



## Nuovi orizzonti per il trasporto guidato a levitazione magnetica

*Prof. Ing. Franco DI MAJO<sup>(\*)</sup>,  
Dott. Ing. Maurizio CAVAGNARO<sup>(\*\*)</sup>, Vincenzo DELLE SITE<sup>(\*\*\*)</sup>*

**SOMMARIO** – L'improvvisa disponibilità di materiale magnetico ad altissima energia a prezzi ridotti di oltre l'ottanta per cento, rispetto a quelli praticati ancora alla fine del secolo passato, apre la via a nuove soluzioni molto competitive per i trasporti senza contatto su magneti permanenti operanti in opposizione. Una importante applicazione di questi nuovi sistemi potrà interessare il settore delle metropolitane, dalle quali si attende il superamento dei pesantissimi costi esterni che la congestionata circolazione di superficie sta provocando in ogni parte del mondo.

### 1. Introduzione

**1.1.** Nel Gennaio 2001, con la prima memoria pubblicata da Ingegneria Ferroviaria nel terzo millennio<sup>(1)</sup>, veniva presentato un sistema di trasporto a levitazione magnetica completamente innovativo, basato sul sostentamento del carico mobile a mezzo di magneti permanenti operanti in opposizione [1; 2; 3; 4; 5].

Nell'esaminare le possibili applicazioni, veniva messo in evidenza il particolare interesse per le metropolitane sotterranee, dove il nuovo sistema consente importanti risparmi a confronto dei sistemi tradizionali, sia nei costi di primo impianto che in quelli di esercizio.

Per gli impianti, giocano a favore del nuovo sistema:

- la maggiore libertà nella scelta del tracciato sotterraneo, che è in grado di superare pendenze fino all'8% e che, riducendosi i disturbi per rumore o vibrazioni, può senza inconvenienti passare al di sotto di ospedali, teatri, sale da concerto od anche fabbricati le cui fondazioni presentino qualche problema di stabilità;
- la riduzione della sezione delle gallerie, in relazione al minor ingombro dei veicoli, privi di carrelli e di prese di corrente;
- il minor peso dei veicoli, la cui ossatura portante, appoggiata su tutta la sua lunghezza, non è soggetta ai

grandi momenti flettenti longitudinali, tipici del materiale convenzionale.

Per l'esercizio, le principali fonti di economia vengono ravvivate nella drastica riduzione delle spese di manutenzione: a) per la *via* che, non più soggetta ad urti od a carichi concentrati, mantiene inalterate le sue caratteristiche di geometria e stabilità, indipendentemente dal volume del traffico dal quale viene interessata; b) per i *veicoli*, che non richiedono frequenti revisioni periodiche o sostituzioni di componenti, vista l'assenza di fenomeni di logorio dovuti allo strisciamento di parti dotate di movimento relativo l'una rispetto all'altra.

Questi risparmi possono assicurare la redditività dell'impianto con livelli di traffico nettamente inferiori a quelli che sarebbero richiesti da una metropolitana convenzionale. Il nuovo sistema può pertanto trovare applicazione anche in centri urbani di medie dimensioni (600.000÷800.000 residenti), dove attualmente non è possibile garantire la convenienza economica di un servizio di metropolitana.

**1.2.** Riviste a pochi anni di distanza, le prospettive di sviluppo del nuovo sistema appaiono oggi ancora più interessanti, se riconsiderate alla luce di alcuni importanti cambiamenti verificatisi nel frattempo.

A favorire l'evoluzione verso soluzioni sempre meno costose e più efficienti ha molto contribuito la disponibilità a prezzi ragionevoli (meno di 20 €/kg) di materiale magnetico ad altissima energia, soprattutto della classe dei lantanidi (Neodimio-Ferro-Boro). Fino a pochi anni fa questo materiale era offerto a prezzi altissimi, il che, nell'applicazione Maglev, ne rendeva praticamente impossibile l'impiego per i magneti inferiori che si sviluppano per tutta la lunghezza della via e per i quali era invece previsto l'utilizzo della Ferrite, molto più economica, ma altrettanto meno efficace.

<sup>(\*)</sup> Già Docente di Costruzioni Ferroviarie presso il Politecnico di Torino nonché Direttore della Divisione Ferroviaria Fiat.

<sup>(\*\*)</sup> Già Dirigente F.S.

<sup>(\*\*\*)</sup> Consiglio Nazionale delle Ricerche, Dipartimento Energia e Trasporti.

<sup>(1)</sup> F. DI MAJO, V. DELLE SITE, "Sistema di trasporto a levitazione magnetica di nuova generazione", Ingegneria Ferroviaria n. 1-2, pp. 3-29, gennaio-febbraio 2001.

## SCIENZA E TECNICA

Altra circostanza favorevole allo sviluppo del nuovo sistema è costituita dal fatto che, in questi ultimi anni, la situazione dei trasporti di superficie ha subito un rapido peggioramento e si presenta sempre più afflitta da pesantissimi costi esterni. Questo fenomeno sta portando ad un forte incremento nella domanda di metropolitane sotterranee che ora, oltre ai centri minori, comincia ad interessare anche le zone periferiche delle grandi città, dove i classici sistemi di collegamento radiocentrici (con pochissime linee per un grande centro), stanno lasciando il posto a sistemi reticolari, con netto miglioramento delle capacità distributive [6].

Oggi vengono presi in considerazione, per l'installazione di un impianto di metropolitana, tutti i casi in cui ci si trova in presenza di situazioni di congestione con pesanti carichi esterni, anche quando si verificano in aree urbane di dimensioni limitate.

La stessa progettazione deve adeguarsi a queste nuove strategie e proporre soluzioni innovative con costi quanto possibile contenuti, per permettere di raggiungere sufficienti livelli di redditività anche con traffico relativamente modesto (dell'ordine dei 30.000 viaggiatori-km/km-giorno, sommando le due direzioni).

Si richiedono perciò metropolitane di basso costo e modesta potenzialità (fino a 10.000 posti-km per ora e per direzione), distribuite capillarmente su tutto il territorio, caratterizzate da impianti di facile realizzazione, ma completamente affidabili ed a costi interni adeguatamente contenuti. A questa esigenza risponde perfettamente la proposta che in appresso viene illustrata e che sfrutta tutte le opportunità che questa nuova tecnica può mettere a disposizione.

### 2. Prospettive di sviluppo dei sistemi a levitazione magnetica

**2.1.** Il 31 Dicembre 2002, a 34 anni dal primo esperimento e dopo oltre un milione di chilometri percorsi con otto successivi prototipi (TR01-TR08) in vari circuiti di prova (principalmente Erlangen ed Emsland), è stato finalmente inaugurato sul percorso Shanghai - Pudong (aeroporto), con la partecipazione del primo ministro della Repubblica Cinese Zhu RONGJI e del Cancelliere Tedesco Gerhard SCHROEDER, un regolare servizio commerciale con un sistema di trasporto a levitazione magnetica del tipo Transrapid<sup>(2)</sup>. La via e il materiale mobile sono stati realizzati in poco più di venti mesi dai costruttori tedeschi Thyssen Krupp e Siemens.

A seguito dell'immancabile successo del primo viaggio (circa 30 km percorsi in 8 minuti, con punta massima di

<sup>(2)</sup> Un nuovo veicolo Transrapid, denominato TR09, è in corso di sperimentazione dalla primavera 2007 ad Emsland.

velocità a 430 km/h)<sup>(3)</sup>, si è risvegliato su questa tecnologia un vivace interesse e molti dei principali responsabili, intervistati dai media, si sono espressi con ottimismo sulle probabilità di futuri sviluppi del sistema Transrapid; tuttavia ancora oggi, ad alcuni anni di distanza, solo pochi impianti hanno concrete possibilità di essere realizzati.

In Cina è stato approvato di recente il prolungamento dell'attuale linea Shanghai - Pudong fino alla città di Hangzhou (circa 200 km). Quanto alla Germania è stata decisa la costruzione, con diretto intervento della Deutsche Bahn, di un allacciamento fra Monaco di Baviera ed il suo aeroporto (circa 37 km da percorrere in 10 minuti, alla velocità massima di 350 km/h), mentre è stato per ora accantonato un altro importante impianto, soprannominato "Metrorapid", che dovrebbe unire Dortmund a Düsseldorf interessando anche Bochum, Essen e Duisburg (in tutto 79 km da percorrere in 37 minuti). Per il resto di Europa l'unico progetto che al momento ha qualche probabilità di concretarsi riguarda, in una zona con densità di insediamenti fra le più alte nel mondo, il collegamento circolare Amsterdam - L'Aia - Rotterdam - Utrecht (230 km). Altre proposte riguardano gli Stati Uniti, dove sono allo studio alcuni brevi collegamenti in alcune aree urbane densamente popolate.

Nessuno sembra più ricordarsi della Pechino - Shanghai, né della Amburgo - Berlino e tanto meno degli oltre centomila km di nuove vie che, secondo i promotori dei primi anni '90, avrebbero dovuto aprire una nuova era al mondo dei trasporti guidati.

**2.2.** Un così drastico ridimensionamento dei programmi di sviluppo non può certo ascriversi ad una crisi di sfiducia nei nuovi sistemi, ma va visto invece come la conseguenza di una più approfondita conoscenza del problema e di un più maturo bilancio fra i vantaggi raggiungibili e le difficoltà che ad essi inevitabilmente si accompagnano.

La più importante di queste difficoltà può essere ravvisata nella incompatibilità del nuovo materiale a circolare su tratti della rete tradizionale, per cui, ad esempio, in un ipotetico Transrapid Amburgo - Berlino, ogni viaggiatore proveniente da una stazione ad Ovest di Amburgo e/o diretto ad una stazione ad Est di Berlino dovrebbe cambiare in almeno una di queste due città, sacrificando in gran parte il tempo guadagnato per le maggiori velocità praticate nel percorso sulla via a levitazione magnetica<sup>(4)</sup>.

<sup>(3)</sup> Dopo il viaggio inaugurale del 31 dicembre 2002 e circa un anno di pre-esercizio, il 29 dicembre 2003 ha avuto inizio il regolare servizio commerciale sulla linea Shanghai - Pudong, che attualmente assicura il collegamento per 14 ore al giorno. Dal giorno dell'inaugurazione fino al giugno 2006 sono stati trasportati circa 7 milioni di passeggeri. Il 12 novembre 2003 il Transrapid ha stabilito sull'impianto di Shanghai il proprio record di velocità di 501 km/h. Il record assoluto di velocità per i sistemi di trasporto terrestri appartiene attualmente al prototipo Maglev MLX01 delle ferrovie giapponesi, che il 2 dicembre 2003 ha raggiunto sull'impianto di Yamanashi la velocità di 581 km/h.

<sup>(4)</sup> D'altra parte i veicoli cosiddetti "anfibi", adatti ad entrambe le vie, risultando inevitabilmente più pesanti e con minore disponibilità di spazio per i viaggiatori, non sono praticamente proponibili per una applicazione generalizzata su tutti i treni.

## SCIENZA E TECNICA

Altro fattore negativo è rappresentato dai maggiori costi di investimento, che per il Transrapid sono dovuti sia alle severe esigenze di rigidezza della struttura metallica della via sopraelevata, sia, per quanto riguarda i veicoli, alle eccezionali dimensioni degli elettromagneti di sostenimento e guida, la cui massa, comprese le apparecchiature di alimentazione, corrisponde a circa un terzo della tara totale. Non deve perciò sorprendere se i nuovi programmi prevedono esclusivamente servizi con elevatissimi volumi di traffico, che non debbono però interessare in alcun modo la rete tradizionale.

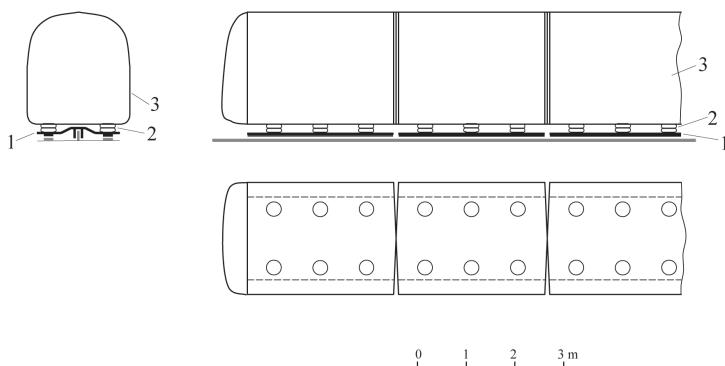


Fig. 1 - Il materiale mobile: 1- Telaio scorrevole; 2- Sospensione pneumatica a livello costante; 3- Carrozzeria.

D'altra parte anche tutti gli altri sistemi a levitazione magnetica (in particolare il Maglev giapponese EDS, principale concorrente del Transrapid) che, pur non avendo ancora raggiunto la consacrazione del servizio commerciale, già da anni stanno facendo le loro prove in varie parti del mondo, hanno gli stessi problemi ed appare quindi facile profezia che, anche in un lontano avvenire, le realizzazioni *Maglev ad altissima velocità*, seppur affascinanti dal punto di vista scientifico, avranno sul piano pratico un ruolo relativamente modesto.

**2.3.** Completamente diverse e sostanzialmente molto più favorevoli sono le prospettive per le *reti metropolitane*, quali sistemi di trasporto destinati al servizio di un unico centro urbano. Per esse infatti il problema della intercircolabilità non esiste, visto che i veicoli sono tutti eguali e non vi è alcun movente per portarli ad operare su altri impianti.

In più i sistemi a levitazione magnetica presentano alcune caratteristiche che li rendono molto interessanti per l'applicazione nei trasporti urbani. Su tutti, di gran lunga predominante è il vantaggio della mancanza di ogni contatto materiale tra i veicoli e la via, che fa sì che quest'ultima possa conservare una geometria perfetta, atta a consentire l'esercizio senza necessità di frequenti interruzioni di servizio per le operazioni di risa-

namento e di manutenzione. Molto importante in ambiente urbano è anche la totale eliminazione delle vibrazioni al suolo e la sensibile riduzione del rumore generato dalla corsa dei treni. Può avere inoltre importanza il fatto che, con la bassa velocità ( $< 30 \text{ m/s}$ ) alla quale operano i servizi metropolitani, molti problemi costruttivi si semplificano e si possono conseguire importanti riduzioni sia nei costi di primo investimento che in quelli di esercizio.

L'esperienza dei Maglev merita perciò di non essere abbandonata, ma occorre puntare su una soluzione di seconda generazione più semplice ed economica di quelle finora sviluppate, appositamente studiata per i trasporti urbani e caratterizzata da leggerezza, ingombro limitato, basso consumo, semplicità costruttiva, basso costo di costruzione e di esercizio<sup>(5)</sup>.

**2.4.** A dimostrare la concretezza di queste affermazioni, si presenta la proposta di un nuovo sistema a levitazione magnetica con sostenimento su magneti permanenti in opposizione, adatto ai servizi metropolitani, anche di potenzialità non elevata [7; 8].

Il materiale mobile è essenzialmente formato da una successione di telai scorrevoli<sup>(6)</sup> di lunghezza ridotta (circa 3 metri), al di sopra dei quali, sostenuta da sospensioni pneumatiche a livello costante, è appoggiata la carrozzeria opportunamente articolata (fig. 1).

Sotto ogni telaio scorrevole sono installati i dispositivi di sostenimento, guida e propulsione del veicolo (figg. 2 e 3).

Il sostenimento del veicolo è assicurato da un insieme di magneti permanenti in Neodimio-Ferro-Boro (Nd-Fe-B) operanti in opposizione, distribuiti in due gruppi di allineamenti paralleli fissati l'uno alla via ( $M_F$ ), l'altro al telaio scorrevole ( $M_M$ ).

Ogni telaio T è guidato orizzontalmente mediante il controllo attivo di opportuni distanziatori D, che, reagendo contro una guida metallica fissa G, controllano l'esatto

<sup>(5)</sup> Negli Stati Uniti è stato finanziato di recente un programma di ricerca denominato "Urban Maglev" (2000-2006), con lo scopo di sviluppare nuovi sistemi a levitazione magnetica per il trasporto di massa nelle città di medie e grandi dimensioni. I Maglev Urbani non sono in concorrenza con il Transrapid, che, diversamente da questi, è stato progettato per il trasporto extraurbano ad altissima velocità.

<sup>(6)</sup> "Telaio scorrevole" traduzione più o meno felice di "Schwebegestell", che nel vocabolario Transrapid si contrappone a Drehgestell, il comune carrello.

## SCIENZA E TECNICA

posizionamento trasversale della composizione superiore mobile rispetto alla composizione inferiore fissa. Alla propulsione e frenatura si provvede con un motore lineare sincrono i cui induttori I sono portati dal telaio scorrevole, mentre l'indotto S, attivo su entrambe le facce verticali, è applicato alla via per tutta la sua lunghezza.

**2.5.** Rispetto alla soluzione iniziale, descritta nella nota di Ingegneria Ferroviaria del gennaio 2001 [5], sono state proposte alcune importanti innovazioni, che possono migliorare in misura determinante tutte le economie del sistema. Le principali sono:

- per il *sostentamento del veicolo*, l'impiego di materiale magnetico ad alta energia (Nd-Fe-B) anche per i magneti della composizione fissa alla via, originariamente previsti in Ferrite, il che permette di ridurre a meno della metà il numero di coppie di magneti necessarie per sostenere il carico del materiale mobile;
- per la *guida*, l'utilizzo di un dispositivo meccanico di controllo dell'equilibrio trasversale, che, alle basse velocità tipiche dei trasporti metropolitani, può sostituire il sistema di guida con elettromagneti;
- per la *propulsione*, l'adozione di una diversa configurazione del motore lineare sincrono, con l'indotto inserito fra i due induttori e non viceversa; si raddoppiano così il numero di facce attive che intervengono a generare la propulsione e migliora il rapporto fra la lunghezza dei tratti attivi dei conduttori e la loro lunghezza totale, con importante riduzione delle perdite per effetto Joule.

### 3. Il sostentamento del veicolo

**3.1.** Negli ultimi anni del secolo passato, le tecniche costruttive dei magneti permanenti in leghe di Neodimio-Ferro-Boro sono state oggetto di continui miglioramenti

(fig. 4), che hanno permesso di ottenere prestazioni eccezionali (densità di energia >400 kJ/m<sup>3</sup>, rimanenza >1,3 Tesla, coercitività intrinseca >1000 kA/m) e di raggiungere

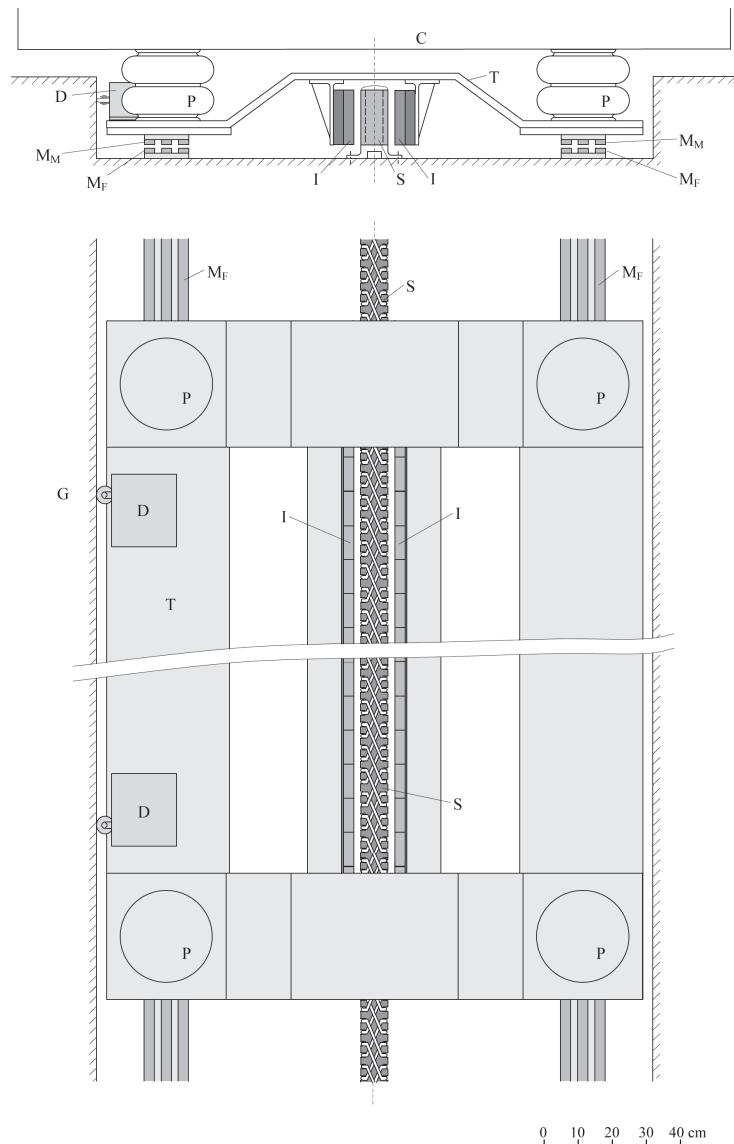


Fig. 2 - Maglev con magneti permanenti: pianta e sezione del telaio scorrevole e della via. Telaio scorrevole; C- Carrozzeria; P- Sospensioni pneumatiche; M<sub>M</sub>- Magneti superiori mobili; M<sub>F</sub> - Magneti inferiori fissi; I - Induttore del motore lineare; S - Indotto del motore lineare; D - Distanziatore; G - Guida.

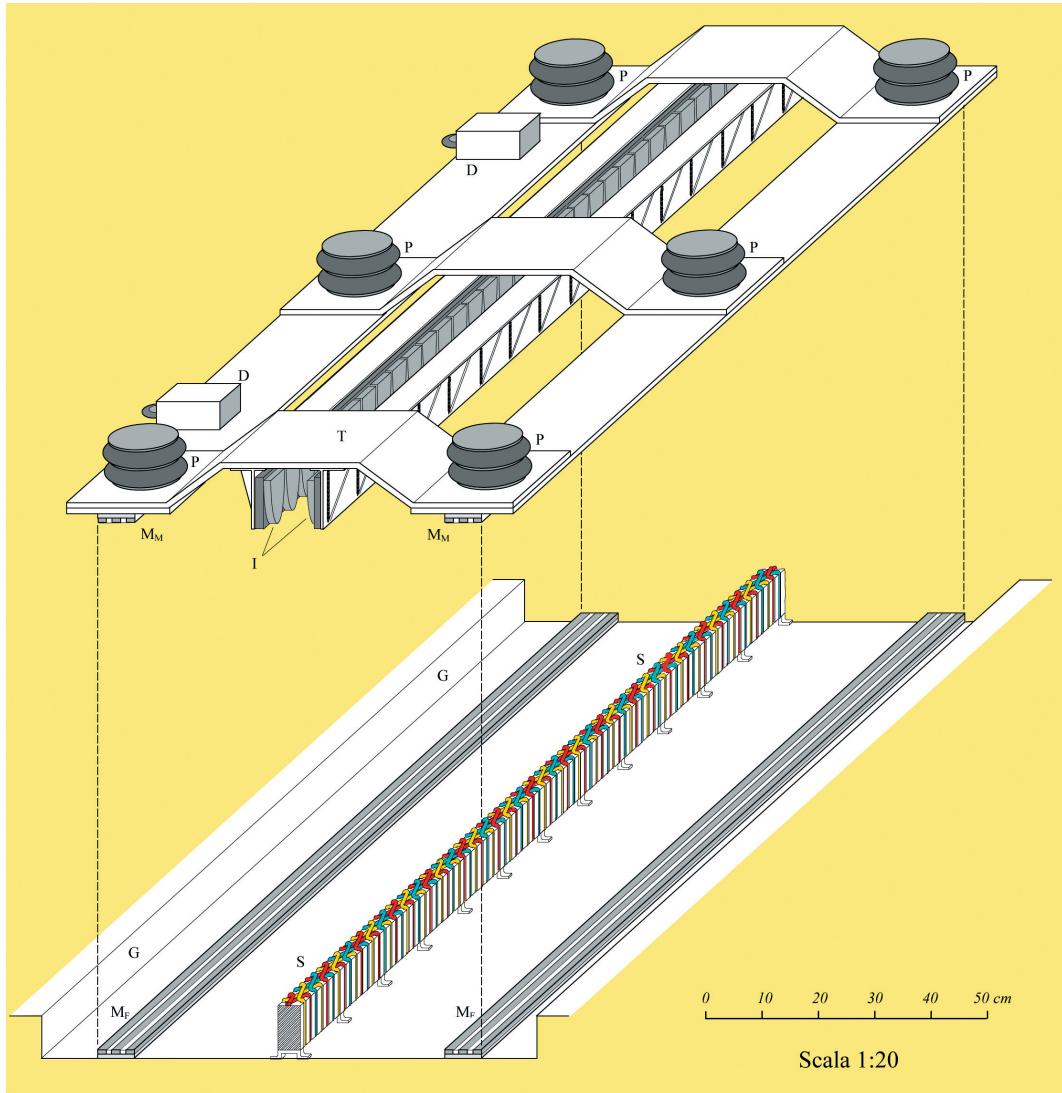


Fig. 3 - Maglev con magneti permanenti: vista assonometrica del telaio scorrevole e della via. T – Telaio scorrevole; P – Sospensione secondaria;  $M_M$  – Magneti permanenti superiori mobili;  $M_F$  – Magneti permanenti inferiori fissi; S – Indotto del motore lineare sincrono; I – Induttori del motore lineare sincrono; G – Guida metallica; D – Distanziatori.

nello stesso tempo una straordinaria riduzione dei prezzi (da oltre 150 €/kg negli anni '90 a meno di 20 €/kg)<sup>(7)</sup>.

La soluzione ibrida proposta nel 2001 per il sostentamento del veicolo [5] era realizzata con Ferrite sulla via e Nd-Fe-B soltanto sulla composizione portata dal materia-

<sup>(7)</sup> A differenza del Nd-Fe-B, la Ferrite ha mantenuto un prezzo pressoché invariato dagli anni '90 ad oggi (pari a circa 2,6 €/kg), e questo prezzo rimane ancora oggi inferiore a quello del Nd-Fe-B di un ordine di grandezza. Tuttavia se si calcola il costo

dei due materiali in rapporto all'energia immagazzinata, si ottengono oggi per la Ferrite e per il Nd-Fe-B valori ormai praticamente identici, dell'ordine di 400-500 €/kJ.

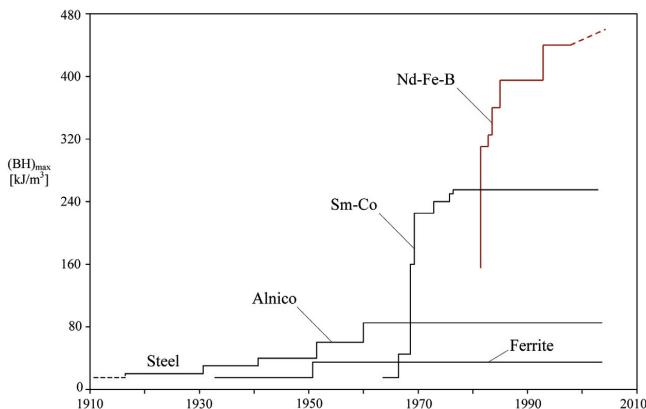


Fig. 4 - Miglioramento delle proprietà dei materiali magnetici nel tempo [9; 10; 11].

le mobile (fig. 5a). Potendo oggi impiegare il Nd-Fe-B per entrambe le composizioni (fig. 5b), il disegno si semplifica drasticamente e quanto ciò possa giovare all'economia globale si può arguire dal confronto (fig. 5) fra due soluzioni equivalenti nelle prestazioni totali: spinta verticale  $F_z = 8000$  N al metro lineare, con distacco di 12 mm [12].

**3.2.** Per ottenere il sostentamento di un veicolo con peso totale (peso proprio + carico) pari a 16.000 N al metro lineare, occorre dunque sistemare a terra, lungo tutta la via, due terne di magneti permanenti in Nd-Fe-B (con rimanenza > 1 Tesla, polarizzazione > 800.000 A/m), di forma prismatica (altezza  $e = 1,5$  cm, larghezza  $b = 3$  cm), con distanziamento orizzontale  $d = 2$  cm, sulle quali reagiscono a distanza  $t = 1,2$  cm altrettante terne dello stesso materiale e di uguali dimensioni applicate al materiale mobile (fig. 6).

Tutti i magneti sono assemblati su piastre di ferro dolce, di adeguato spessore ( $s = 15$  mm), ciò che permette, a parità di spinta verticale, di ridurre di almeno il 40% il volume complessivo dei magneti. Con questi accorgimenti, per ottenere una spinta verticale di 16.000 N/m, si richiedono 43,2 kg/m di Nd-Fe-B (21,6 kg/m sulla via ed altrettanti sul veicolo).

Il valore della spinta risultante  $F_z$ , generata dalle 6 copie di magneti in opposizione, varia in senso inverso al valore di  $z$  (e quindi di  $t$ , distanza verticale fra le due composizioni - fig. 7). Risulta pertanto  $\frac{dF_z}{dz} < 0$ , condizione essen-

ziale per assicurare passivamente l'equilibrio verticale del sistema<sup>(8)</sup>.

#### 4. Il controllo dell'equilibrio trasversale

**4.1.** Completamente diversa la situazione per quanto riguarda l'equilibrio trasversale. Due composizioni magnetiche, perfettamente eguali come proiezione orizzontale, non esercitano l'una rispetto all'altra nessuna spinta orizzontale, se sovrapposte in modo che le facce polarizzate dei singoli magneti prismatici montati in opposizione si trovino esattamente sullo stesso piano verticale (fig. 8a). Ma ad un minimo spostamento trasversale  $y$  della compagine superiore (fig. 8b),

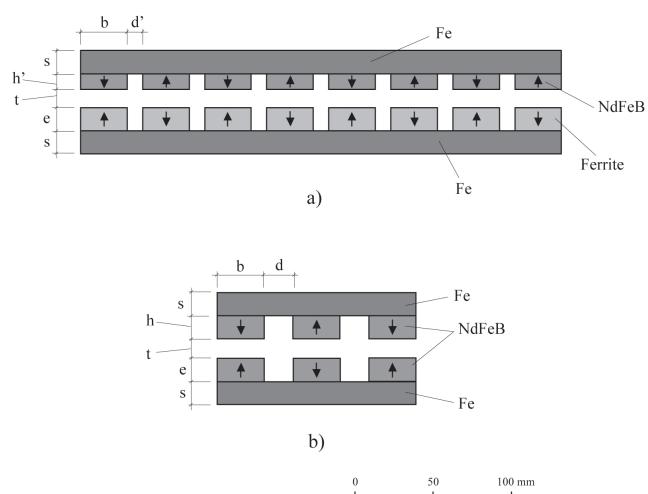


Fig. 5 - Confronto tra due composizioni equivalenti, in grado di sostenere  $F_z = 8000$  N/m con distacco verticale di  $t=12$  mm: a) soluzione ibrida Ferrite/NdFeB; b) soluzione con solo NdFeB.  $b = 30$  mm;  $d = 20$  mm;  $d' = 8$  mm;  $h = 15$  mm;  $h' = 10$  mm;  $t = 12$  mm;  $e = 15$  mm;  $s = 15$  mm.

nascere fra le facce sovrapposte una componente orizzontale  $F_y$  della spinta, diretta nello stesso senso dello spostamento  $y$  ed inizialmente ad esso proporzionale (fig. 9, riferita al caso di una sola coppia di magneti in Nd-Fe-B).

<sup>(8)</sup> Per apprezzare quanto ciò sia importante, si può ricordare che nel Transrapid, per ottenere lo stesso risultato di stabilizzazione verticale, vengono impiegati elettromagneti di attrazione pulsanti con frequenza di alcuni kHz e che richiedono una apparecchiatura del peso di oltre 300 kg per ogni metro di lunghezza del veicolo.

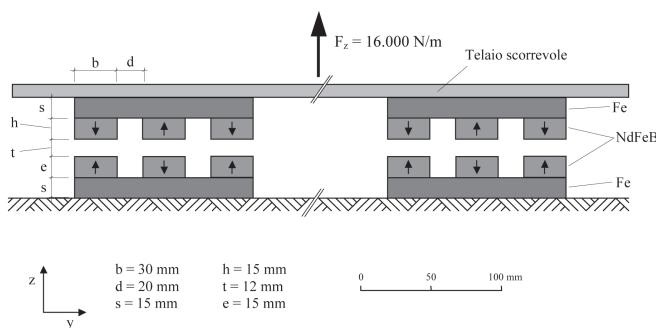


Fig. 6 - Composizione di magneti permanenti per il sostentamento del veicolo.

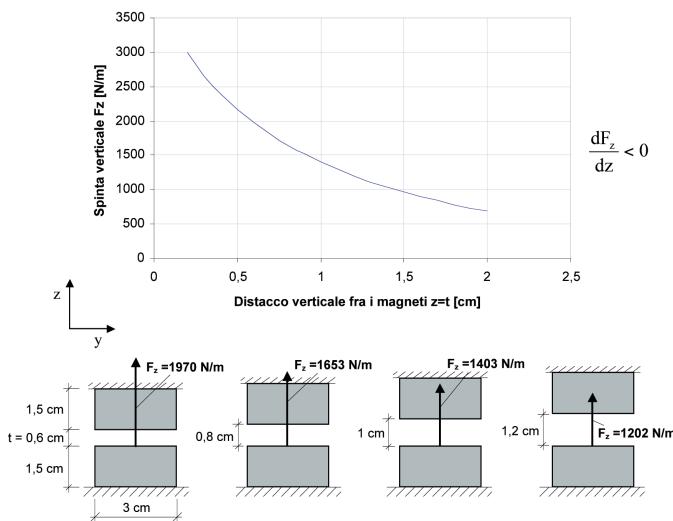


Fig. 7 - Spinta verticale  $F_z$  in funzione del distacco verticale  $z$ , nel caso di una sola coppia di magneti in NdFeB.

Al crescere del disassamento, la spinta orizzontale  $F_y$  aumenta in proporzione sempre minore fino a raggiungere un valore massimo, superato il quale la spinta decresce con andamento pressoché iperbolico verso valori sempre più ridotti.

**4.2.** In questa condizione di instabilità, la parte mobile (superiore) è sempre sollecitata a spostarsi allontanandosi dal centro e si arresta soltanto quando incontra un ostacolo, che potrebbe essere costituito da una guida fissa sistemata parallelamente alla via. Il carico che su questa

guida viene a crearsi dipende dallo spostamento laterale totale compiuto dal materiale mobile. Il grafico di fig. 10 (relativo al sistema di fig. 6 con 3 + 3 coppie di magneti), indica, in funzione dello spostamento  $y$ , il valore della forza orizzontale  $F_y$  interagente fra le parti. Per mantenere bassa la forza  $F_y$  occorre quindi limitare il più possibile il disassamento  $y$ .

Dalla figura si può dedurre che ad uno spostamento  $y$  dell'ordine di pochissimi mm corrisponde (qualunque sia il numero di coppie di magneti) un incremento di spinta proporzionale ad  $y$  ed eguale a circa l'8% del carico verticale per ogni mm di spostamento. Pertanto, nel caso di piccoli spostamenti trasversali, ad un disassamento  $y$  corrisponde una spinta orizzontale:  $F_y \approx 0,08 \cdot P \cdot y$ , dove  $P$  è il carico verticale (peso proprio del veicolo + carico trasportato); così per es. un telaio scorrevole della lunghezza di 3 metri, per il quale  $P = 16.000$  N al metro lineare, accuserà una spinta magnetica trasversale di circa  $F_y = 3840$  N per ogni mm di spostamento trasversale del suo asse di simmetria rispetto all'asse di simmetria della struttura dei magneti fissi<sup>(9)</sup>.

Alla forza trasversale  $F_y = 0,08 \cdot P \cdot y$ , che si produce fra i magneti fissi ed i magneti mobili della composizione in presenza di un disassamento, si aggiunge poi l'eventuale forza trasversale  $\frac{a}{g} P$ , dovuta ad una accelerazione non compensata a  $[ms^{-2}]$ , positiva o negativa, agente sul telaio stesso e sul carico. La forza trasversale totale  $F_g$  che ogni telaio scorrevole trasmette alla guida è data perciò dalla somma:

$$F_g = 0,08 \cdot P \cdot y + P \frac{a}{g}$$

**4.3.** Nelle condizioni descritte, l'equilibrio trasversale non può essere raggiunto passivamente, ma richiede l'intervento di una regolazione assistita, che agisce sul valore di  $y$ , modificandolo nell'uno o nell'altro senso fino a riportare entro i limiti

<sup>(9)</sup> Piccole dissimmetrie, dovute a difetti di complanarità delle facce verticali o ad irregolarità nella polarizzazione dei magneti, possono avere lo stesso effetto di uno spostamento trasversale e far sì che composizioni sovrapposte, in apparenza perfettamente simmetriche, diano luogo anche in posizione centrale ad una spinta laterale, che poi si sovrappongono a quella generata dallo spostamento  $y$ . Nei casi pratici si tratta di differenze minime, dell'ordine dei centesimi di millimetro, però per la massima prudenza è opportuno mettere in conto una tolleranza di  $\pm 0,5$  mm, con la conseguenza che fra gli assi di simmetria della parte mobile e della parte fissa sarà presente uno spostamento di circa 1 mm.

## SCIENZA E TECNICA

ammessi la forza  $F_g$  che interagisce fra la struttura mobile dei magneti superiori e la guida esterna fissa parallela alla via.

Nella soluzione originaria [5] il controllo dell'equilibrio trasversale era ottenuto con l'impiego di potenti elettromagneti pilotati da un indicatore di prossimità che assicurava il mantenimento, entro un ben definito intervallo, della distanza fra il veicolo in movimento ed una guida di riferimento fisso al suolo [13; 14]. Data l'estrema prontezza con la quale si deve intervenire appena la distanza fra veicolo e guida sta per superare il limite consentito, si richiedono per gli elettromagneti di comando tensioni e correnti eccezional-

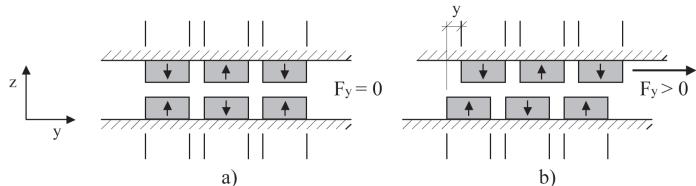


Fig. 8 - Equilibrio orizzontale instabile dei magneti permanenti in opposizione.

la resistenza all'avanzamento, oltre a disturbi dinamici di varia natura. Per controllare il carico sulla guida ed assicurare che esso venga contenuto entro gli stretti limiti indicati, si può intervenire quindi mediante un distanziatore meccanico D (descritto in Appendice) che regola la distanza fra il materiale sospeso e la guida installata parallelamente alla via<sup>(10)</sup>.

La lunghezza utile del distanziatore viene regolata da un motore (ad esempio di tipo passo-passo) che si mette in moto nel senso di ridurre la distanza quando il carico, misurato attraverso una cella di carico inserita nel distanziatore stesso, supera il livello massimo consentito e di aumentare invece la distanza stessa quando il carico scende sotto il limite inferiore.

Poiché la potenza netta richiesta a ciascun motore per comandare questi movimenti si riduce a pochissimi watt (carico <1000 N, velocità 1÷2 mm/s), può essere mantenuta entro limiti molto bassi l'inerzia del rotore, in modo da assicurare l'arresto istantaneo appena caduta l'alimentazione, al fine di evitare che, continuando il movimento, si possano raggiungere e superare i limiti di carico opposti a quelli dai quali si sono prese le mosse ed innescare così una serie di interventi pendolari che darebbe luogo ad un inutile affaticamento dell'apparecchiatura. Se invece l'arresto è immediato, il carico sulla guida rimane compreso entro i limiti ammessi e nessun altro intervento deve verificarsi fino a quando un difettoso allineamento dei magneti fuori dalle tolleranze ammesse od una spinta occasionale dall'esterno non lo rendono necessario.

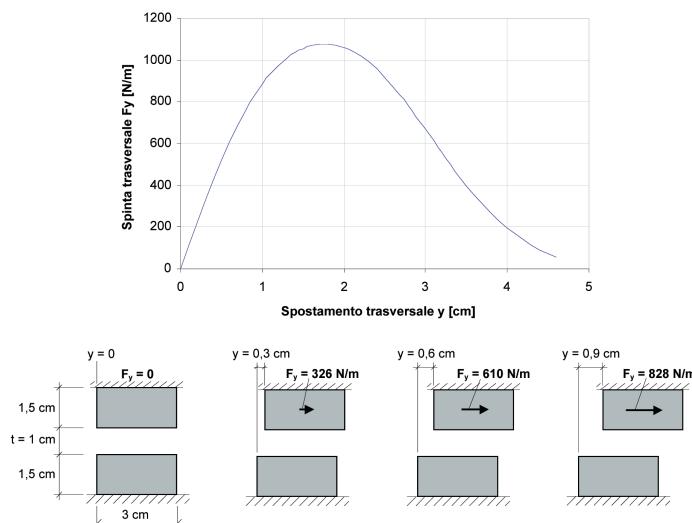


Fig. 9 - Spinta trasversale  $F_y$  in funzione dello spostamento  $y$ , per una sola coppia di magneti in Nd-Fe-B.

mente elevate, con conseguenti dimensionamenti che possono arrivare a qualche centinaio di kg per ogni metro di lunghezza del treno, come già dimostra l'applicazione di questa regolazione nell'esperienza del Transrapid.

In realtà per il materiale mobile di una metropolitana che opera a velocità relativamente ridotta (normalmente entro i 25 m/s, solo eccezionalmente oltre i 30 m/s), questa costosa attrezzatura non è indispensabile e può essere sostituita da un controllo meccanico della distanza fra veicolo e guida, che mantenga il carico  $F_g$  sulla guida entro limiti molto ridotti (non più del 1÷3% del peso  $P$  del veicolo), tali da non dar luogo ad usure precoci, aumento del-

<sup>(10)</sup> Ad esempio, nel caso di un convoglio con un peso totale  $P = 16.000$  N al metro lineare e composto da una successione di telai scorrevoli della lunghezza di 3 metri, si possono utilizzare 2 distanziatori per ciascun telaio scorrevole; in questo caso per ogni distanziatore il carico  $F_g$  sulla ruota di guida deve essere sempre compreso fra 240 e 720 N.

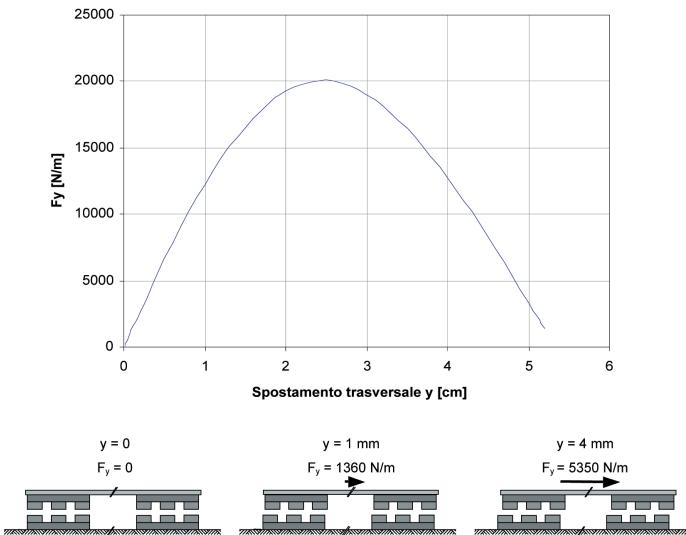


Fig. 10 - Spinta trasversale  $F_y$  in funzione dello spostamento  $y$ , per la composizione di magneti di figura 6.

### 5. Propulsione e frenatura

**5.1.** Alle forze di propulsione e frenatura provvede un motore lineare sincrono (LSM, Linear Synchronous Motor) [15], i cui induttori, formati esclusivamente da magneti permanenti, sono portati dal telaio scorrevole e corrono, senza venire con esso in contatto, attorno all'indotto applicato alla via per tutta la sua lunghezza (fig. 11).

La distanza  $D$  fra le facce interne degli induttori (fig. 12) deve essere superiore allo spessore  $i$  dell'indotto per circa 30÷40 mm, anche per evitare interferenze nei tratti in curva.

Sull'indotto, a sezione rettangolare ad elevato rapporto fra l'altezza e la base, è sistemato, con passo corrispondente alla lunghezza dei poli di eccitazione, un avvolgimento trifase (fig. 13), che viene alimentato a frequenza variabile da un generatore presente alla più vicina fermata.

I singoli poli degli induttori (altezza  $h$ , semipasso  $p$ ) sono composti da magneti permanenti in Nd-Fe-B ed hanno un profilo sinusoidale (fig. 14).

Di conseguenza, anche l'induzione  $B$  all'interno dei poli degli induttori ha

un andamento sinusoidale, raggiunge il valore massimo  $B_m$  in corrispondenza della mediana verticale del polo ed è rappresentata, lungo l'asse  $\xi$ , dall'espressione

$$B_\xi = B_m \sin \frac{\xi}{p} \pi$$

(fig. 15).

Per un polo formato da Nd-Fe-B (rimanenza  $B_r = 1$  Tesla) con spessore  $s$  [mm] e profilo  $y = h \sin \frac{x}{p} \pi$ , l'induzione  $B_m$  [T] sulla mediana verticale avrà il valore:

$$B_m = B_r \frac{2s}{2s + D - i}$$

**5.2.** L'indotto del motore lineare sincrono è scomposto in tanti tronchi, fra loro elettricamente isolati, quante sono le fermate presenti sulla linea interessata. La separazione fra tronchi successivi trova luogo alla progressiva equidistante fra le due corrispondenti fermate (fig. 16).

Ogni tronco, sul quale può circolare un solo treno alla volta, è alimentato da un unico generatore trifase (uno per direzione) presente nella corrispondente fermata, pilotato a sua volta in tensione e frequenza da un apposito programma preregistrato.

Mentre il treno si muove fra la fermata  $F_n$  e la fermata  $F_{n+1}$ , l'indotto è alimentato dal generatore  $G_n$  fra la fermata  $F_n$  e la progressiva intermedia

$$\frac{F_{n-1} + F_n}{2}$$

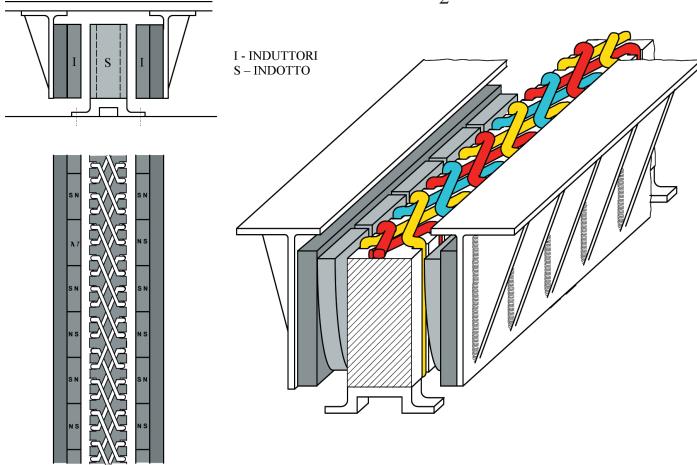


Fig. 11 - Motore lineare sincrono.

## SCIENZA E TECNICA

e dal generatore  $G_{n+1}$  fra la progressiva  $\frac{F_n + F_{n+1}}{2}$  e la fermata  $F_{n+1}$  (fig. 17).

Il generatore  $G_n$  presente nella fermata  $F_n$  alimenta perciò due soli tratti dell'indotto, l'uno compreso fra la progressiva intermedia  $\frac{F_{n-1} + F_n}{2}$  e la fermata  $F_n$ , l'altro fra la fermata  $F_n$  e la progressiva intermedia  $\frac{F_n + F_{n+1}}{2}$  e solo per questi brevi tratti deve essere programmato.

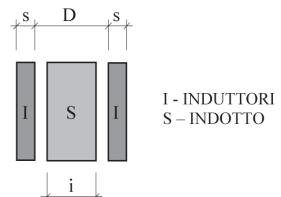


Fig. 12.

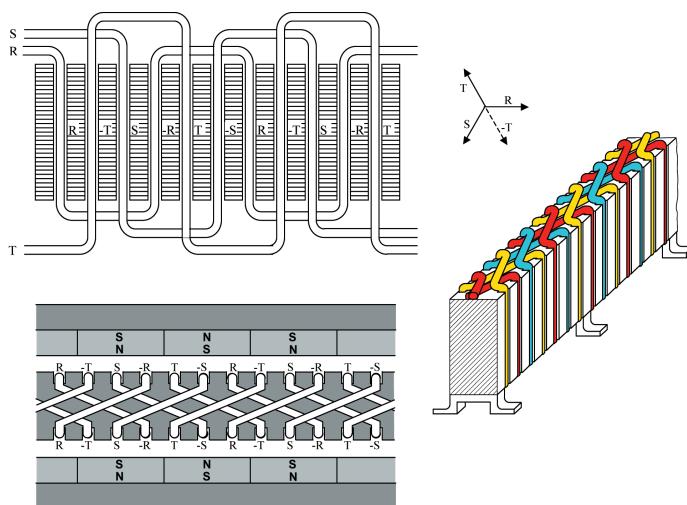


Fig. 13 - Indotto del motore lineare sincrono.

**5.3.** Nelle linee metropolitane il tratto di indotto compreso fra due fermate successive  $F_n$  ed  $F_{n+1}$ , ed alimentato dai rispettivi generatori, ha una lunghezza di alcune centinaia di metri, mentre la parte interessata alla propulsione, corrispondente alla lunghezza del treno, non supera i 30-40 metri. Ad evitare inutili perdite per effetto Joule, si può, con opportuno gioco di interruttori, suddividere l'intero tratto in più intervalli di diversa lunghezza, dei quali solo quello sul quale transita il treno viene alimentato.

Può essere opportuna una suddivisione in quattro intervalli, dei quali sono più brevi (circa 1/6 del totale) quelli che precedono o seguono le fermate, dove le accelerazioni positive o negative (ed i corrispondenti assorbimenti di corrente) sono più elevati, e più lunghi (circa 1/3 del totale) i due tratti centrali dove le accelerazioni sono molto più ridotte.

Nel caso di un intervallo di via di 900 metri fra due fermate successive, un sezionamento che risponde allo scopo è rappresentato in fig. 18.

**5.4.** Fra fermata e fermata il diagramma di marcia che assicura, a parità di tempo impiegato, il minimo dispendio energetico del nostro sistema (dovuto alle perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di indotto), è rappresentato da una parabola simmetrica (fig. 19) che risponde all'espressione [5; 16]:

$$v(t) = a_i t - \frac{a_i^2 t^2}{\sqrt{6a_i S}} \quad (1)$$

dove  $a_i$  [ $\text{ms}^{-2}$ ] è l'accelerazione iniziale (e finale) del convoglio e  $S$  [m] è la distanza fra le fermate  $F_n$  ed  $F_{n+1}$ .

A parità di percorso  $S$ , quanto più alta è l'accelerazione iniziale  $a_i$ , tanto più breve è il tempo impiegato a superare la distanza fra le due fermate; per es. un percorso di 900 m richiede 73,5" con  $a_i = 1 \text{ ms}^{-2}$  e soltanto 60" con  $a_i = 1,5 \text{ ms}^{-2}$  (fig. 20).

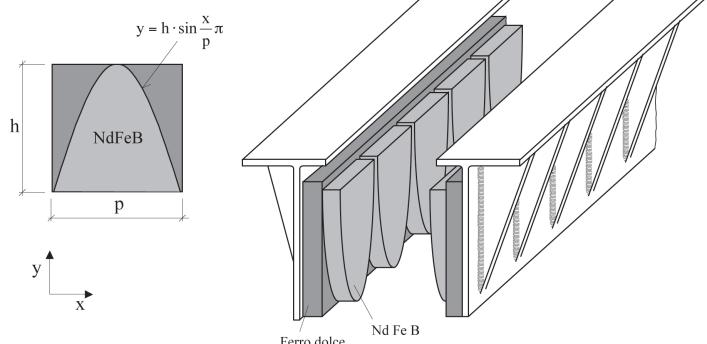


Fig. 14 - Configurazione dell'induttore.

## SCIENZA E TECNICA

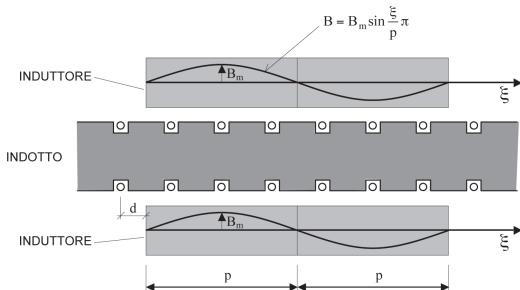


Fig. 15 - Andamento sinusoidale dell'induzione all'interno dei poli degli induttori.

**5.5.** In tutto il tratto fra le due fermate  $F_n$  ed  $F_{n+1}$  la velocità  $v$  [m/s] del treno è esattamente proporzionale alla frequenza  $f$  [periodi/secondo] con la quale il motore lineare sincrono è alimentato dal generatore  $G_n$  prima, e dal generatore  $G_{n+1}$  successivamente:

$$v = 2p \cdot f \quad (2)$$

dove  $2p$  [m] è il doppio passo polare dell'avvolgimento di indotto.

Per regolare in modo completamente automatico la marcia di un treno che ad ogni istante deve occupare una determinata posizione ed avere una ben precisa velocità occorre perciò programmare esattamente nel tempo la frequenza  $f = \frac{v}{2p}$  con la quale viene alimentato il motore lineare sincrono dai due generatori tra i quali è compresa la tratta interessata.

Considerando l'espressione (2) e ricordando che per ottenere, a parità di tempo impiegato, il minimo dispendio energetico la velocità del treno fra due fermate successive deve rispondere all'equazione (1), dovranno essere registrate per i diagrammi frequenza-tempo le espressioni:

$$f = \frac{1}{2p} \left( a_i t - \frac{a_i^2 t^2}{\sqrt{6a_i S}} \right)$$

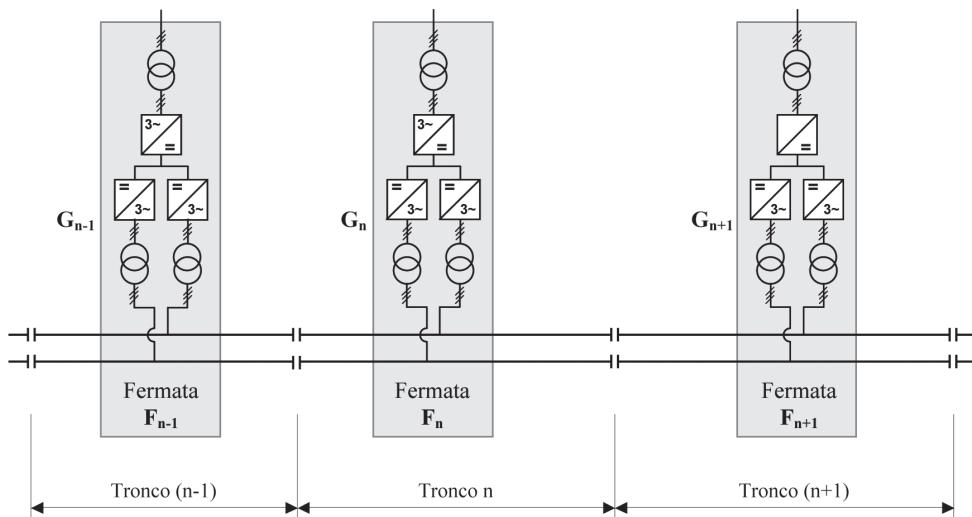


Fig. 16 - Schema di principio della scomposizione dell'indotto in tronchi, ciascuno dei quali è alimentato da un generatore trifase presente nella corrispondente fermata.

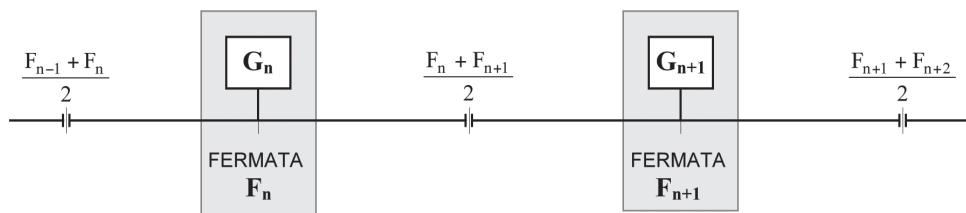


Fig. 17 - Alimentazione dei diversi tratti di indotto.

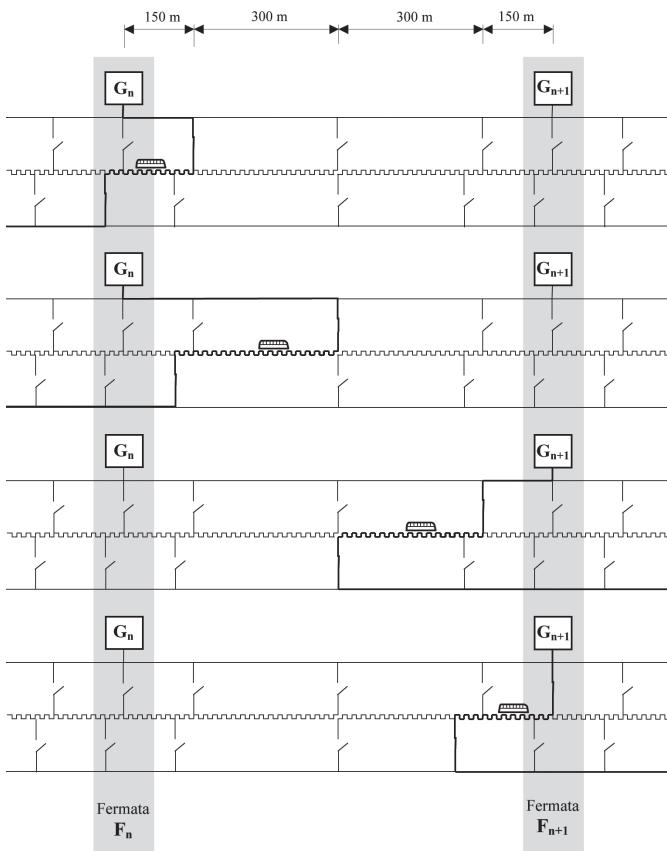


Fig. 18 - Suddivisione dell'indotto in tronchi e sezioni.

L'attivazione dei programmi preregistrati frequenza-tempo avviene: per il generatore  $G_n$  quando, subito dopo la sosta, il treno riparte dalla fermata  $F_n$  e per il generatore  $G_{n+1}$  nell'istante in cui la testa del treno ha

raggiunto la progressiva  $\frac{F_n + F_{n+1}}{2}$  esattamente equidistante fra le due successive fermate  $F_n$  ed  $F_{n+1}$  (fig. 21). Ne consegue la possibilità di comandare in modo completamente automatico la marcia di un treno secondo un qualsiasi orario. Se allo scadere dell'ora di partenza secondo orario il treno in stazione è pronto, si può partire con l'accelerazione normale alla quale corrisponde il programma preregistrato sul generatore presente in quella stessa fermata e si ha la certezza che l'arrivo alla stazione seguente avrà luogo con un sufficiente margine di tempo prima della successiva partenza. Se, invece, allo scadere dell'orario, in conseguenza del prolungarsi della sosta oltre la norma, il treno non è pronto e può mettersi in moto solo dopo qualche istante, dovrà essere inserito un programma  $f = f(t)$  più veloce, che permetta di recuperare qualche secondo e di ritornare alla puntualità dopo poche fermate (possibilmente già alla prima fermata).

Nella pratica, la scelta del programma  $f = f(t)$  più adatto fra gli infiniti possibili può essere effettuata automaticamente dal sistema di controllo, che individua caso per caso la migliore soluzione di compromesso fra risparmio energetico e rispetto degli orari di viaggio.

Per evidenziare i vantaggi di questa operazione si illustra, a titolo di esempio, il caso semplificato in cui, con due sole regolazioni, cioè con due soli diagrammi  $f = f(t)$  preregistrati in ogni ge-

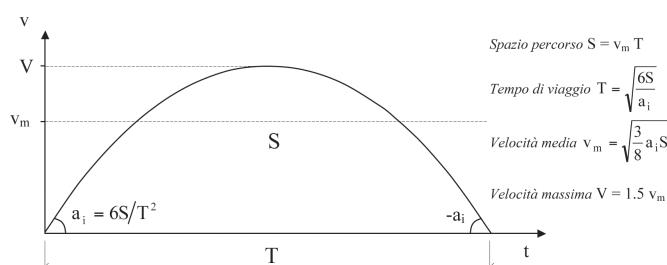


Fig. 19 - Diagramma di marcia ottimale fra due fermate successive.

## SCIENZA E TECNICA

dato alcun disturbo a tutti gli altri treni circolanti sulla stessa via).

**5.6.** Ai due programmi con accelerazione iniziale  $a_i = 1 \text{ ms}^{-2}$  ed  $a_i = 1,5 \text{ ms}^{-2}$ , se ne può aggiungere un terzo, che prevede una marcia continua senza arresti e velocità costante, corrispondente alla distanza fra capolinea e capolinea diviso per la somma dei tempi previsti per i singoli percorsi fra fermata e fermata e per tutte le soste intermedie.

Il treno che operi in queste condizioni raccoglie soltanto viaggiatori da capolinea a capolinea e dà un reddito molto limitato, ma funzionando a velocità così ridotta ha anche costi per consumi energetici praticamente irrilevanti. Questo modo di procedere può risultare interessante nelle ore

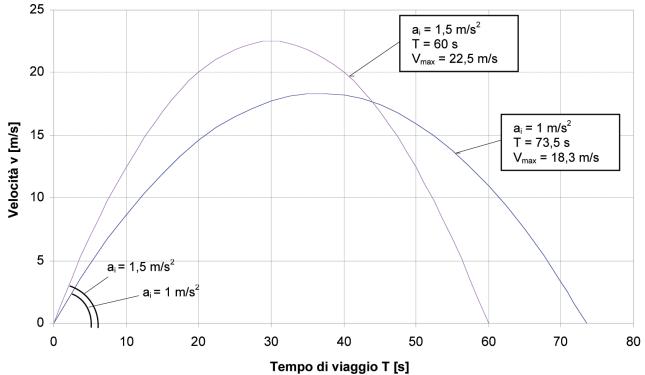


Fig. 20 - Diagramma di marcia con  $a_i = 1 \text{ m/s}^2$  e con  $a_i = 1,5 \text{ m/s}^2$ .

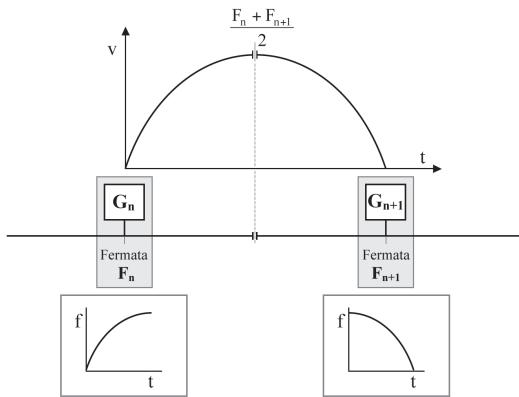


Fig. 21 - Attivazione dei programmi pre-registrati frequenza-tempo.

in cui il traffico rallenta e la domanda di trasporto si abbassa al di sotto del livello critico. Nell'orario della giornata possono perciò essere previsti determinati periodi in cui alcuni treni, operando in regime di bassa velocità e senza fermate, raccolgono pochissimi viaggiatori, ma hanno costi di esercizio praticamente nulli. Quando però la diminuzione della domanda si verifica in misura inferiore alle previsioni, il programma normale può essere immediatamente ripristinato con un semplice intervento dalla sala di comando.

Programmare un percorso a velocità costante senza fermate porta gli stessi risultati che si avrebbero togliendo il treno dalla circolazione, ma senza dover af-

frontare il costo delle necessarie manovre e senza dover disporre di un adeguato impianto per ricoverare il treno temporaneamente inattivo.

### 6. Caratteristiche dell'impianto

**6.1.** Le due composizioni di magneti permanenti fissi e l'indotto del motore lineare costituiscono gli elementi essenziali della via, alla quale deve essere data una sede riservata, facilmente ottenibile in una galleria sotterranea.

Stante l'assenza di personale sui convogli, in tutte le stazioni l'accesso ai treni dovrà avvenire attraverso controperte fisse sul bordo dei marciapiedi corrispondenti a quelle dei veicoli fermi. Il sistema, necessario per la sicurezza dei viaggiatori, garantisce anche una sicura separazione fra l'ambiente occupato dai viaggiatori in attesa e la via attrezzata con magneti permanenti.

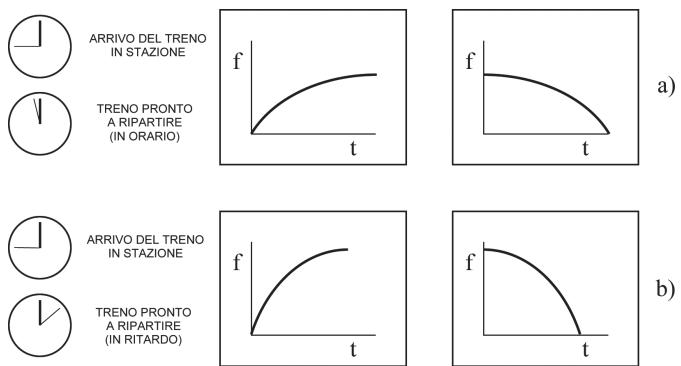


Fig. 22 - Diagrammi di marcia nel caso di treno in orario (a) e di treno in ritardo (b).

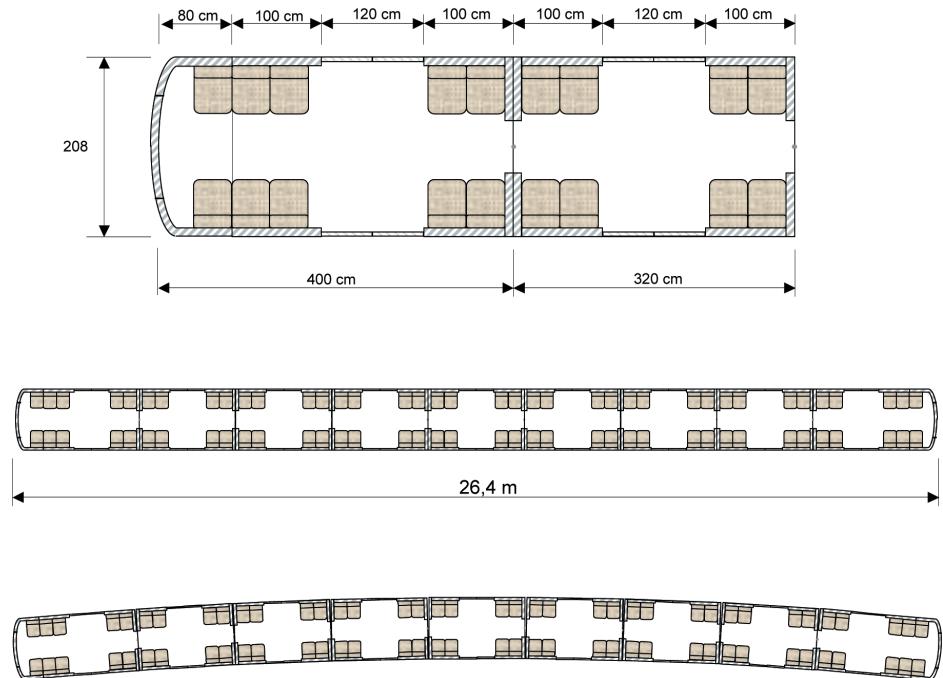


Fig. 23 - Convoglio con composizione modulare.

**6.2.** Il materiale mobile, costituito dall'insieme dei veicoli destinati ad accogliere i viaggiatori, può avere, a confronto con i sistemi convenzionali, pesi ed ingombri nettamente inferiori, in quanto è sostenuto con continuità e per tutto il suo sviluppo dagli allineamenti della composizione superiore di magneti permanenti portanti, e pertanto non è soggetto ai grandi momenti flettenti longitudinali che operano sui veicoli portati da carrelli.

Significativo può essere di conseguenza l'alleggerimento e la semplificazione costruttiva della struttura portante e la maggiore libertà nello scegliere soluzioni che rispondono nel miglior modo alle istanze più importanti, soprattutto massima rapidità nell'accesso e nell'uscita dai convogli e massimo numero di viaggiatori accolti in relazione alla lunghezza del treno.

A titolo di esempio, si illustra una proposta che risponde in modo completo a queste esigenze: ogni treno, la cui lunghezza complessiva è di 26,4 metri, è composto da 9 veicoli, 7 intermedi della lunghezza di 3,2 metri e 2 di estremità della lunghezza di 4 metri (fig. 23). Se il treno è in grado di ospitare almeno 8 viaggiatori per ogni metro di lunghezza, i posti offerti risultano, per ciascun veicolo intermedio: seduti 8, in piedi 18; per ciascun veicolo di estremità: seduti 8, in piedi 30; totale per treno: 258 posti, di cui 72 seduti, 186 in piedi.

Il convoglio è pertanto realizzato unendo un certo numero di veicoli molto corti (3,2 metri) e tutti identici fra loro, con la sola eccezione degli elementi di estremità. Il treno ha quindi una composizione modulare, e ciascun modulo è composto da un telaio scorrevole e da una porzione di carrozzeria (fig. 24). Gli elementi che compongono ciascun modulo svolgono funzioni nettamente distinte: il telaio scorrevole ospita tutti i dispositivi per il controllo del moto del veicolo (propulsione, frenatura, sostentamento, guida, sospensioni), mentre alla carrozzeria viene lasciato il solo compito di accogliere i passeggeri (in quanto il motore lineare è posto sotto il telaio scorrevole e la cabina di guida è assente).

Con veicoli di limitata lunghezza, anche gli spostamenti relativi fra le estremità dei veicoli adiacenti risultano molto ridotti (20 mm nei punti più lontani dalla mezzeria, con raggio minimo di curvatura di 200 m), il che facilita la realizzazione del rivestimento deformabile da applicare lungo tutto il perimetro.

### 7. Conclusioni

Il nuovo sistema di trasporto a levitazione magnetica, nel quale sostentamento e guida del materiale mobile so-

## APPENDICE

**Dispositivo per il controllo dell'equilibrio trasversale**

Una possibile soluzione per realizzare il distanziatore D, che si distingue per semplicità costruttiva e per piena affidabilità di regolare funzionamento, è rappresentata in fig. 25.

Montato su un proprio supporto S, il distanziatore D è applicato al telaio scorrevole T in posizione appropriata per poter essere allineato con la forza  $F_g$  che interagisce fra la guida laterale G parallela alla via e le due composizioni fissa e mobile dei magneti permanenti.

Fra il supporto S ed il telaio scorrevole T viene interposto un sottile strato di materiale elastomerico E, che consente piccoli spostamenti nella stessa direzione della forza di guida. Il dispositivo si compone di un cilindro centrale cavo C, alle estremità del quale sono ricavate delle scanalature interne elicoidali, che, accoppiandosi con scanalature dello stesso passo praticate su due cilindri  $C_1$  e  $C_2$  coassiali esterni, ne possono modificare in senso opposto la posizione longitudinale. I due cilindri agiscono, l'uno,  $C_1$ , contro la guida G parallela alla via e l'altro,  $C_2$ , contro il telaio scorrevole T.

Nella catena cinematica, o ad una delle sue estremità, è inserito un indicatore dinamometrico ID (cella di carico), che genera un segnale proporzionale al carico  $F_g$  trasmesso lungo la catena stessa. Se il carico  $F_g$  non rientra nei limiti ammessi ( $1\frac{1}{3}\%$  del peso P del veicolo):  $0,01 \cdot P < F_g < 0,03 \cdot P$  viene, a mezzo del driver DR, azionato un motore B (di tipo passo-passo o brushless), che collegato al cilindro centrale C, ne attiva la rotazione con la corrispondente variazione della lunghezza utile di tutto il collegamento (la rotazione avviene in un senso quando  $F_g > 0,03 \cdot P$  e nel senso opposto quando  $F_g < 0,01 \cdot P$ ). La manovra, che deve avvenire a velocità costante, si arresta automaticamente non appena il carico interagente fra la guida G esterna parallela alla via e la composizione di magneti che sostengono il veicolo è rientrato entro i limiti prefissati.

Fra motore B e distanziatore è inserita una fortissima riduzione (consigliabili i gruppi epicicloidali in serie), tale che per es. a  $n = 1000$  giri/min del motore corrisponde una velocità di  $1 \text{ mm/s}$  nella variazione di lunghezza del distanziatore.

La velocità di intervento del motore B è regolata secondo l'entità ed il verso della differenza esistente fra il carico effettivo  $F_g$  ed il carico ammesso  $0,01 \cdot P < F_g < 0,03 \cdot P$ . Si propone ad es. la regolazione:

$F_g < 0,01 \cdot P$	$n [\text{giri/min}] = -1000$
$0,01 \cdot P \leq F_g \leq 0,025 \cdot P$	$n [\text{giri/min}] = 0$
$0,025 \cdot P < F_g \leq 0,03 \cdot P$	$n [\text{giri/min}] = +200$
$0,03 \cdot P < F_g$	$n [\text{giri/min}] = +1000$

Con questa regolazione, se si dispongono due distanziatori per ogni telaio scorrevole, e ciascuno dei telai è

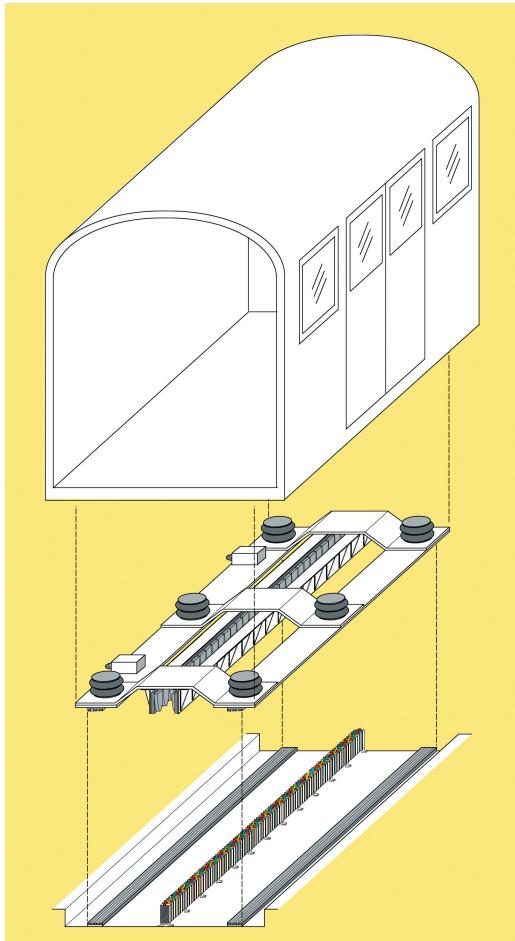


Fig. 24 - Composizione modulare del veicolo Maglev.

no assicurati dall'azione di magneti permanenti operanti in opposizione, è particolarmente adatto all'impiego per servizi metropolitani e può portare, nei confronti degli impianti tradizionali, a rilevanti economie sia nei costi di primo impianto che in quelli di esercizio.

In questa nota sono stati chiariti gli aspetti essenziali dei vari componenti totalmente o parzialmente innovativi, che di questo impianto sono parte essenziale, allo scopo di dimostrare la completa fattibilità della proposta.

Questi risultati rappresentano una sicura base per poter procedere ad ulteriori approfondimenti di dettaglio ed alla successiva verifica sperimentale su un impianto di prova.

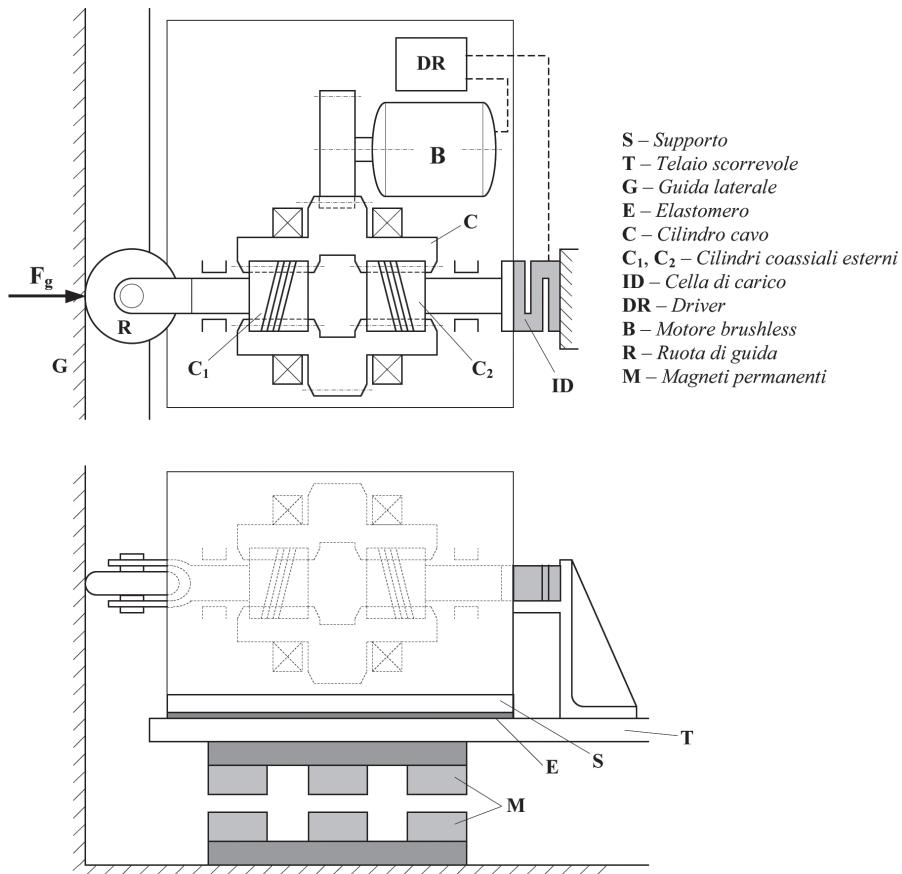


Fig. 25 - Schema del dispositivo distanziatore per il controllo dell'equilibrio trasversale del veicolo.

lungo ad es. 3 metri e con una massa a pieno carico di 16.000 N/m si avrà, su ciascuna delle due ruote a contatto con la guida, un carico di 720 N, per una durata massima di pochi secondi. Ovviamente un carico così basso non può dar luogo a disturbi dinamici, né ad usura.

Ad evitare pendolamenti continuati fra le condizioni  $F_g < 0,01 \cdot P$  e  $F_g > 0,03 \cdot P$ , e ricondurre regolarmente il distanziatore in una posizione intermedia fra quelle corrispondenti al minimo ed al massimo valore del carico sulla guida, è bene accertare che la coppia di resistenza passiva del rotore sia sufficiente per assicurare l'arresto in non più di un giro, non appena viene a mancare il segnale proveniente dalla cella di carico. L'inerzia del rotore di questi motori è molto bassa: raramente arriva a  $10 \text{ kgmm}^2$ . In queste condizioni ad una velocità di 1000 giri/min  $\approx 100$

rad/s, la forza viva del rotore vale  $\frac{1}{2} I \omega^2 = 0,5 \text{ Nm}$ ; per determinare l'arresto in 5 radianti basta una coppia resistente di 0,01 Nm, inferiore a quella che questi motori già presentano, senza necessità di alcun intervento.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Di MAJO, G. SCIARRONE, "Le altissime velocità nel futuro dei trasporti guidati", Centro Studi sui Sistemi di Trasporto, 1990.
- [2] L. BIANCO, F. Di MAJO, "Perspectives of high-speed rail transport in short-medium period", Transportation Research Part A, Vol. 25A, No. 4, pp. 193-202, 1991.

## SCIENZA E TECNICA

- [3] F. DI MAJO, "Sistema di Trasporto guidato senza contatto con sostentamento su magneti permanenti operanti in opposizione", Convegno Finale PFT2-CNR, Roma, 1999.
- [4] M. CAVAGNARO, V. DELLE SITE, F. DI MAJO, M. GOLIANI, "Repulsive magnetic levitation system with permanent magnets", World Congress on Railway Research, Tokyo, 1999.
- [5] F. DI MAJO, V. DELLE SITE, "Sistema di trasporto a levitazione magnetica di nuova generazione", Ingegneria Ferroviaria n. 1-2, gennaio-febbraio 2001.
- [6] A. MUSSO, C. PICCIONI, "Recenti esperienze di metropolitane in grandi aree urbanizzate", Ingegneria Ferroviaria n. 5, maggio 2004.
- [7] F. DI MAJO, M. CAVAGNARO, V. DELLE SITE, "Competitività e possibilità di sviluppo di un sistema di trasporto con sostentamento e guida su magneti permanenti operanti in opposizione", Atti del Convegno CIFI su "Ricerca e sviluppo nei sistemi ferroviari", Napoli, 9-10 maggio 2003.
- [8] F. DI MAJO, V. DELLE SITE, "Studio della soluzione Maglev", rapporto per lo Studio di Fattibilità di un "Sistema di Micrometropolitana per Firenze", Università di Firenze, novembre 2003.
- [9] ROLLIN J. PARKER, "Advances in permanent magnetism", John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [10] M. McCAG, A.G. CLEGG, "Permanent magnets in theory and practice", Pentech Press, London, 1987.
- [11] J.M.D. COEY, "Rare-earth iron permanent magnets", Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford, 1996.
- [12] F. DI MAJO, "Sistema di trasporto guidato senza contatto con sostentamento su magneti permanenti operanti in opposizione. Dimensionamento ottimale dei magneti", II Convegno Nazionale PFT2-CNR, Genova, 1995.
- [13] S. CARABELLI, F. CERRUTI, C. DELPRETE, F. DI MAJO, G. GENTA, S. ZANOLLI, "A two active-axes suspension for maglev vehicles", Proc. 5<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Bearings, pp.357-362, 1996.
- [14] S. CARABELLI, C. DELPRETE, F. DI MAJO, G. GENTA, S. ZANOLLI, "Passive repulsive maglev: concept and experimental demonstration", World Congress on Railway Research, Firenze, 1997.
- [15] F. DI MAJO, "Il motore lineare sincrono. Valutazione delle prestazioni e criteri di dimensionamento", Ingegneria Ferroviaria n. 7, 1988.
- [16] F. DI MAJO, "Laws of running giving the least traction cost", Rail International, Ottobre 1977.

*Al Prof. Ing. Franco Di Maio, classe 1910, per il suo 98° compleanno,  
le felicitazioni e gli auguri di Ingegneria Ferroviaria.*

## SCIENZA E TECNICA

### Sommaire

#### NOUVEAUX HORIZONS POUR LE TRANSPORT GUIDÉ À LÉVITATION MAGNÉTIQUE

La soudaine disponibilité de matériel magnétique à très haute énergie à des prix réduits de plus que quatre-vingt pour cent, par rapport à ceux en vigueur jusqu'à la fin du siècle passé, ouvre le chemin à des nouvelles solutions très compétitives pour les transports sans contact sur les aimants permanents opérants en opposition entre eux. Une importante application de ces nouveaux systèmes pourra intéresser le secteur des métropolitaines, des quelles on attend le dépassement des coûts externes très lourds que la congestionnée circulation de surface est en train de provoquer dans chaque partie du monde.

### Summary

#### NEW HORIZONS FOR MAGNETIC LEVITATION GUIDED TRANSPORT

The availability of high energy magnetic material costing less than 20% of the correspondent cost at the end of the previous century, opens the way to new highly competitive solutions for no-contact transportation on in-opposition permanent magnets. An important application of these new systems could regard the subway field from which a great contribution is expected to reduce the high outdoor costs that surface congested running is imposing in each part of the world..

### Zusammenfassung

#### NUOVI ORIZZONTI PER IL TRASPORTO GUIDATA A LEVITAZIONE MAGNETICA

Die Verfügbarkeit von magnetischen Stoffen, charakterisierte aus hoher Energie, schnell aufnimmt, während die Preisen immer niedriger werden. Dieser Zustand erlaubt neue hoch wettbewerbsfähige Lösungen im Transportwesen mit Fahrzeugen ohne Räder, die die Technik der Be-ruhrunglosen gegenseitig wirkenden ständigen Magneten benutzten.

Eine wichtige Anwendung dieser Technologie kann in den U-Bahnen stattfinden. In diesem Fall kann man eine starke Herabsetzung der Bau und Betriebskosten im Stadtverkehr erhalten.



**6141-05**

**DISPONIBILI N. 100 ESEMPLARI AL QUARZO**

**PREZZO:**

€ 130,00 IVA inclusa per i Soci;  
€ 160,00 IVA inclusa per i non Soci e abbonati alle riviste IF-TP;  
più € 10,00 spese di spedizione.

*Condizioni di pagamento:* pagamento anticipato sul c.c.p. N. 31569007 intestato a Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani – Via Giolitti, 48 – 00185 Roma, indicando la causale di versamento, oppure tramite bonifico bancario: INTESA SAN PAOLO - AG. 39 ROMA TERMINI - CIN: C - ABI: 01025 - CAB: 03251 - C/C: 100000000008 - IBAN: IT80 O03069 03235 100000000008 - BIC: IBSPITM.

Per informazioni e ordini contattare Sig. Stefano Leonetti FS. 970-6825 064742986 – Fax 064742987 – e-mail: amministrazione@cifi.it