



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA INDUSTRIALE



I treni merci lungo i corridoi europei: prospettive 2030

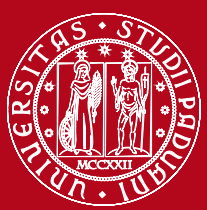
Sala Conferenze OMC Locomotive – Viale Stazione Porta Vescovo, 3 - Verona, 17 Novembre 2017

Tecnologie elettriche innovative per i treni merci del futuro

Prof. Andrea Tortella



Laboratorio
Macchine Elettriche

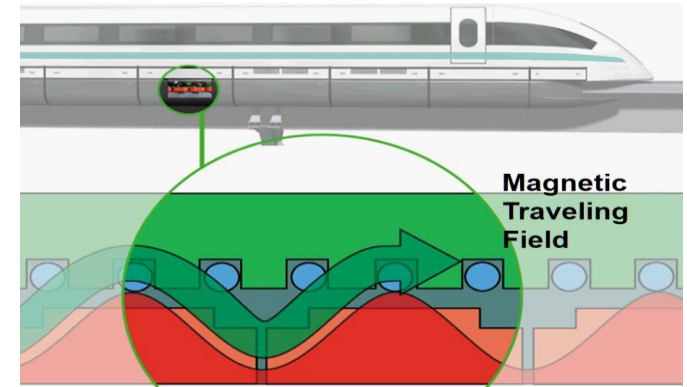


Sommario



- Sistemi di propulsione/trasmissione innovativi di tipo 'contact-less'
- Motori elettrici lineari
 - Motori lineari ad induzione (LIM)
 - Motori lineari sincroni (LSM)
- Levitazione magnetica ('Maglev')
 - Tipo EMS e EDS
- Trasmissione magnetica del moto ('magnetic gear')
 - Tipologie e prestazioni
 - Sistema di conversione di moto roto-traslatorio

*Trasmissione di forze e coppie per
interazione magnetica (senza
contatto meccanico)*



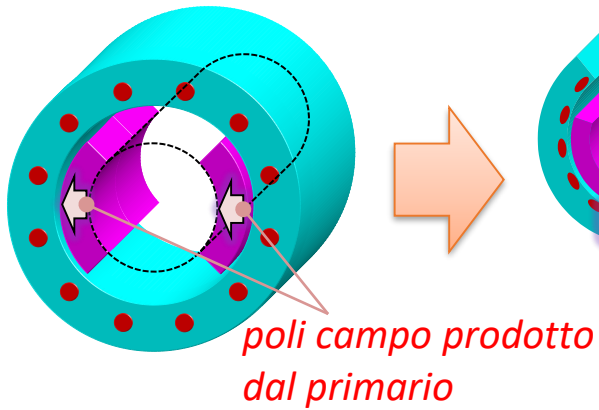
- Superamento di problemi relativi all'aderenza (curve, pendenze, condizioni ambientali, limiti di velocità,...)
- Minore manutenzione e rumorosità
- Incremento della capacità di trasporto (propulsione distribuita)
- Modularità

Pro

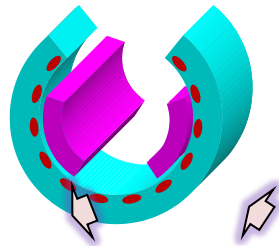
Contro

- Densità di forza limitate con sistemi di eccitazione 'standard'
- Indotto o induttore sulla parte fissa

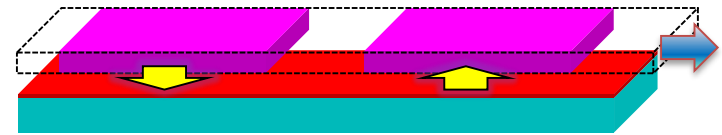
1. Macchina rotante



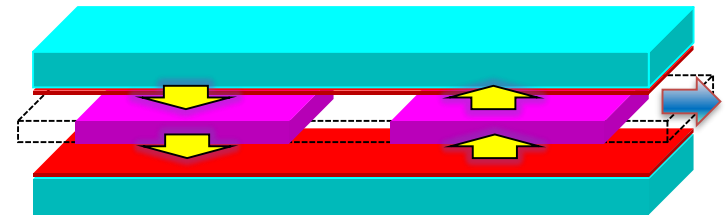
2. Taglio/srotolamento



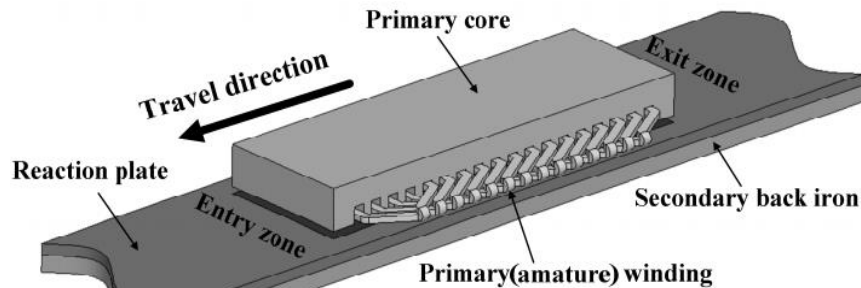
3. Motore lineare monolatero



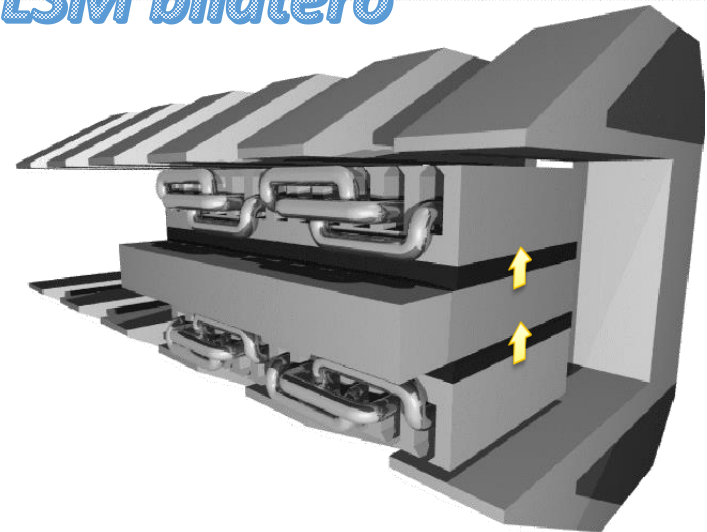
4. Motore lineare bilatero

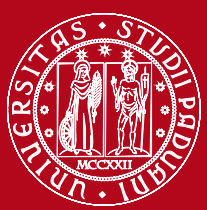


LIM monolatero

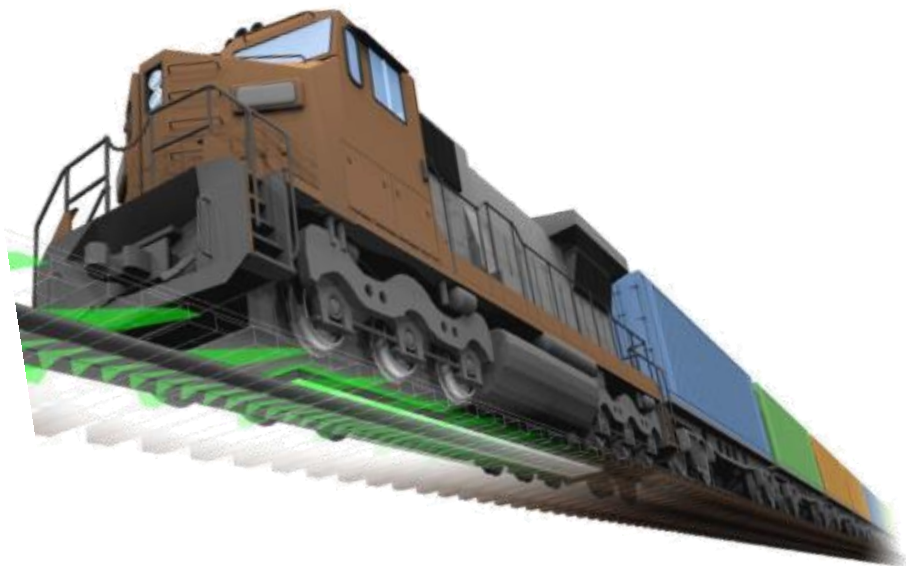


LSM bilatero

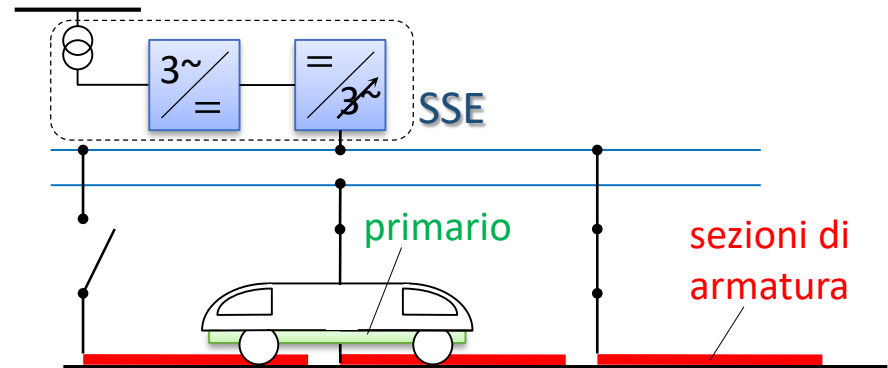
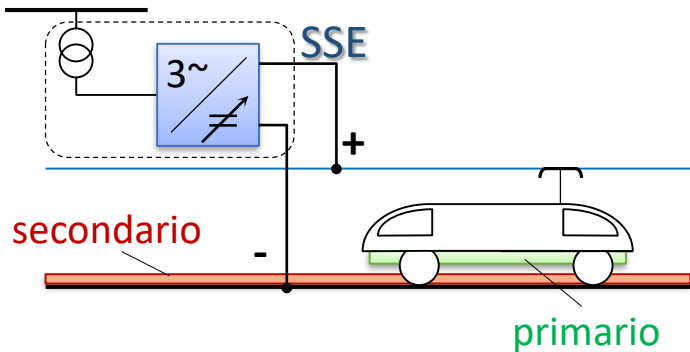




Trasporto merci con motori lineari



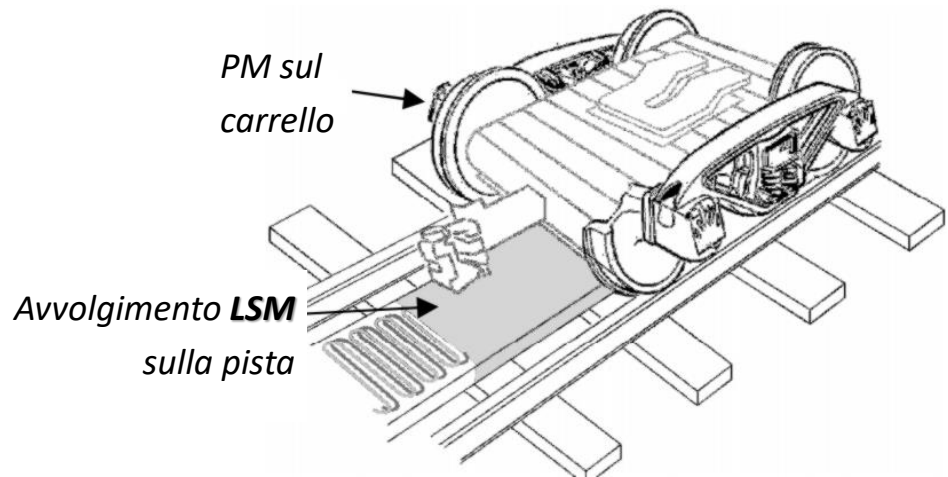
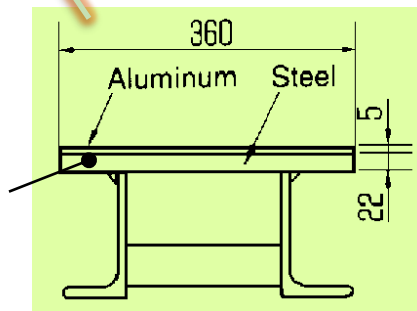
S. Gurol, "General Atomics Linear Motor Applications: Moving Towards Deployment", 2009



Veicolo ribassato

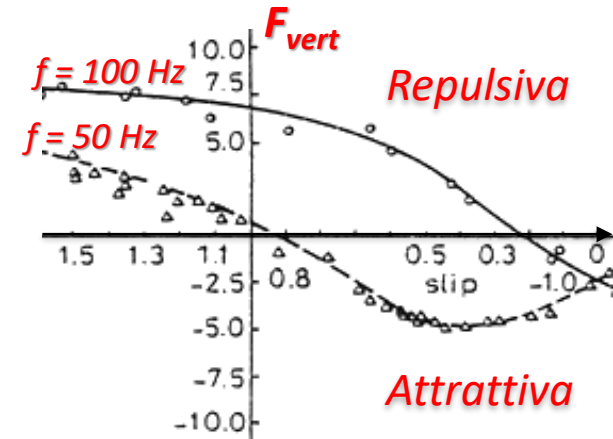
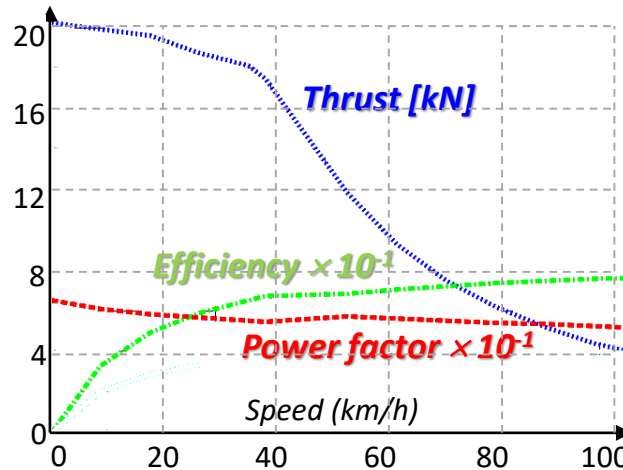
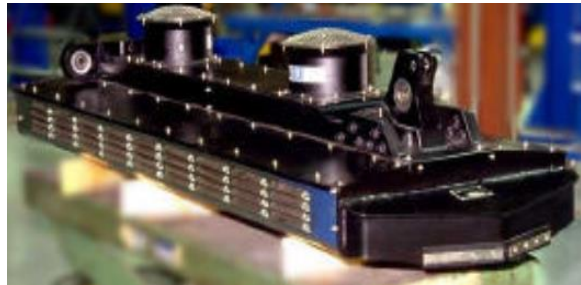
Sale sterzanti

3 mm Cu + 32 mm di giogo ferromagnetico
(tratti di accelerazione e decelerazione)



Bassa potenza a bordo, alimentazione della sola sezione attraversata, soluzioni con pista passiva ('alimentazione convenzionale')

Bombardier ART (Innovia)

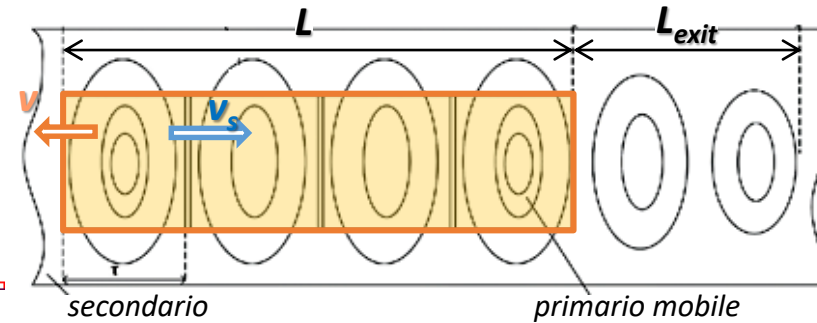
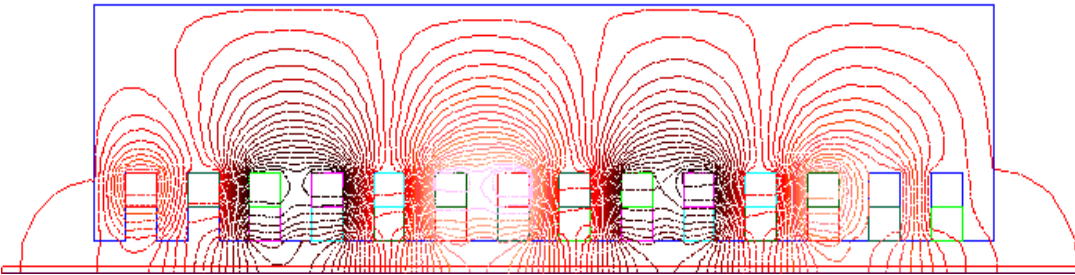


Number of Poles	6
Rated Voltage	570 V
Peak Thrust	20 kN
Vertical Force	25 kN
Peak Current	550 A
Rated Power	160 kW
Total Mass	640 kg
Length	2.23 m
Width	0.67 m

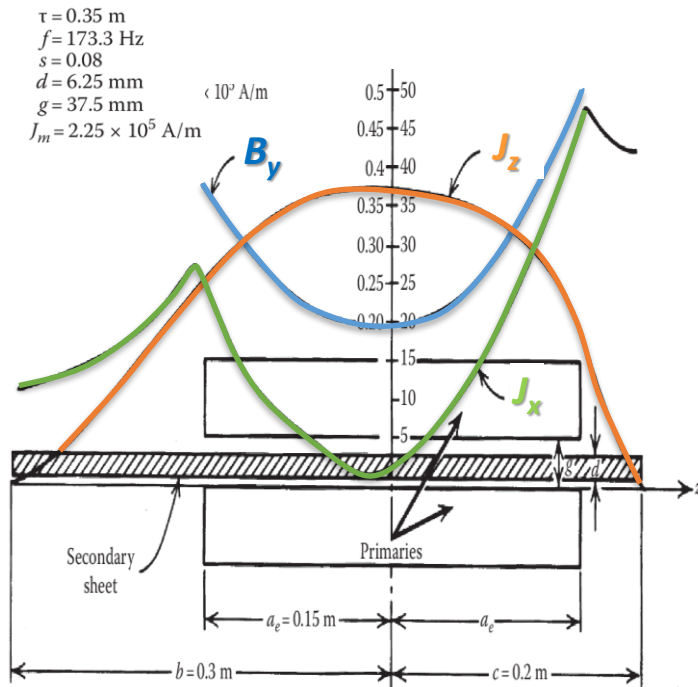
Hitachi Linear Metro

N. Motori	4 LIM/carrozza
Potenza motore	100 kW
Forza di spinta/LIM	1739 N (Cu) / 1706 N (Al)
Forza frenante/LIM	1880 N (Cu) / 1810 N (Al)
Traferro	12 mm
Accelerazione max	0.69 m/s ²
Max pendenza	8 %
Max raggio di curvatura	50 m

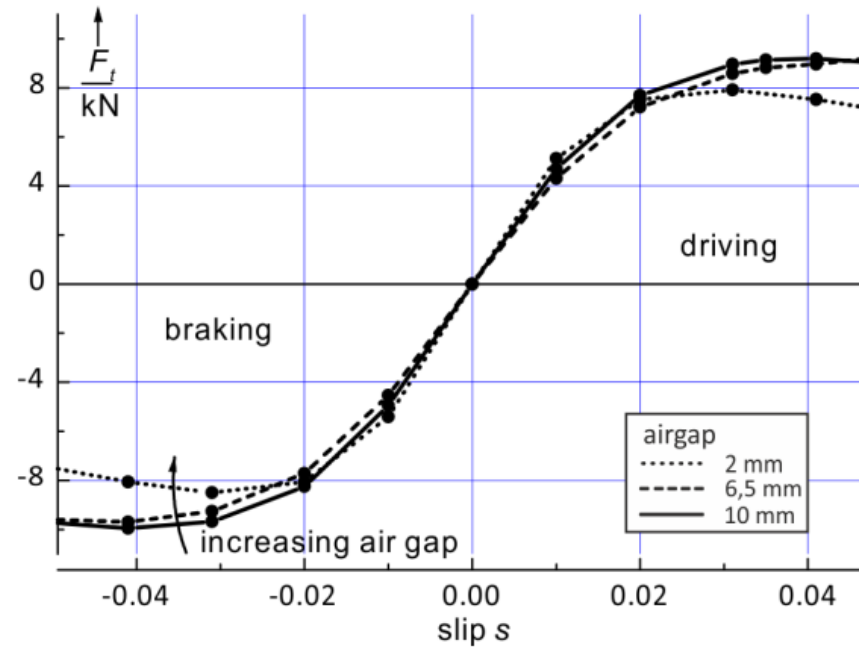
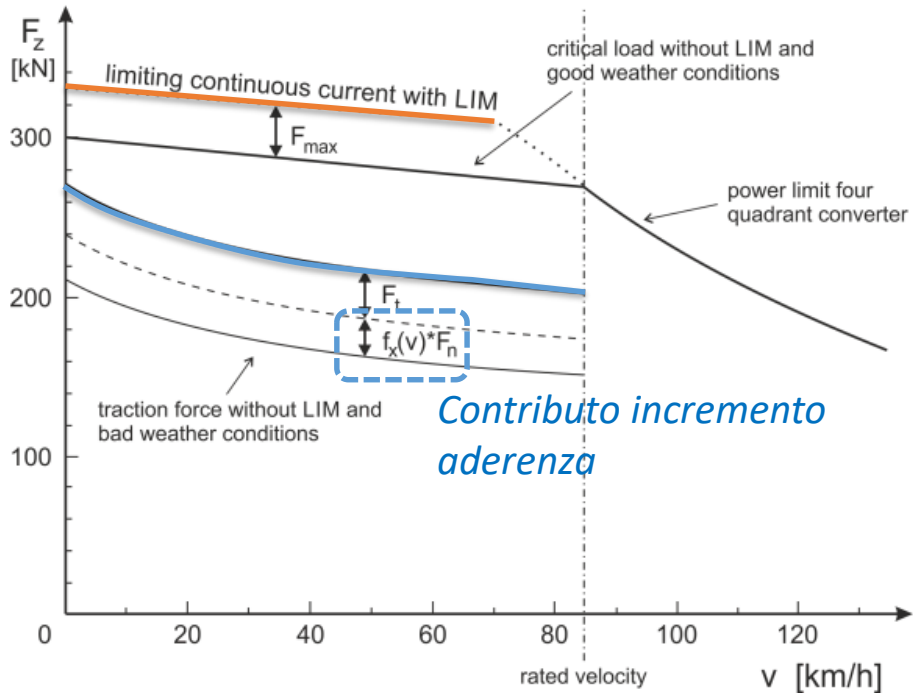
Effetti di bordo



- **F.e.m. indotte** **addizionali** alle estremità (perdite, contributo frenante, effetto smagnetizzante)
- **Dissimmetria parametrica** delle fasi di estremità \Rightarrow assorbimento di correnti squilibrate
- Componenti di corrente nella direzione del moto (J_x) \Rightarrow perdite addizionali, **forze laterali**
- Dipendenza da **vari parametri** (lunghezza e larghezza induttore, numero di poli, velocità e scorrimento)
- **Metodi di attenuazione**: distribuzione dell'avvolgimento, trasposizione fasi (più moduli), secondario più largo



Test su locomotiva BR-152 (4 assi – 6.4 MW)



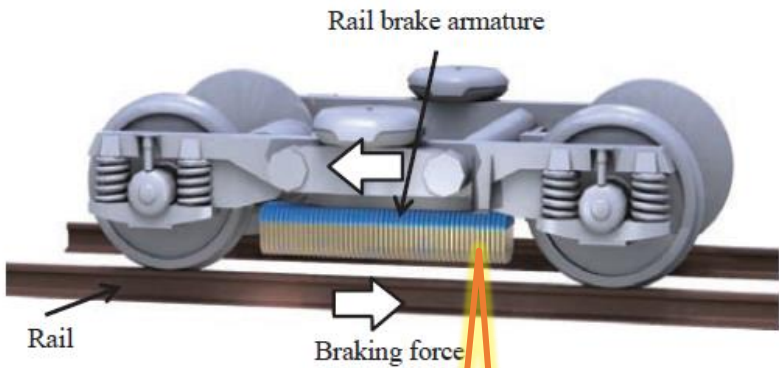
Use in tratte a forte pendenza

Spinta \Rightarrow max \approx 10 kN, scarsa influenza del traferro con basso scorrimento

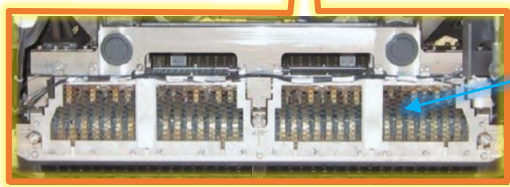
Forza attrattiva \Rightarrow max \approx 35 kN, ma riduzione apprezzabile con scorrimento e traferro

Massa \Rightarrow contributo addizionale \approx 2 ton/carrello

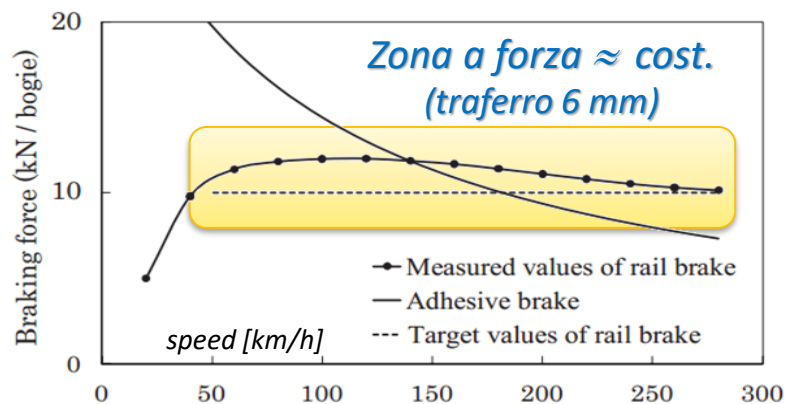
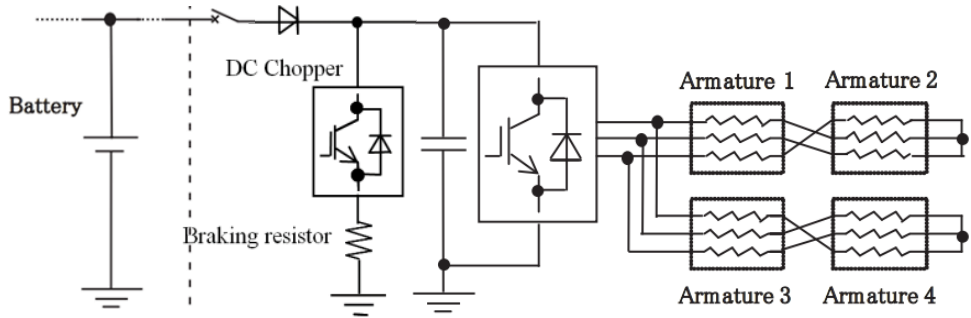
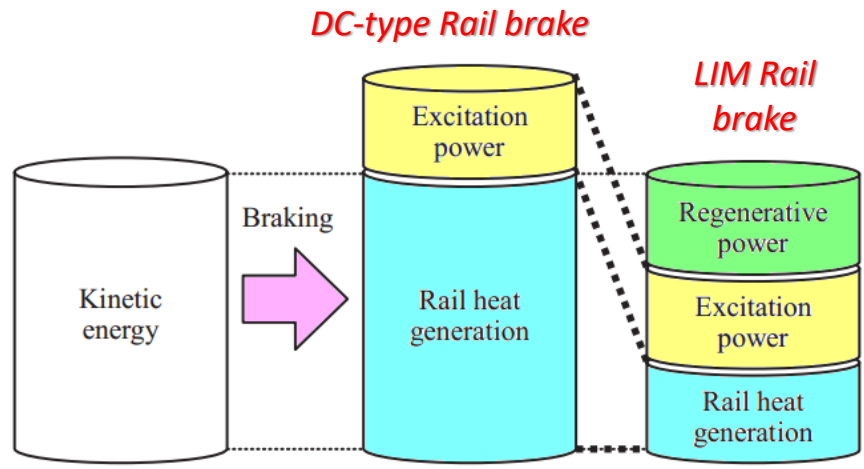
Possibilità di convertire l'energia cinetica tramite frenatura dinamica (LIG)



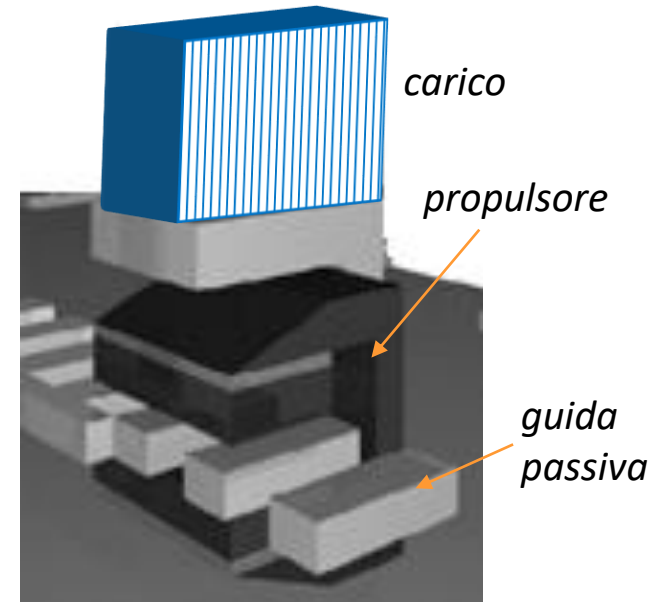
Massa \approx 280 kg



Bobine ad anello

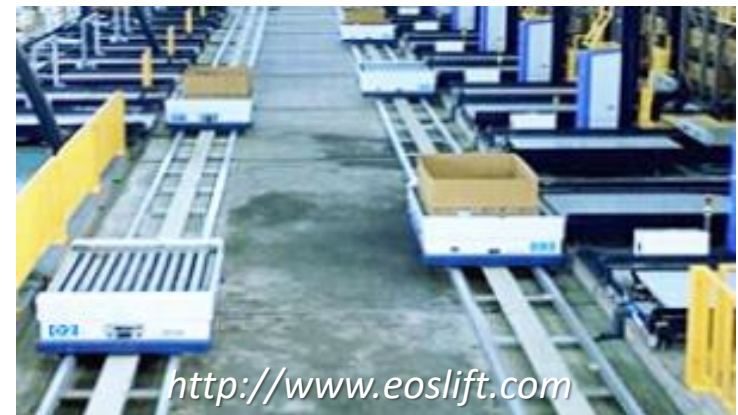
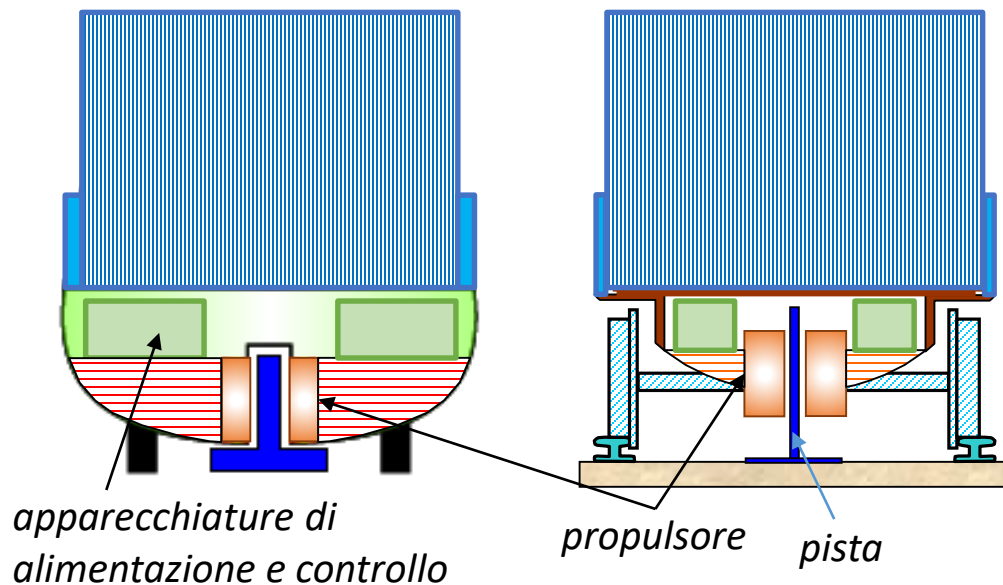


- Movimentazione autonoma ed automatizzata in **interporti** e **centri di logistica**
- **Requisiti** \Rightarrow bassa velocità ($v < 30$ km/h), facile integrazione con il carico, alta capacità ed automazione e superamento di pendenze (necessità di stoccaggio,...)
- Alimentazione **a bordo** e pista **'passiva'**

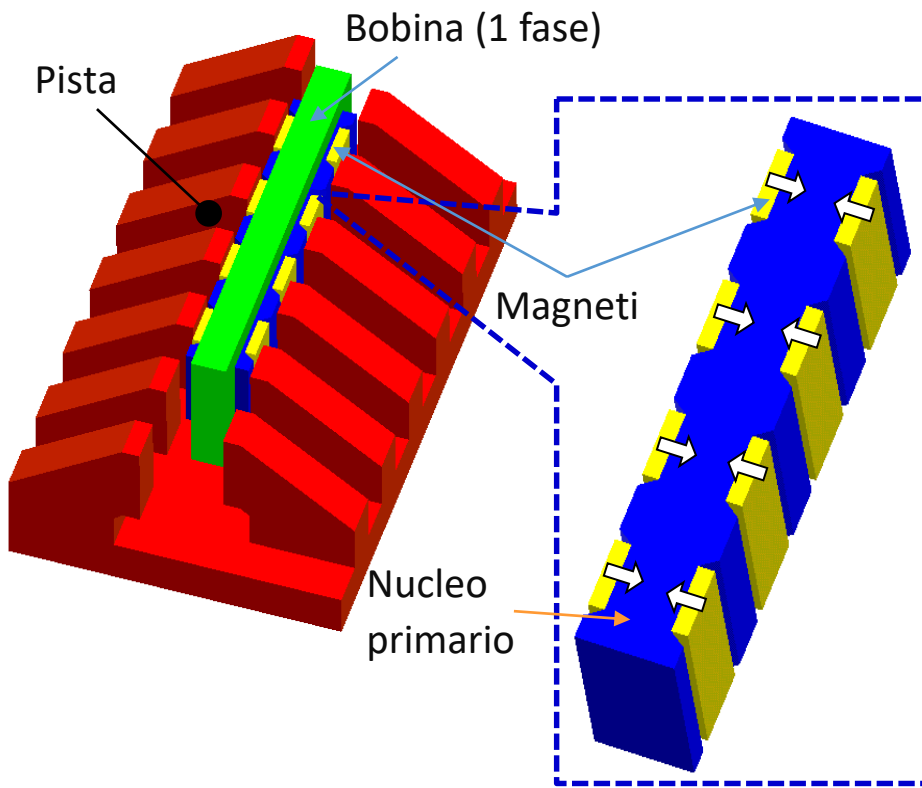


carico

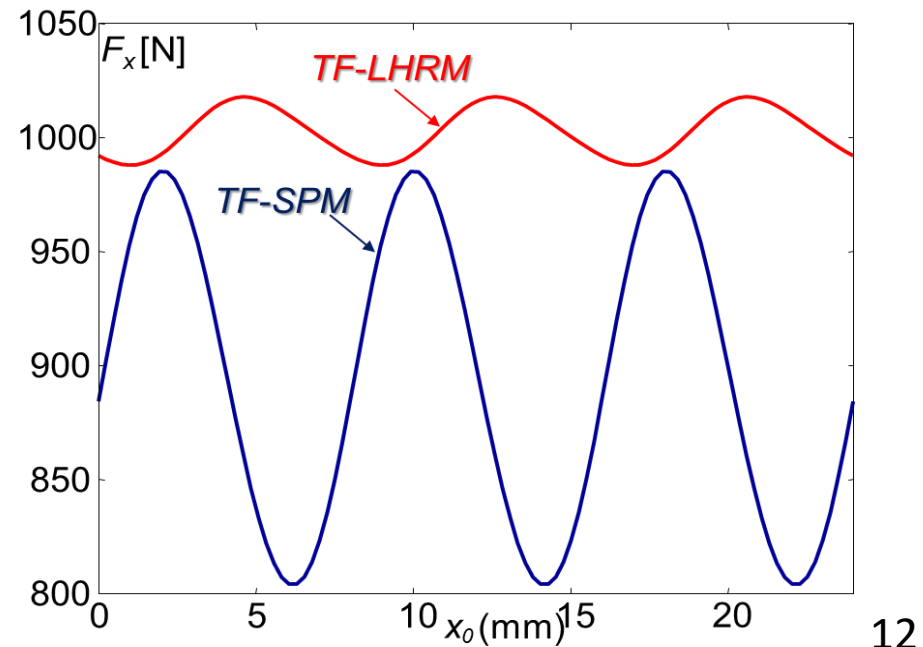
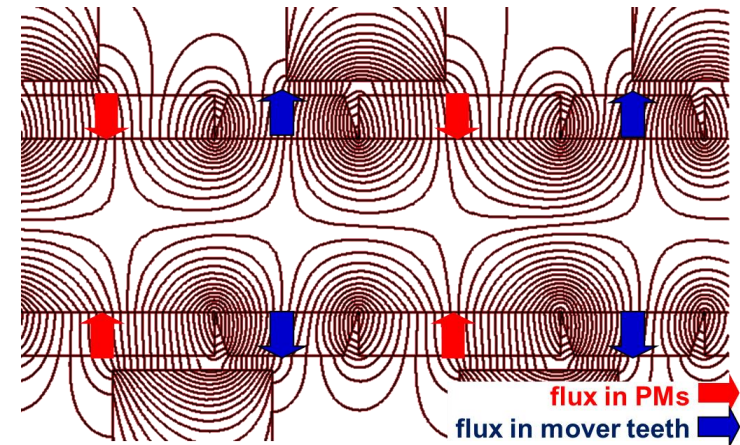
carico



Motore sincrono con magneti e bobine sul veicolo (alto rendimento) e pista passiva (costo ridotto)

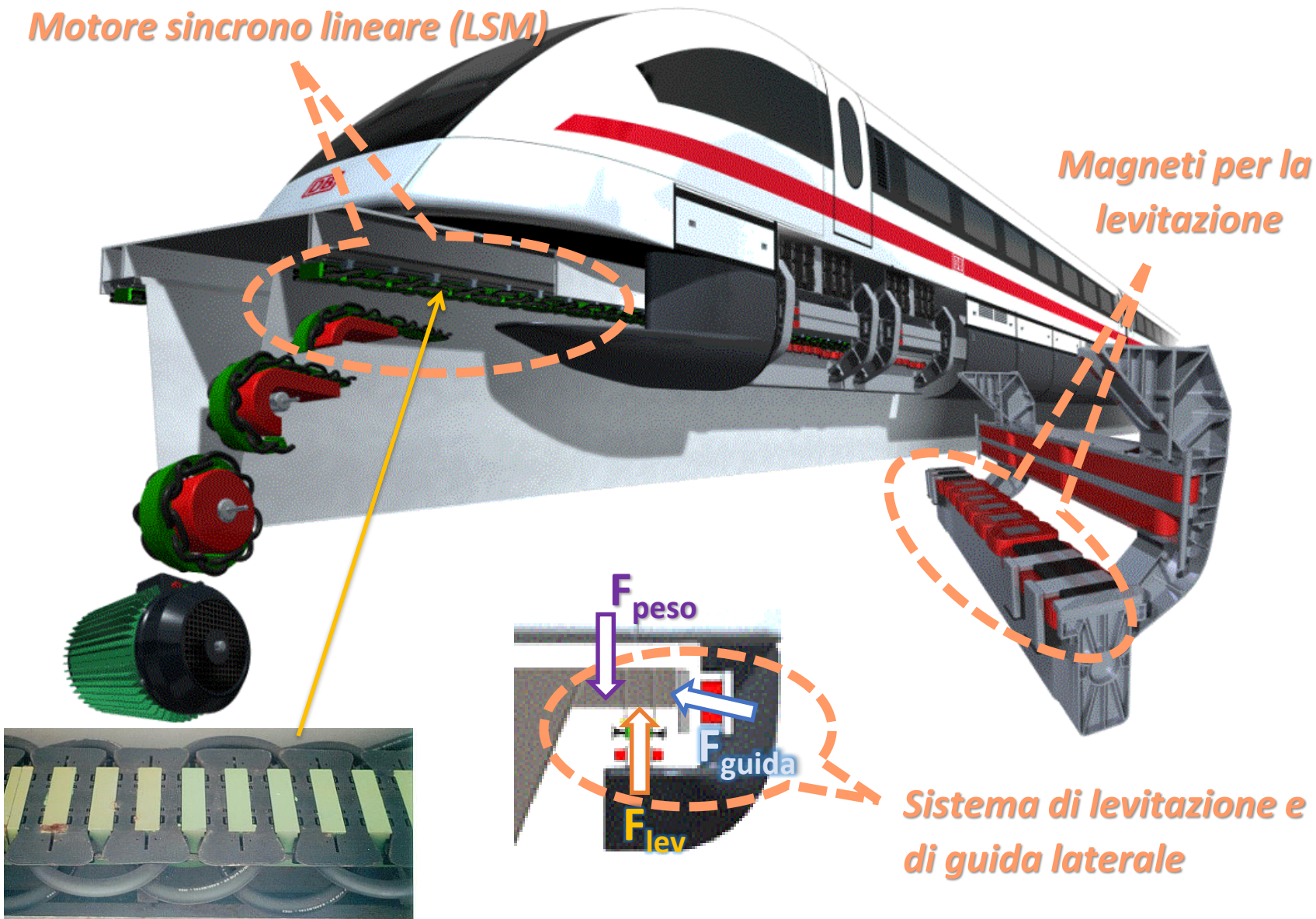


Principio di funzionamento basato sul 'Vernier effect'



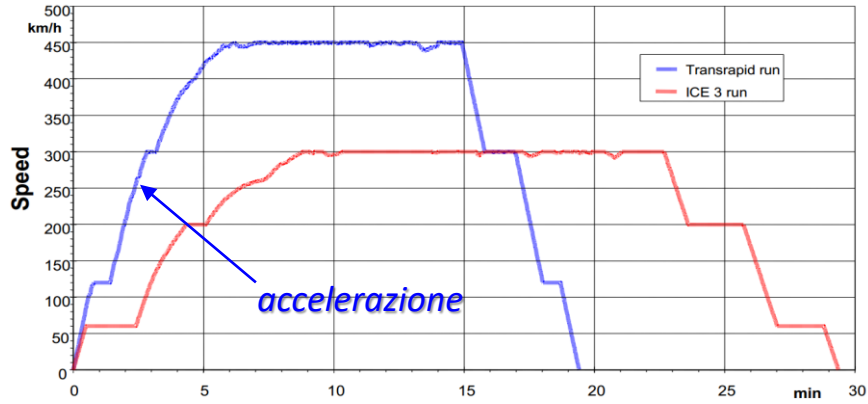
Motore sincro lineare (LSM)

Magneti per la levitazione

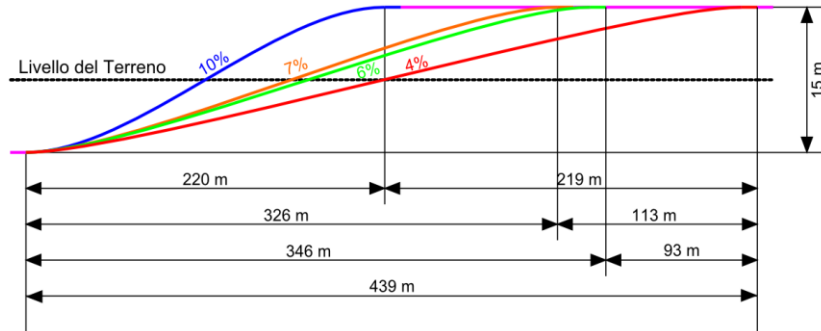
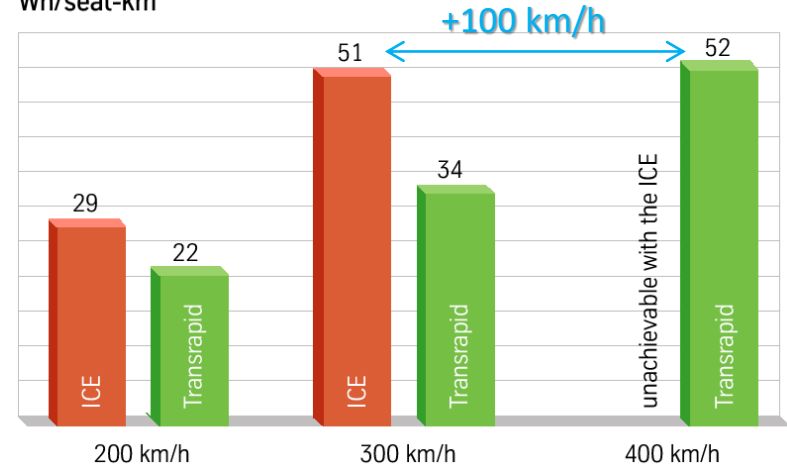


Sistema di levitazione e di guida laterale

Vantaggi Maglev

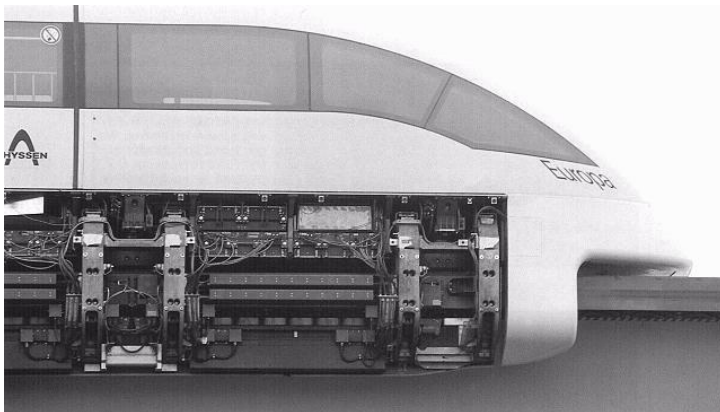
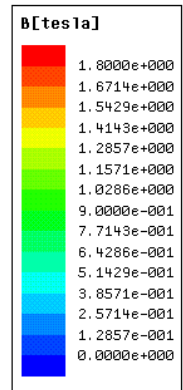
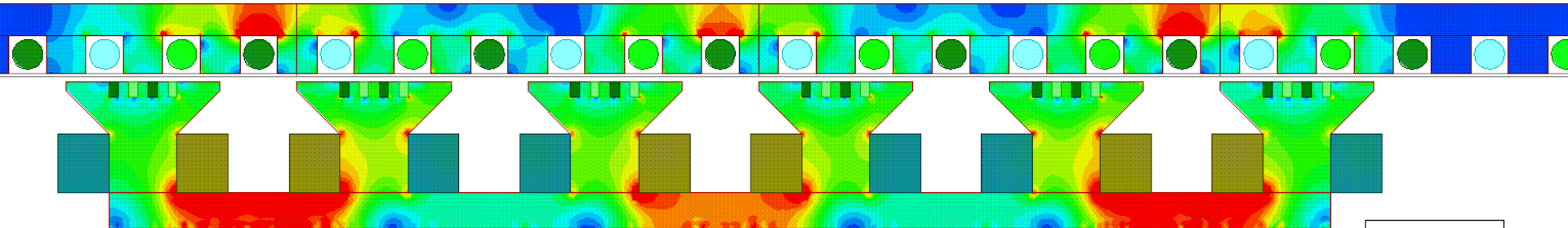
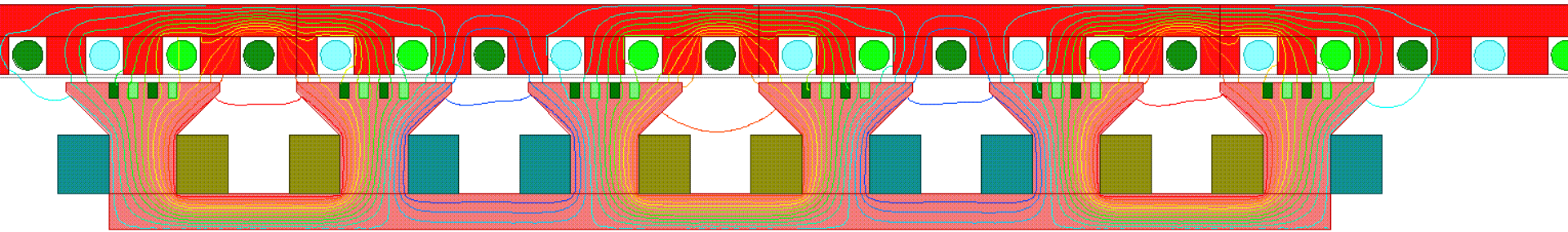


Specific energy consumption
Wh/seat-km



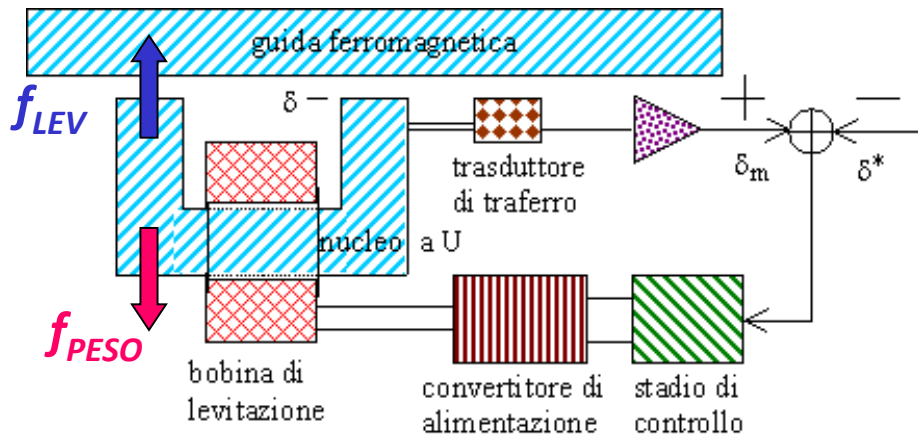
dB(A) @25 m (su un lato)



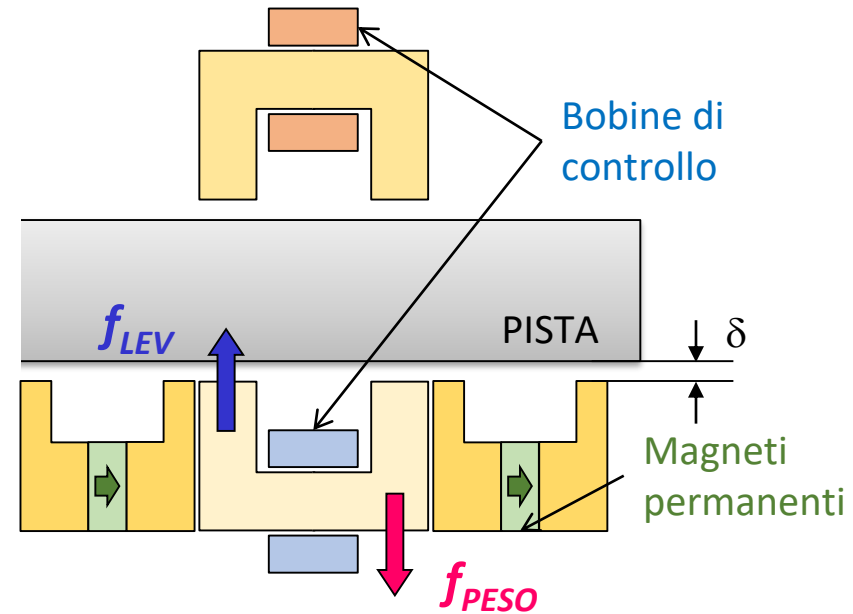


*Simulazione di una
ruota magnetica*

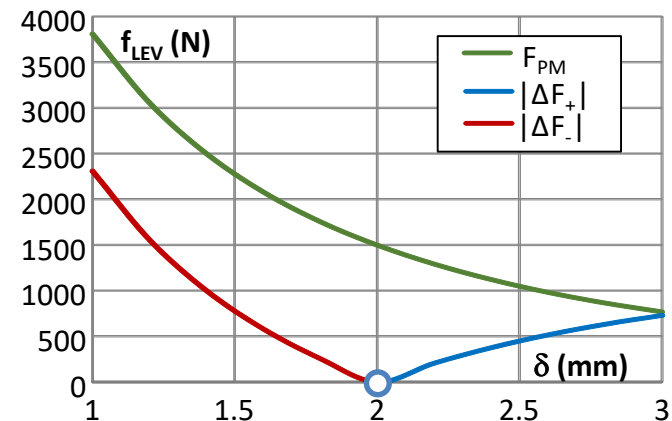
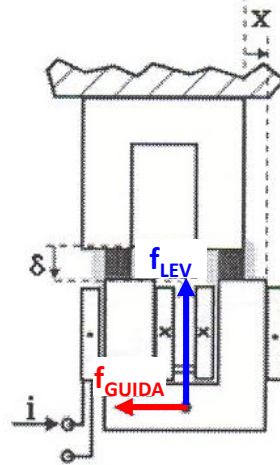
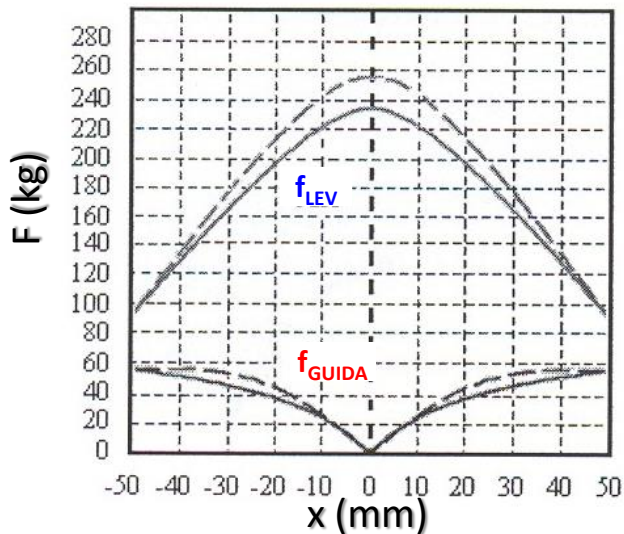
Elettromagneti convenzionali

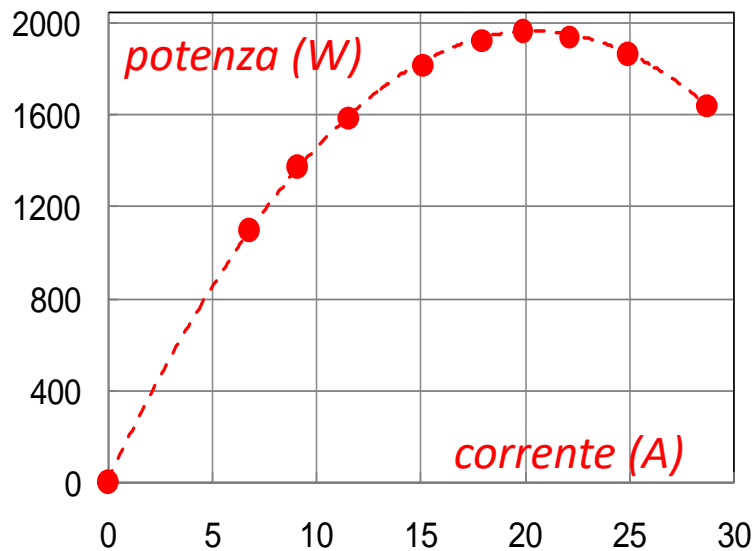
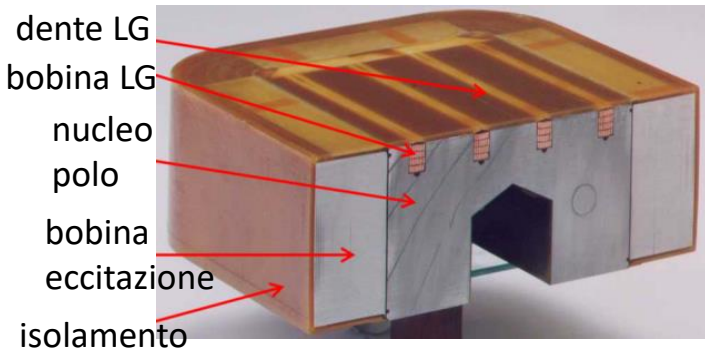


Elettromagneti ibridi



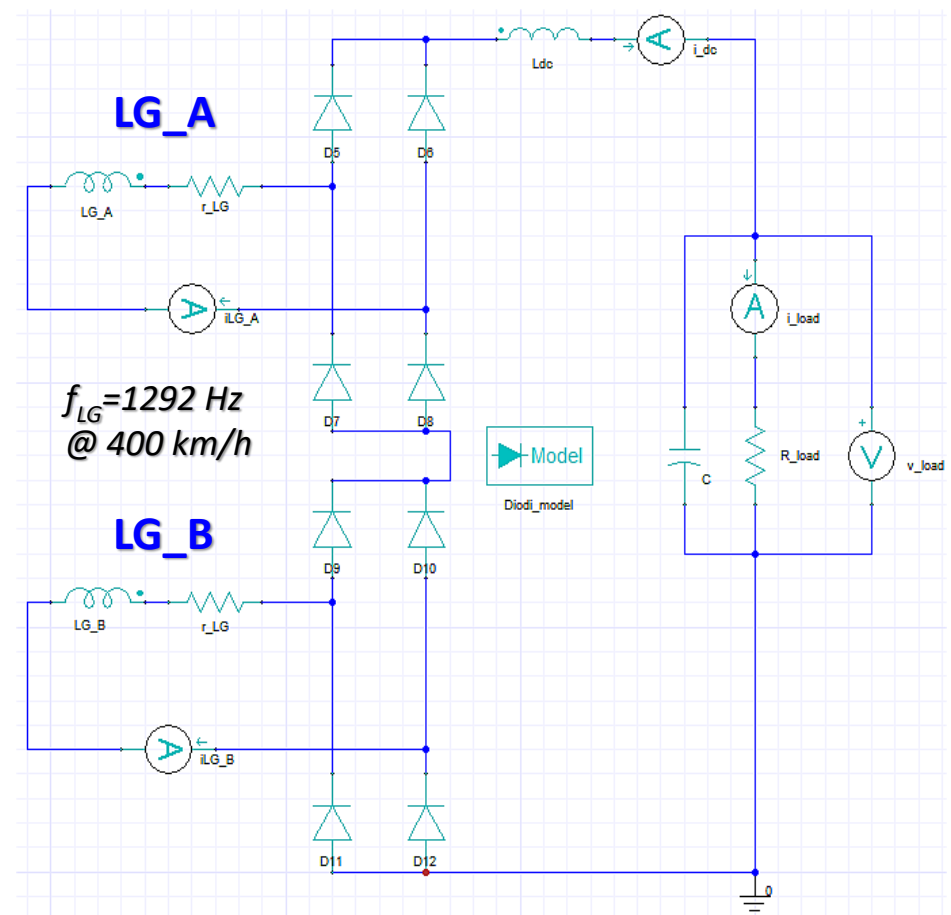
Guida laterale

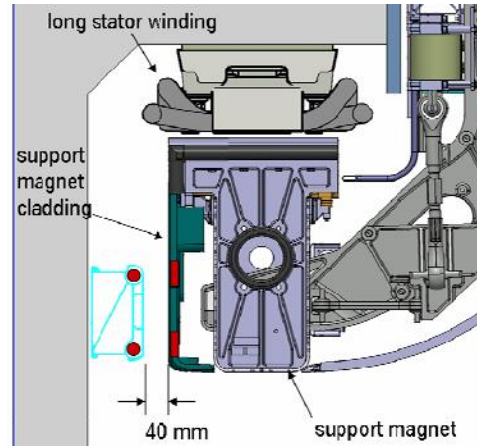
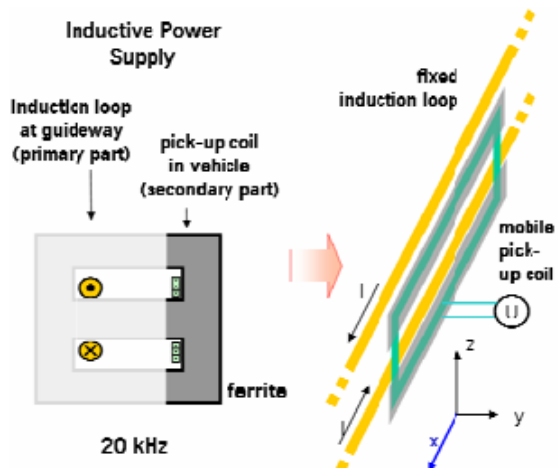




$P_{totale} \approx 260 \text{ kW @ } 400 \text{ km/h}$

Circuito di una ruota magnetica

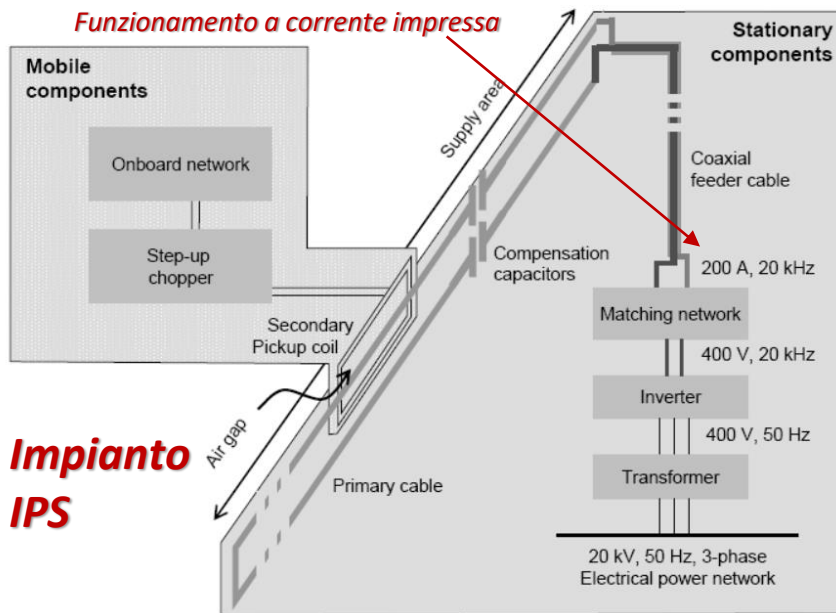




Alimentazione ad **alta frequenza** (20 kHz) con bobine distribuite sulla pista

Condensatori di compensazione in risonanza

Alcune **centinaia di kW** a 400 V (32 pick-up coil/sezione) con $v < 100$ km/h

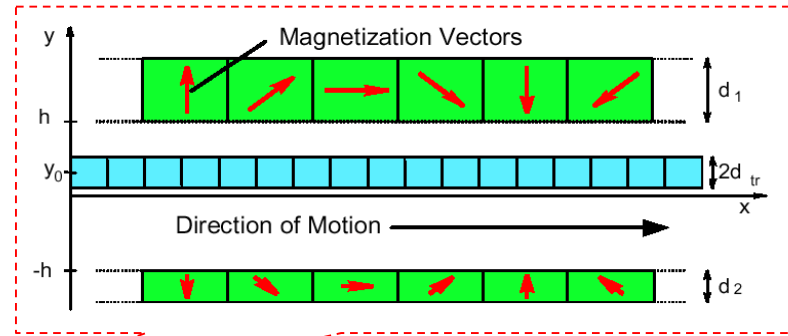
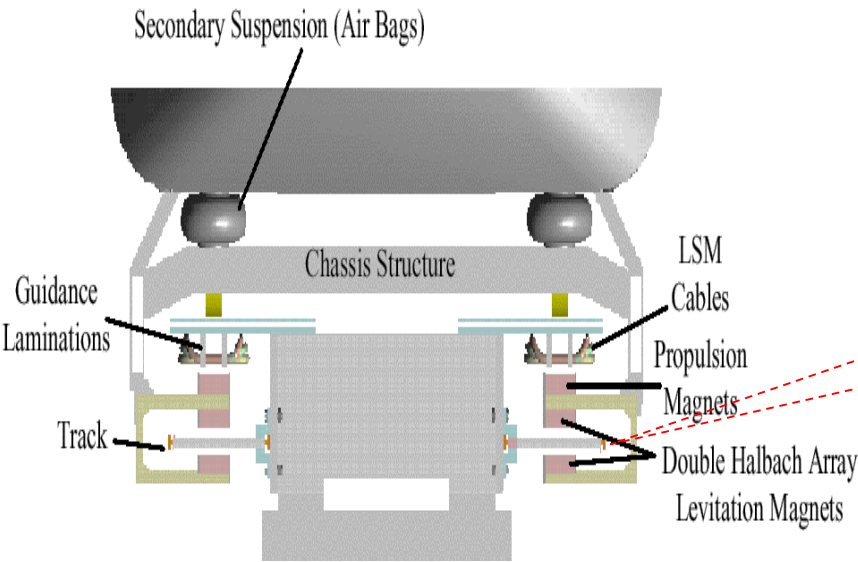


Cavo primario realizzato con filamenti isolati (tipo Litz) per riduzione effetto pelle

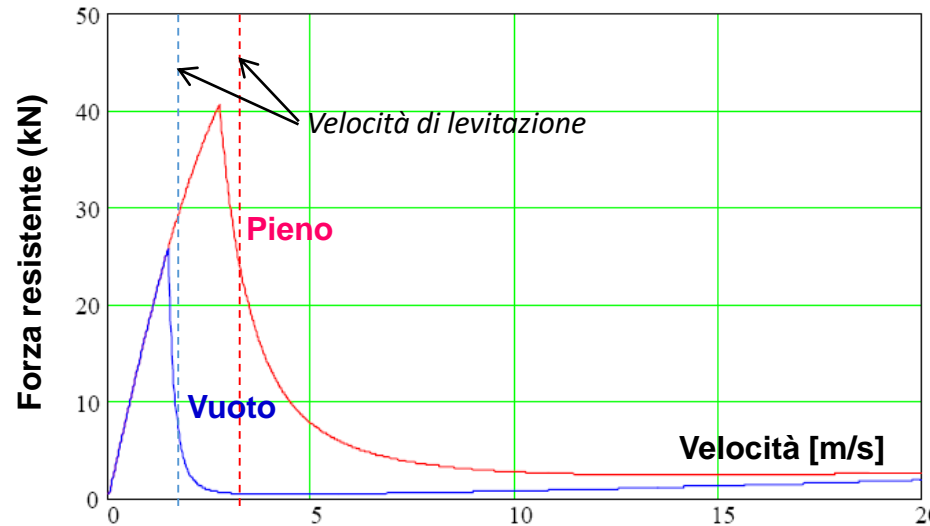
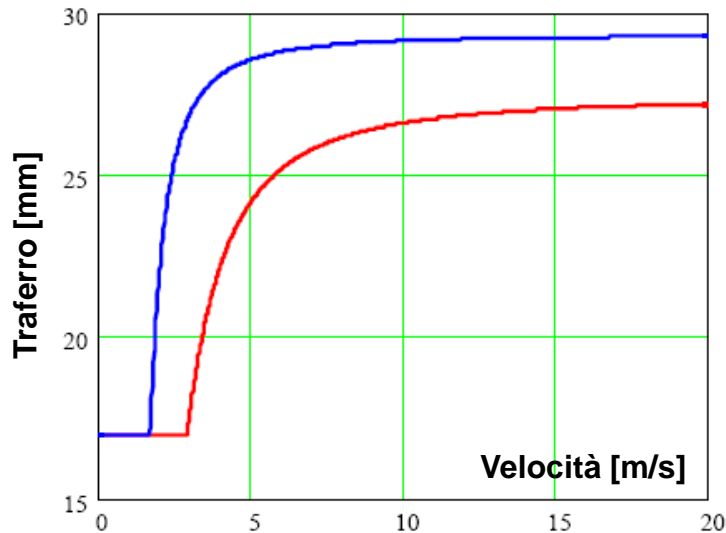


Supporti in materiali non conduttivi (vetroresina)





Azione repulsiva/centrante tra magneti sul veicolo e bobine in c.c. sulla pista
Pista sagomata anche per guida laterale



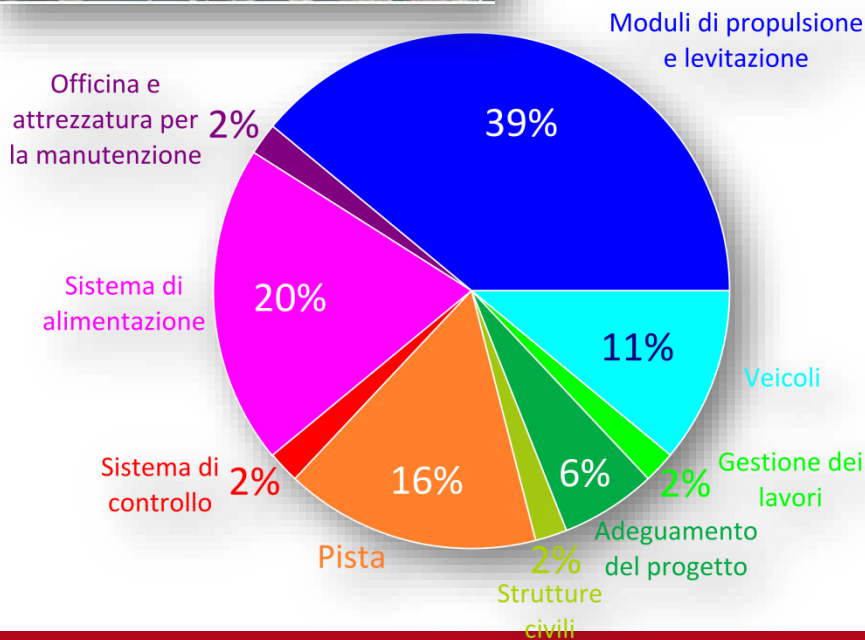


ECCO (*Electric Container Conveyor*)

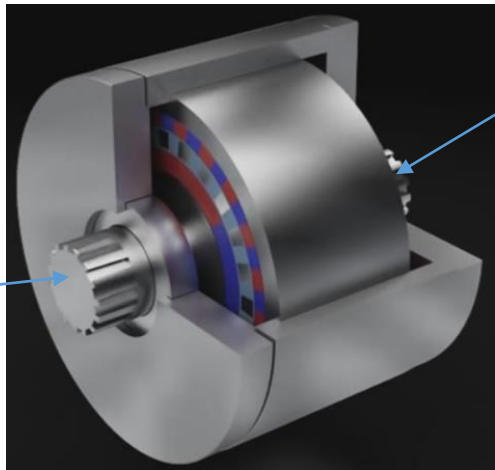
costo complessivo (doppio binario, 36 veicoli) $\Rightarrow \approx 74 \text{ M\$/km}$ (2007)

Dati riferiti al trasporto di 200000 TEU/anno

Tipo di sistema	ECCO	Camion	Treno Diesel
Lunghezza percorso [km]	7.6	9	8
Tempo di percorrenza [min]	4	15	15
Velocità media [km/h]	122	36	32
Rumore [dBA]	72	100	95
Costo di trasporto [\$/TEU]	25	80	46
Emissioni NOx [t/anno]	1.0	48.5	142
Emissioni PM30 [t/anno]	0	1.8	9.6



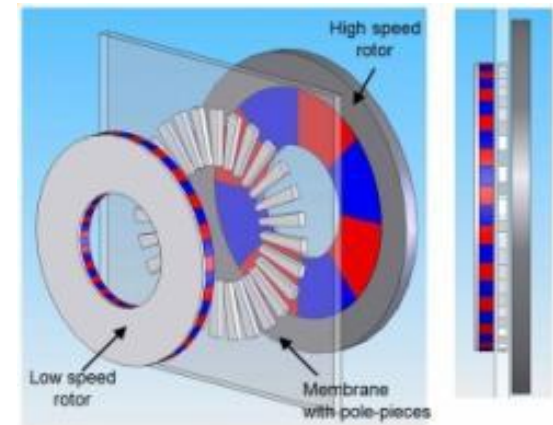
Configurazione coassiale



Albero
lento

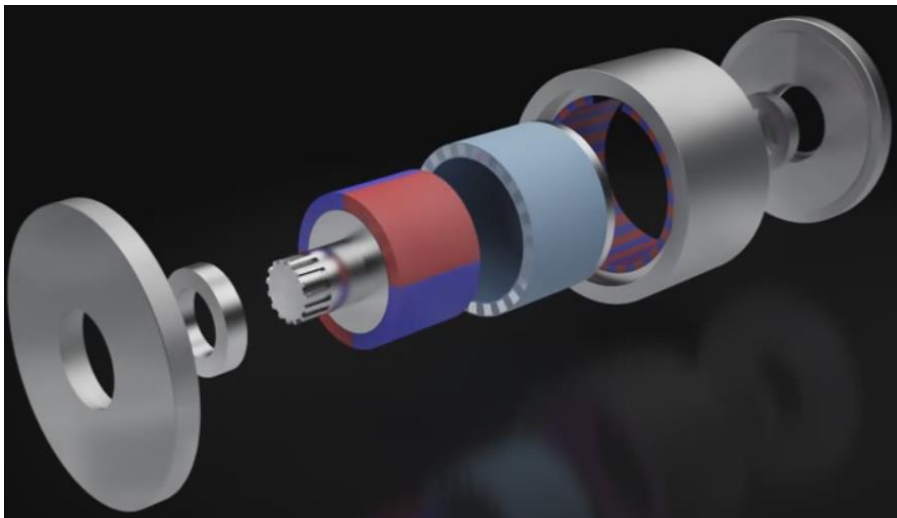
Albero
veloce

Configurazione assiale



Vantaggi della tecnologia

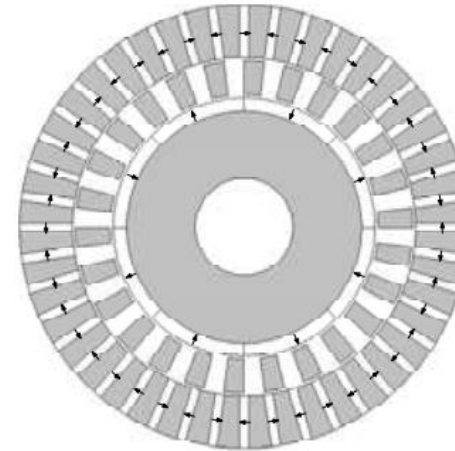
- Trasmissione di potenza “**contactless**” (assenza di lubrificazione e rumore, manutenzione limitata)
- **Efficienza elevata**
- **Slittamento dei magneti** in caso di sovraccarico (no rotture meccaniche)
- **Miglior controllo dell'aderenza** nella conversione da moto rotante a moto lineare



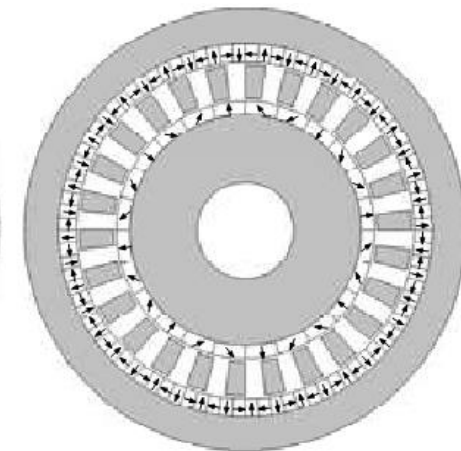
Confronto con riduttori meccanici commerciali

Gear topologies	Lean gear — worm gear deceleration	Lean gear deceleration	Lean gear — spiral umbrella gear deceleration	Parallel shaft lean gear deceleration	CMGRM [6]
Transmission rate	7.81	6	5.7	5.54	5.75
Input velocity [r/min]	1500				
Output velocity [r/min]	192	250	263	271	261
Output torque [Nm]	54.74	57.32	54.49	52.88	55
Size [cm ³]	3970	7410	4000	4680	769
Weight [kg]	10.1	9.8	11.2	12.9	4.6
Efficiency	75%	95%			> 97%
Initial cost [\$]	236.9	221.2	308.1	260.7	472
Service life [years]	3–5				> 10

Confronto diverse tipologie



CMGTM-OR



CMGHM

CMG topologies	Torque density [kNm/m ³]	Torque ripple	Magnetization process	Mechanical reliability
CMGRM	69.6	0.43%	Easy	Low
CMGHM	86.3	0.22%	Difficult	
CMGTM-IR	58.3	0.79%	Easy	Medium
CMGTM-OR	81.7	1.12%		
CMGSM-OR	62.4	0.96%		High

MG di tipo assiale

$$n_s = p_{rv} + p_{rl}$$

$$G_R = \frac{\omega_{rl}}{\omega_{rv}} = -\frac{p_{rv}}{p_{rl}}$$

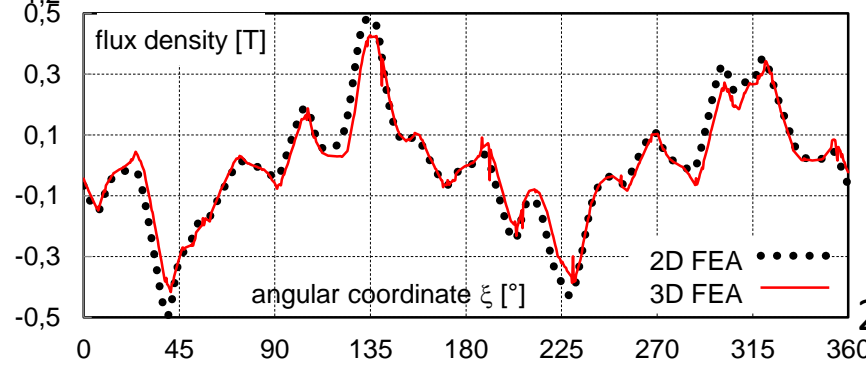
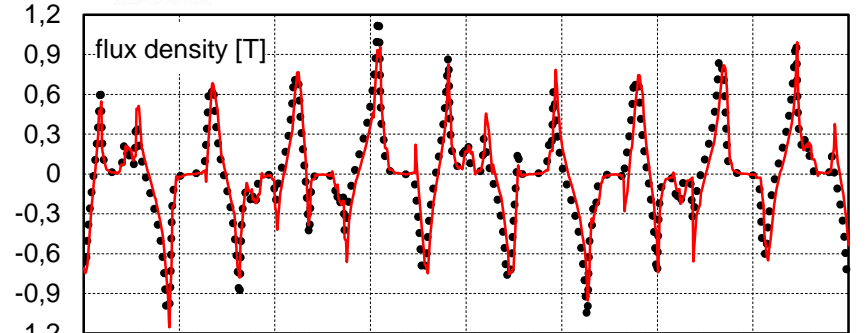
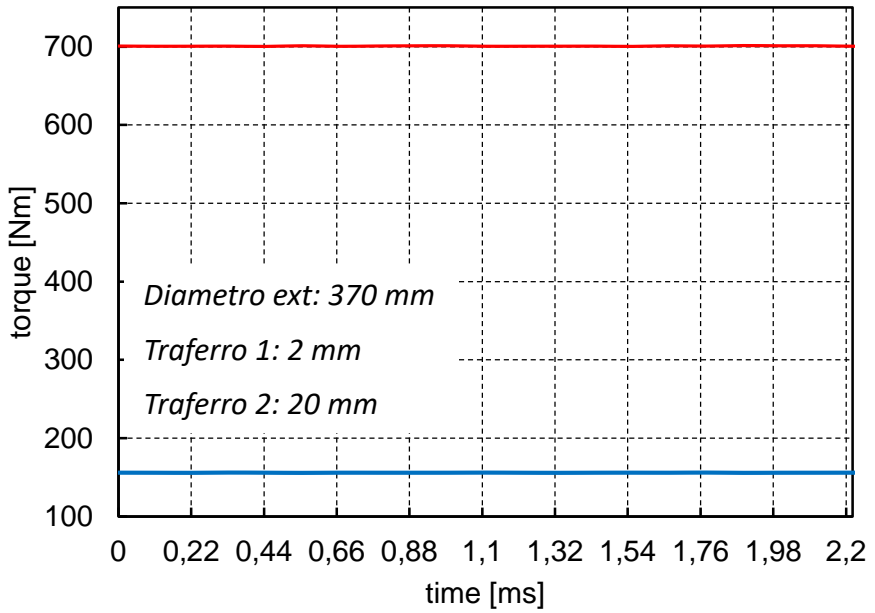
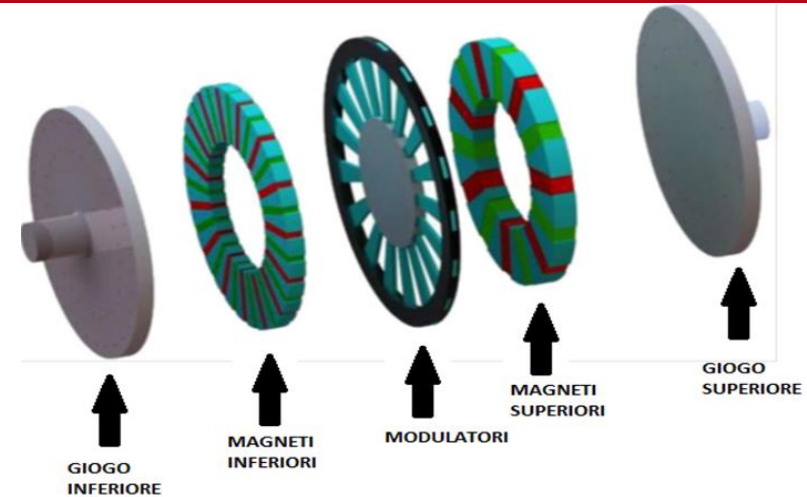


$$p_{rv} = 2 \quad p_{rl} = 9$$

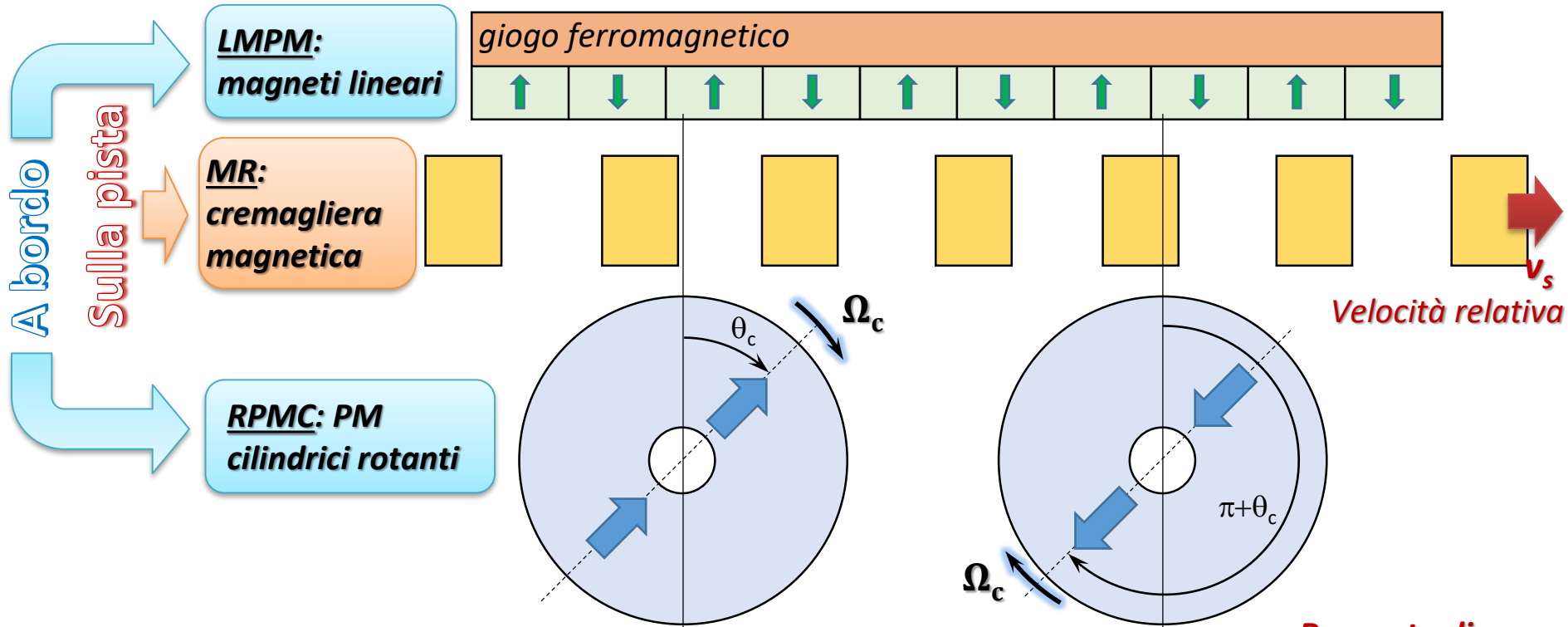
$$n_s = 11 \quad G_R = -\frac{1}{4.5}$$

Rotori contro-rotanti e salienze fisse
Migliore sfruttamento dei magneti e cogging assente

Coppia maggiore sulla parte fissa $C_S = C_{rl} + C_{rv}$



'Rotary to linear MG' (R2L-MG)



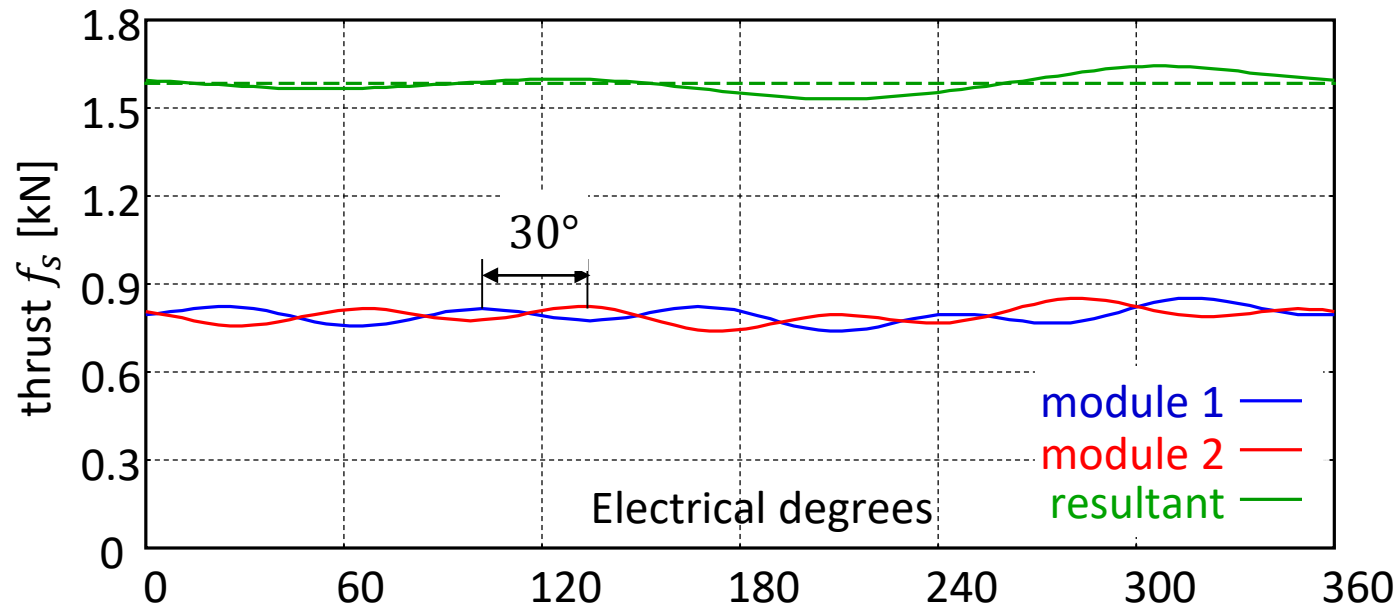
- **RPMC** (p_c) \Rightarrow azionati da motori elettrici convenzionali a bordo producono un campo magnetico traslante alla velocità v_c
- **MR** (n_s) \Rightarrow sono in moto relativo alla velocità v_s rispetto ai magneti rotanti RPMC e lineari LMPM
- **LMPM** (p_L) \Rightarrow fissi con il veicolo, producono un campo magnetico che interagisce con quello modulato dalla cremagliera magnetica



Rapporto di trasmissione

$$n_s = p_c + p_L$$

$$G_R = \frac{v_s}{v_c} = \frac{p_c}{n_s}$$



Dati principali

Pendenza	20%
Velocità veicolo – RPMC	1 m/s – 2400 rpm
Lunghezza percorso	100 m
Massa totale	≈ 1500 kg
N. moduli per lato	2 (4 in totale)
Dimensione moduli	0.25 m/0.3 m (1 lato)

Caratteristiche sistema di trazione

Massa magneti	≈ 30 kg
Forza di propulsione	3250 N
Accelerazione	0.23 m/s ²
Tempo accelerazione	4.3 s
Potenza assorbita	3600 W

- Soluzioni e vantaggi della **propulsione 'contact-less'**
- Integrazione con sistemi di **alimentazione 'contact-less'** (generatore lineare, trasformatore lineare, frenatura rigenerativa)
- Rispetto a **soluzioni convenzionali** → elevati costi dei veicoli e dell'infrastruttura, ma costi unitari di esercizio e manutenzione decisamente inferiori
- **Prestazioni molto elevate** soprattutto nella propulsione Maglev
- Applicabilità sia a **sistemi convenzionali** (motori lineari, 'magnetic gear') che di **nuova concezione** anche in ambiti della logistica non ferroviaria