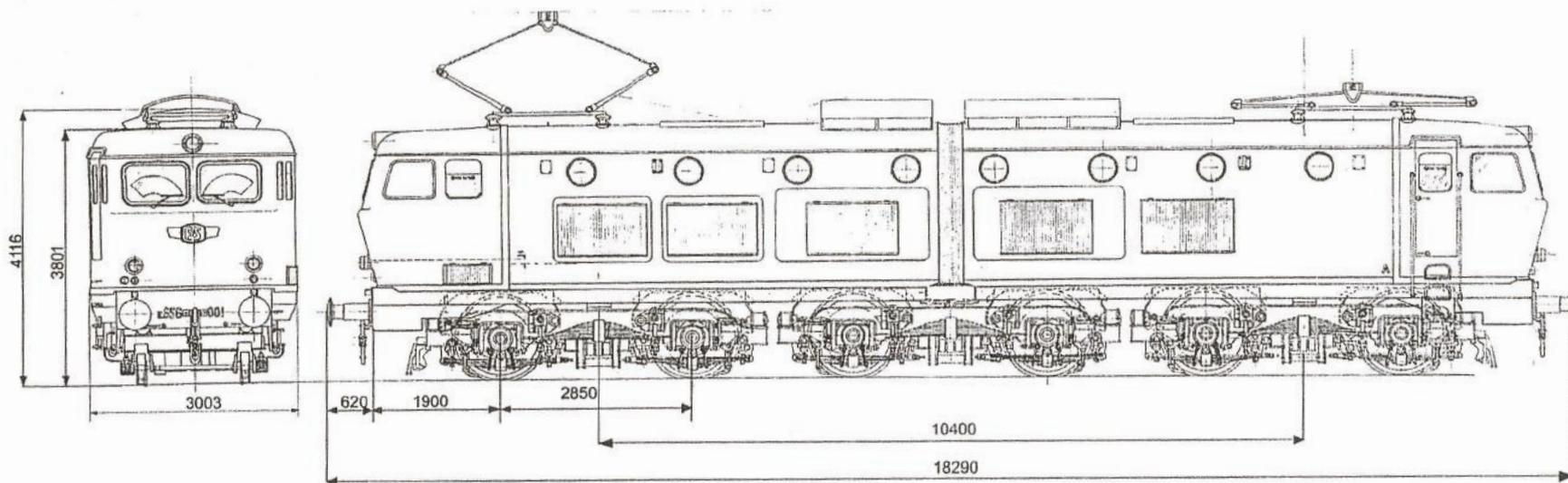


Fig. 30 – Loc. Gr. E656

I mezzi di trazione a corrente continua

Anni di costruzione	1975 - 1989
Potenza oraria	12 × 400 kW
Potenza continuativa	4200 kW
Rapporto di trasmissione	28/61
Velocità massima	150 km/h
Rodiggio	B ₀ B ₀ B ₀
Diametro ruote	1250 mm
Lunghezza totale	18290 mm
Passo totale	13250 mm
Massa in servizio e aderente	120 t

Caratteristiche della Loc. Gr. E656

I mezzi di trazione a corrente continua

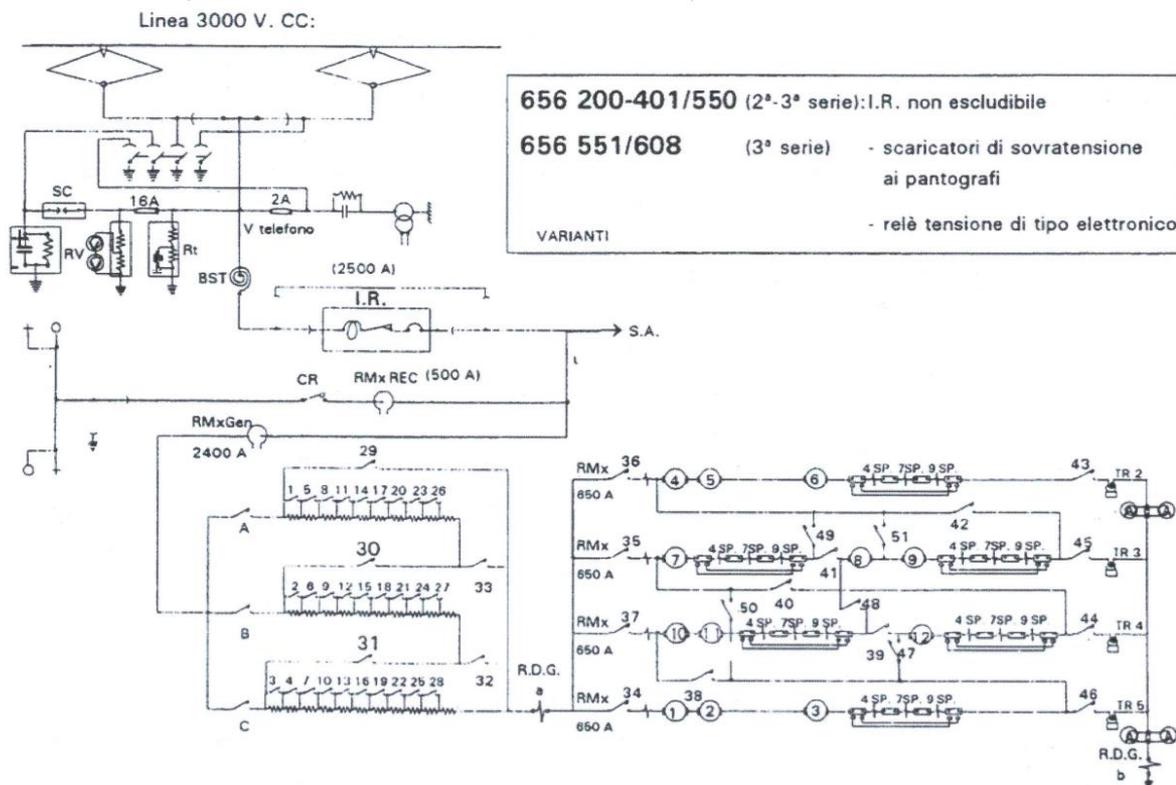


Fig. 31 – Schema elettrico Loc. Gr. E656

I mezzi di trazione a corrente continua

- Al 31.12.1980 l'estensione complessiva delle linee elettrificate era di 8743 km pari al 54% della rete (16067 km).
- Su di esse si svolgeva un traffico di 221,8 milioni di treni km pari al 74% del totale.
- Di questo 186,4 milioni di treni km, pari all'84% circa veniva assicurato con locomotive ed il resto con elettrotreni ed elettromotrici.

I mezzi di trazione a corrente continua

Elettromotrici ed ETR – i cosiddetti “mezzi leggeri”

- Di pari passo con lo sviluppo delle locomotive nacque e si sviluppò anche un parco di “mezzi leggeri.”
- Le elettromotrici e gli ETR non sono destinati al traino di altri veicoli, salvo rare eccezioni, ma provvedono essi stessi al trasporto dei viaggiatori.

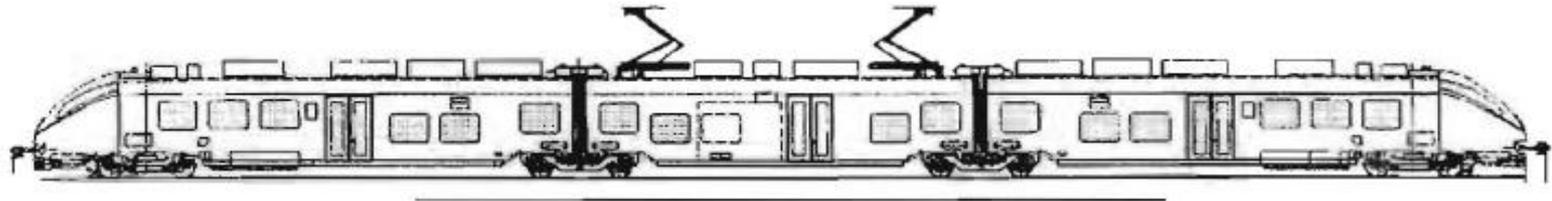
I mezzi di trazione a corrente continua

Le apparecchiature sono ubicate di norma nel sottocassa e, più raramente per motivi di accessibilità e per non elevare il baricentro dei rotabili, sull'imperiale.

- La massa per asse di un'Ale (Automotrice leggera elettrica) e di una locomotiva sono rispettivamente dell'ordine delle 15-16 t e delle 20-22 t.
- il minor carico assiale delle Ale consente a queste di circolare a velocità maggiori (Ranghi B e C).
- l'evoluzione della progettazione dei carrelli delle locomotive ha consentito di ridurre la sollecitazione del binario, eliminando praticamente questa differenza nella velocità max autorizzata.

I mezzi di trazione a corrente continua

Tra i più recenti “mezzi leggeri” elettrici messi in servizio c'è il cosiddetto “Minuetto”, realizzato in versione elettrica e Diesel.



COMPLESSO	A vuoto (t) <i>(senza viaggiatori)</i>		A carico (t) <i>(con viaggiatori)</i>		Massa Frenata con freno di sta- zionamento (t)
	Massa da Frenare	Massa Frenata	Massa da Frenare	Massa Frenata	
ALe 501 - Le 220 - ALe 502	100	150	120	180	39
ALn 501 - Ln 220 - ALn 502	110	160	130	190	

Fig. 32 - Minuetto e caratteristiche

I mezzi di trazione a corrente continua

Caratteristiche principali Minuetto

	TE	TD
Rodiggio	Bo' 2'2' Bo'	B' 2'2' B'
Lunghezza tot.	51.900 mm	51.900 mm
Potenza oraria	1240 kW	
Potenza di taratura		1120 kW a 2100 giri/min
Velocità max	160 km/h	130 km/h
Passo carrelli	2400/2700 mm	2400/2700 mm
Diametro ruote	850 mm	850 mm
Numero dei motori	4	2
Massa in servizio	92	101
Massa aderente	60	62
Trasmissione		idromeccanica Voith

L'avvento dell'elettronica di potenza

- I progressi dell'elettronica a partire dagli anni '70 hanno permesso di realizzare dispositivi statici di alimentazione dei motori di trazione (chopper), permettendo di eliminare il reostato.
- Il chopper permette di derivare energia dalla linea e di renderla sotto forma di impulsi di tensione di ampiezza e durata variabili e consente un'alimentazione dei motori variabile con continuità da un valore pressoché nullo fino ai massimi consentiti dall'isolamento.
- un'ulteriore evoluzione ha permesso di adottare l'alimentazione trifase tramite inverter e quindi l'utilizzazione di motori trifasi asincroni "a gabbia di scoiattolo".
- Questi, grazie all'assenza di spazzole e collettore possono funzionare con un numero di giri molto più alto e fornire, a parità di massa, potenze molto più elevate.

L'avvento dell'elettronica di potenza

- L'inverter, alimentato in continua, permette di regolare la velocità dei motori variando in uscita la tensione e la frequenza dell'alimentazione trifase degli stessi.
- L'ultima evoluzione del sistema è stata quella dell'impiego dell'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).
- Rispetto agli altri dispositivi di potenza a semiconduttore l'IGBT presenta una velocità di commutazione abbastanza alta, la capacità di gestire tensioni e correnti molto elevate, facilità di pilotaggio e possibilità di disporre in parallelo più dispositivi per aumentare i limiti di corrente.

Le locomotive ad azionamento elettronico

- Le prime locomotive con azionamento elettronico, E632 ed E633, derivano dall'esperienza maturata con la E444.005. Le prime sono per il traffico viaggiatori, le altre per il merci.
- La cassa articolata è stata abbandonata ma resta la soluzione di tre carrelli motori biassiali. Quello centrale è dotato di possibilità di spostamento trasversale.
- I carrelli sono monomotori, derivati da quelli delle loc Diesel-elettriche D343, D345, D443 e D445.
- Con tale soluzione un solo motore di trazione aziona entrambi gli assi, con riduzione delle masse e degli ingombri, a parità di potenza, ed un migliore sfruttamento dell'aderenza.

Le locomotive con azionamento elettronico a chopper

- La 444.005 differiva dalle altre unità del Gruppo per essere stata dotata fin dalle origini, e prima nel parco FS, di “chopper”.
- La messa a punto di questa macchina, molto diversa da quelle dotate di equipaggiamento tradizionale, fu molto complessa e richiese un lungo periodo di tempo, ma fornì positivi risultati.
- Il nuovo azionamento, infatti, consentì di realizzare con una locomotiva a 4 assi da 84t, grazie alla migliore aderenza, prestazioni analoghe a quelle ottenibili con macchine a 6 assi da 110-120t.
- L’esperienza ricavata permise di realizzare la prima serie di locomotive ad azionamento elettronico, le E633 e le E632, che differiscono per il rapporto di trasmissione e, quindi, per la vel. max (160 km/h le E632 e 130 per le E633).

Le locomotive con azionamento elettronico a chopper



Fig. 33 – Loc. E633

ing. Renzo Marini

Le locomotive con azionamento elettronico a chopper

- Su queste Loc. il minore ingombro del motore di trazione, riducendo lo spazio necessario tra i due assi del carrello, permette di contenerne il passo limitandone l'aggressività nei confronti del binario.
- I motori di trazione sono derivati da quelli delle E444 potenziati ed alimentati da una colonna chopper ciascuno, simile a quelle sperimentate sulla E444 005, ma con una tensione ai morsetti elevata a 2000 V.
- le E652 sono dotate come le E632 e le E633 di motori con eccitazione in derivazione ma di maggior potenza (1715 kW in servizio continuativo in luogo di 1443 kW), cui seguirono le E464, in numero di 717 come citato dianzi.

Le locomotive con azionamento elettronico a inverter



Fig. 34 – Loc. E464

Le locomotive con azionamento elettronico a inverter

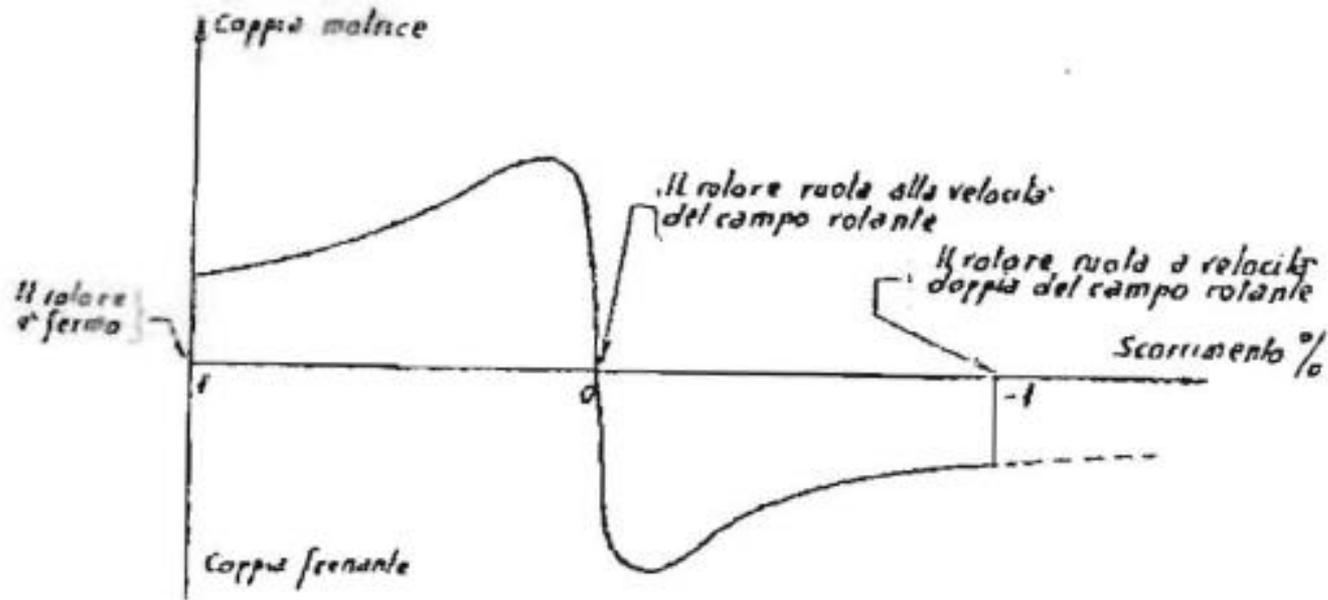


Fig. 35 Caratteristica meccanica di un motore asincrono

Le locomotive con azionamento elettronico a inverter

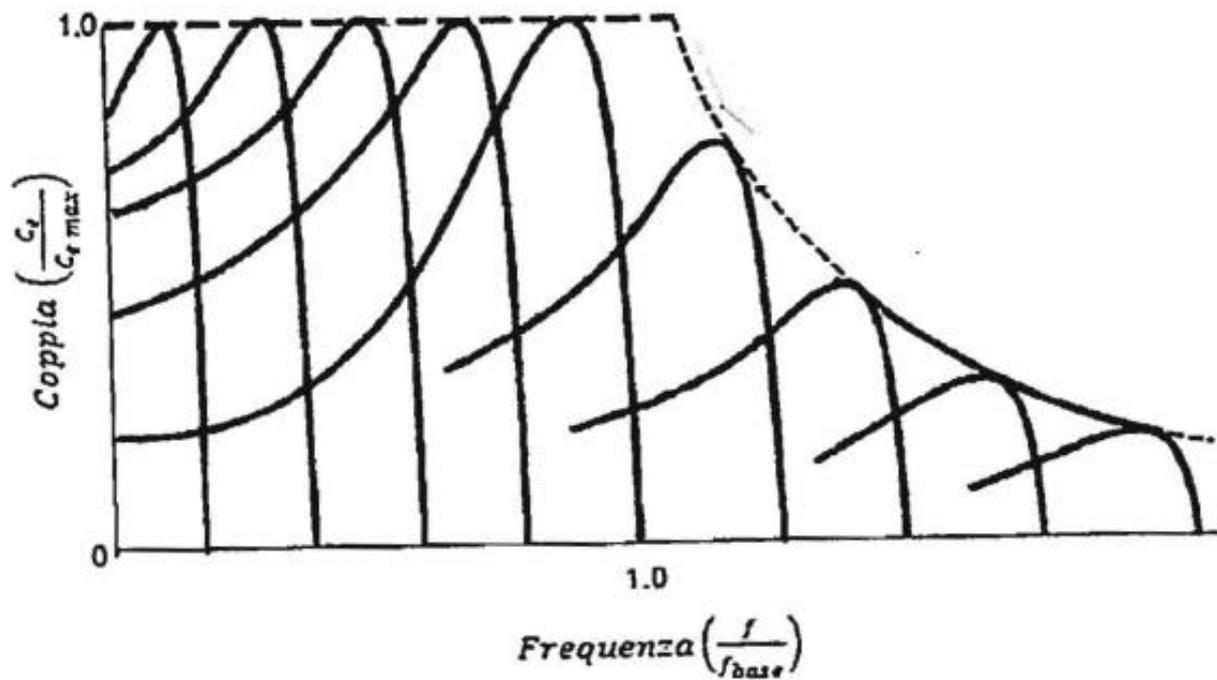


Fig. 36 Curva caratteristica di una loc. E464 con motori asincroni trifasi controllati in tensione e frequenza

Le locomotive con azionamento elettronico a inverter

- La realizzazione della rete AV/AC elettrificata a 25 kV 50 Hz e l'esigenza, in prospettiva, di effettuare treni "interoperabili", atti cioè a circolare sotto diverse tensioni anche al di fuori dell'Infrastruttura Ferroviaria Nazionale, comportano la necessità di mezzi di trazione "politensione", o almeno predisposti per tale scopo.
- Le più recenti locomotive di Trenitalia, le E403, sono, appunto, politensione funzionanti a 3 kV cc e a 25 kV 50 Hz e destinate prevalentemente al traffico merci.
- Sono anche predisposte per un eventuale attrezzaggio con apparecchiature per le linee a 15 kV 16,67 Hz.
- Esse sono dotate del sistema di "lateralizzazione porte", che consente il comando e il controllo centralizzato delle porte delle carrozze in composizione.
- Possono, inoltre, circolare con treni "reversibili", essendo dotate di telecomando mediante cavo UIC a 18 poli.

Le locomotive con azionamento elettronico a inverter



Fig. 37 – Loc. E402B

ing. Renzo Marini

Le locomotive con azionamento elettronico a inverter



Fig. 38 – Loc. E403

Le locomotive con azionamento elettronico a inverter

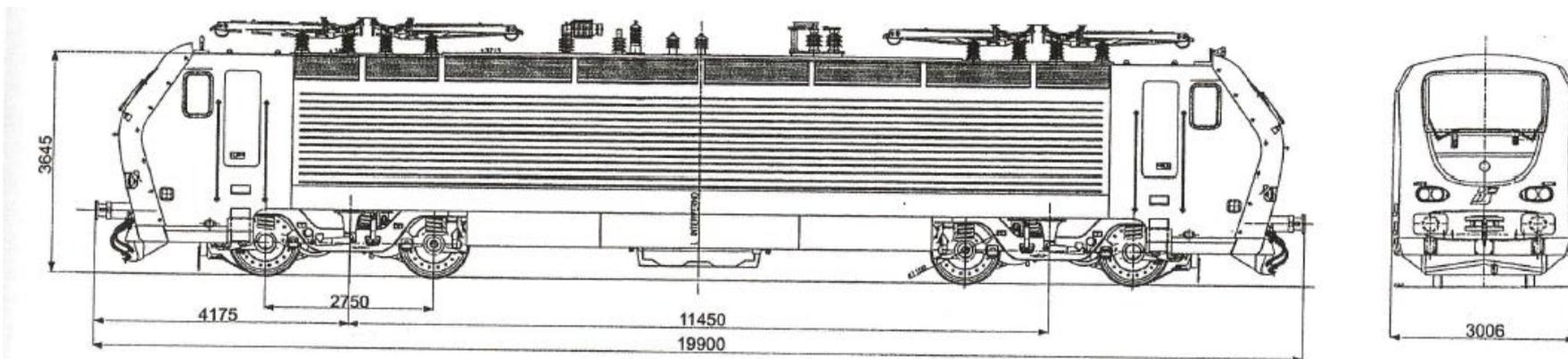


Fig. 39 – Loc. E403

Le locomotive con azionamento elettronico a inverter

Schema rodiggio :	Bo – Bo (due carrelli con un motore per ogni asse)	
Velocità massima:	180 km/h	
Tensioni alimentazione	3 kV – 25 kV 50 Hz	1,5 kV
Potenza continuativa	5,6 MW	2,8 MW
Sforzo trazione all'avviamento	315 kN	315 kN
Sforzo trazione alla max velocità	120 kN	60 kN
Potenza oraria:	6 MW	
Potenza massima frenatura elettrica:	3.35 MW	
Lunghezza tra i respingenti:	19900 mm	
Passo carrello:	2750 mm	
Diametro ruota nuovo/massima usura:	1100 / 1040 mm	
Rapporto trasmissione:	1/4.4118	
Massa in OdM:	86 t	

Caratteristiche principali Loc. E403

L'Alta Velocità

- Si fornirà, per evidenti motivi di tempo, solo qualche cenno.
- Anzitutto la definizione di Alta Velocità che, secondo le STI (Specifiche Tecniche d'Interoperabilità) è tale se maggiore o uguale a 250 km/h.
- La tensione adottata, come dappertutto tranne le Reti a 15 kV 16 2/3 Hz, è di 25 kV 50 Hz.
- Ciò deriva dall'impossibilità di fornire col 3000 Vcc la potenza necessaria con un distanziamento ragionevole delle sottostazioni ed una sezione accettabile dei conduttori della linea di contatto .

L'Alta Velocità

- La velocità massima delle linee è di 300 km/h, salvo la DD Roma-Firenze, prima linea AV in Italia, a 3 kV cc e vel max 250 km/h.
- I rotabili AV (ETR 500 ed ETR 1000) sono tutti bitensione (3 kV cc 25 kV 50 Hz).
- Il sistema di segnalamento è l'ERTMS livello 2, privo di segnali laterali sulla via e atto a consentire la circolazione a 300 km/h con un distanziamento di 2'30".

L'Alta Velocità

- L'ETR 1000 è il rotabile tecnologicamente più avanzato di Trenitalia.
- Esso è bidirezionale, a composizione bloccata e potenza distribuita, composto da 8 elementi con due carrelli per elemento ed il 50% degli assi motorizzati.
- Il rodiggio è B'oB'o2'2'B'oB'o2'2'2'2'B'oB'o2'2'B'oB'o.
- Ciascun elemento motorizzato è dotato di un convertitore di trazione che alimenta 4 motori di trazione (2 per carrello) e di un convertitore ausiliario 400 V 50 Hz trifase.

L'Alta Velocità

- La potenza max alle ruote, con tutti i motori di trazione inseriti è:
 - Per 25 kV 50 Hz 9800 kW
 - Per 3 kV cc 6900 kW
 - Per 1,5 kV cc 3050 kW
- L'ETR 1000 circola ad una velocità max di 300 km/h sulle linee a 25 kV 50 Hz ed a 250 su quelle a 3 kV cc.
- L'elevata accelerazione di questi rotabili (circa $0,7 \text{ m/sec}^2$) e la motorizzazione distribuita hanno consentito di ridurre di qualche minuto i tempi di percorrenza Roma-Milano, scesi a 2 ore e 55'.

Nuovi veicoli

- ETR 324/425/526 Alstom (Jazz) 4/5/6 elementi potenza continuativa 2052 kW vel. max 160 km/h
- ETR 524* Stadler (Flirt) 4/6 elementi 3kV cc 15kV 16.7 Hz potenza continuativa 2000 kW vel. max 160 km/h
- ATR 220* Pesa (Swing) 3 elementi potenza 780 kW vel. max 130 km/h
- ETR 421/521 (Rock) 4/5 elementi potenza 2800/3400 kW vel. max 160 km/h
- ETR 103/104 (POP) 3/4 elementi potenza 2000 kW vel. max 160 km/h

* entrambi operano da tempo anche su varie Ferrovie Concesse (Alto Adige, Veneto, Emilia Romagna e Puglia)

La rete RFI al 31.12.2017 (*)

- Linee in esercizio 16777 km (di cui 70 rete estera)
- Di cui elettrificate 12015 km
- A doppio binario 7623 km
- A semplice binario 4392 km

(*) Fonte RFI

Grazie per l'attenzione



Fig. 43 – ETR 1000