

Il sistema Hyperloop: caratteristiche tecniche e sostenibilità economica

Ing. Pasquale Antuofermo

Verona 06.11.2020

A worldwide leading **Transportation** and **Aerospace** Group



TRANSPOND



RAILWAY



SPACE



AVIATION



Caratteristiche

- Tubo a bassa pressione (1 mbar)
- Velocità fino a 1200 km/h
- Levitazione magnetica
- Propulsione elettromagnetica
- Consuma il 70% dell'energia che produce

Vantaggi di un Sistema Hyperloop

- Velocità superiore all'aereo
- Protezione dagli agenti atmosferici
- Assenza di combustibile fossile
- Partenza dal centro delle città
- Elevata frequenza di partenza, senza bisogno di prenotare o arrivare in largo anticipo



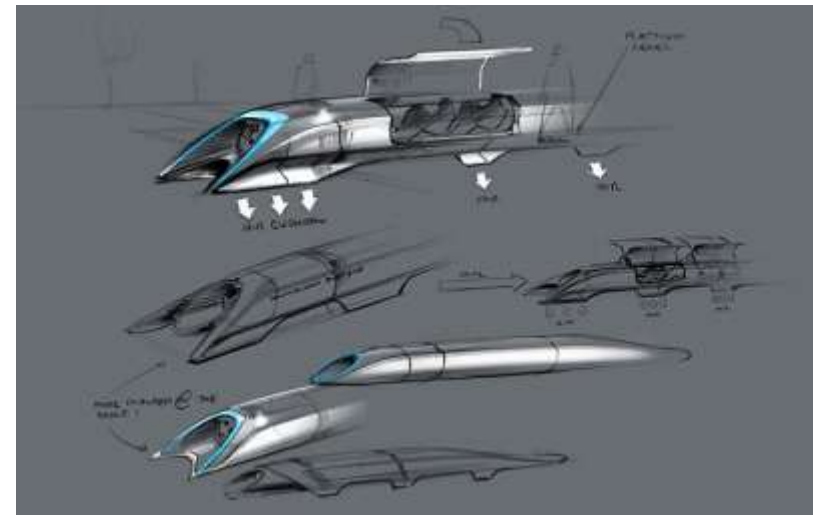
I maggiori player internazionali



Nel 2013 Elon Musk pubblica il documento:

Hyperloop Alfa

- Veicolo che viaggia a $v = 1200$ km/h
- In un tubo a bassa pressione
- Levitazione su cuscino d'aria



Modalità di
trasporto

su strada

su rotaia

su acqua

aerea

Hyperloop

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_d$$

ρ : densità dell'aria (1.2 kg/m³ a 20°C e 1 atm)

v : velocità del veicolo rispetto all'aria

S : sezione trasversale

C_d : coefficiente di resistenza aerodinamica

TGV	S [m ²]	C _d	V [km/h]	F _d [kN]
	10	1.67	360	100

	Pressione [bar]	Velocità [m/s]	Drag [kN]	Rapporto	Percorso [km]	Energia [MWh]	Potenza media [MW]
TGV	1	300	900	225	500	125	270
Hyperloop	0.005	300	4		500	0.56	1.2



P = 1 mbar
(50km altitudine equivalente)

v = 1200 km/h



H = 10,000 m

P = 260 mbar

v = 900 km/h

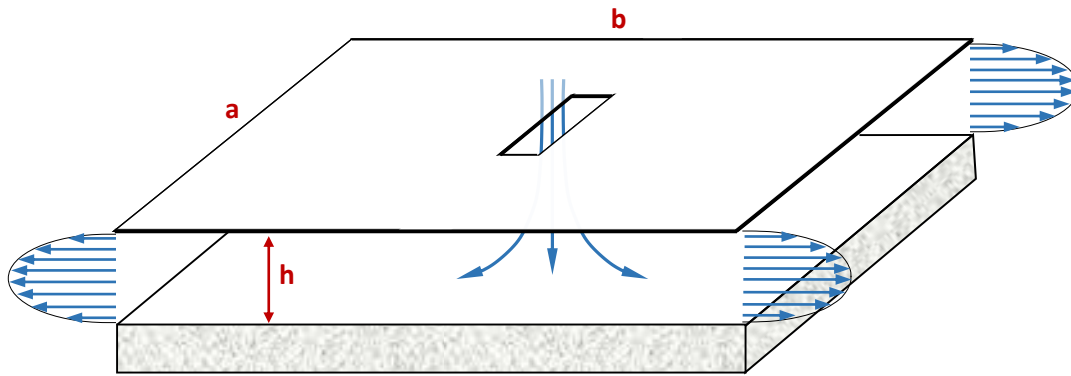


Vantaggi

- Assenza di contatto tra veicolo e infrastruttura
- Assenza di usura (non essendoci parti in contatto)
- Accelerazioni/decelerazioni elevate (svincolate dal coefficiente di aderenza ruota/rotaia)
- Aumento dell'affidabilità per ridotte vibrazioni e shock
- Confort elevato per i passeggeri
- Bassa rumorosità

Svantaggi

- Elevata complessità dell'infrastruttura. Difficile costruzione in ambito urbano
- Costi elevati dell'infrastruttura

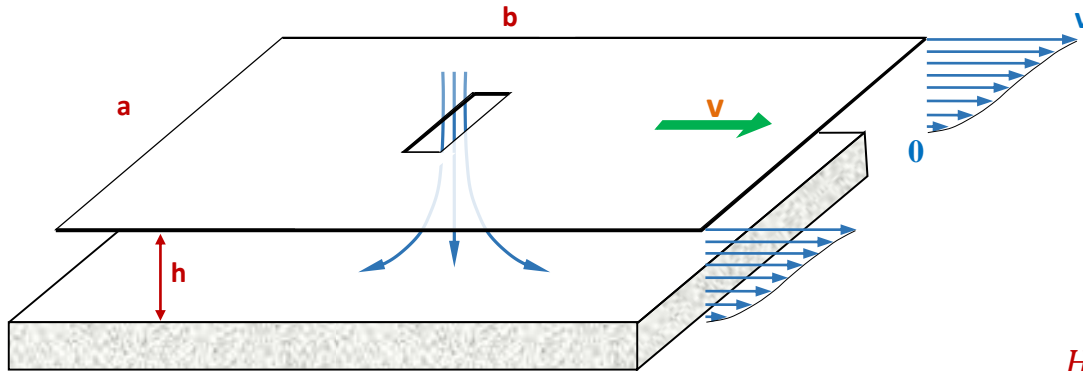


Formula di Poiseuille

per un flusso tra superfici piane

$$\Delta P = q \frac{12\mu b}{h^3} \frac{a}{a}$$

- ΔP : differenza di pressione tra ingresso e uscita (dipende dalla massa da far levitare)
- q : portata volumetrica
- μ : viscosità dinamica dell'aria



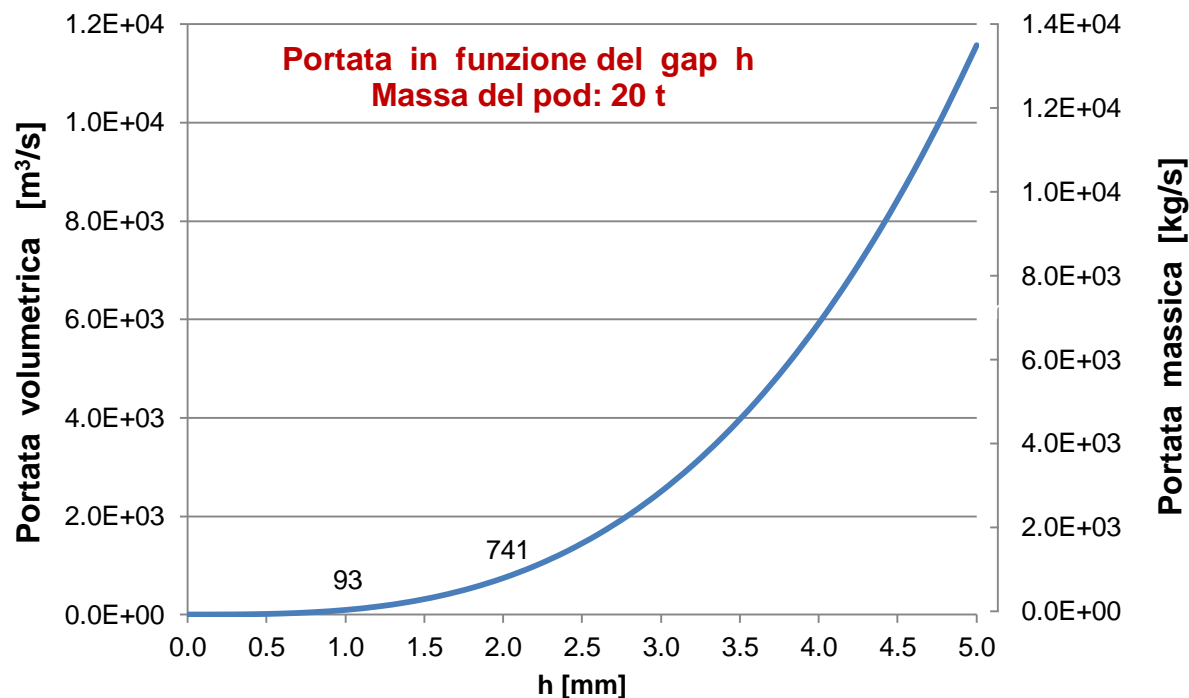
Flusso di Couette

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \rightarrow \tau \cong \mu \frac{v}{h} \quad \text{shear stress}$$

$$F_{drag} = \tau a b = \mu \frac{a b}{h} v$$

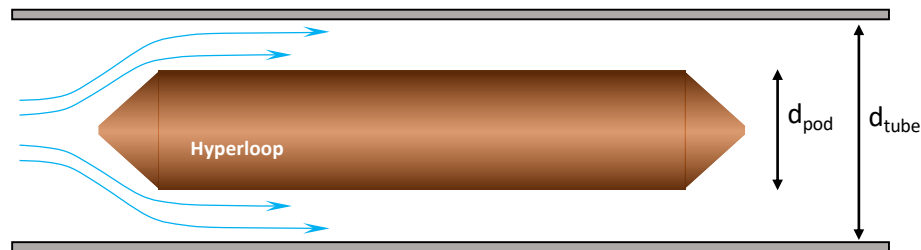
$$H = F_{drag} \cdot v \sim \frac{v^2}{h}$$

potenza propulsiva per vincere l'attrito viscoso del cuscino d'aria



Portata massica dei gas esausti del primo stadio del razzo vettore Ariane 4: 1000 kg/s.

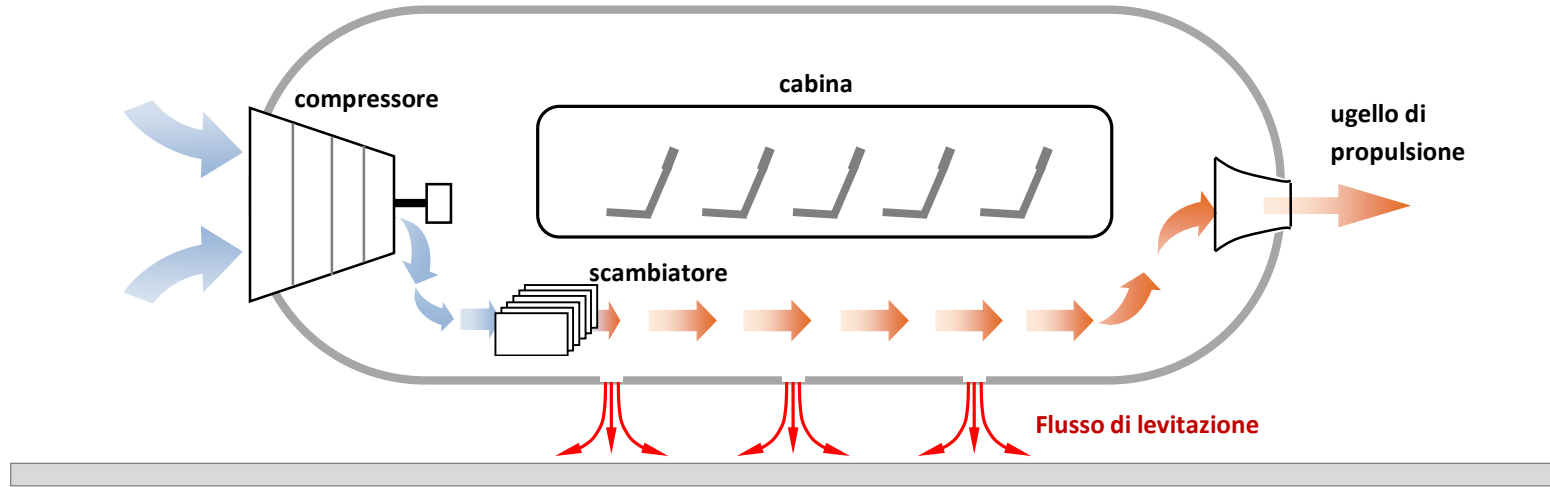
Con un gap di 2 mm è richiesta una guidovia con planarità di 2 mm/km.



$$BR = \frac{d_{pod}^2}{d_{tube}^2}$$

Blockage ratio

- Per la legge di conservazione della massa l'aria deve fluire a velocità transoniche tra pod e pareti del tubo
- La velocità dell'aria nell'intercapedine può aumentare fino a un valore limite che è la velocità del suono, dove si verifica la saturazione del flusso (choking).
- Dato un valore di BR, il limite di Kantrowitz definisce la velocità limite del veicolo per cui si raggiunge la saturazione nell'intercapedine.
- In saturazione si ha una elevata resistenza dell'aria sul pod (può aumentare di un ordine di grandezza per $BR > 0.8$).

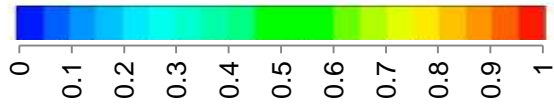


1. L'aria viene aspirata e compressa da un compressore assiale in testa al Pod
2. Fornisce il flusso per ottenere la levitazione su cuscino d'aria
3. Viene inviata su uno scambiatore per raffreddare i dispositivi di bordo
4. Viene espulsa ad elevata velocità da un ugello di coda per generare una spinta aggiuntiva

- **Impedisce di avere un profilo aerodinamico in testa al pod**
- **Deve lavorare con un rapporto di compressione 20:1 in atmosfera molto rarefatta**
 - Pressione 250 volte inferiore alla pressione di aspirazione di un jet di un aereo.
 - Il record di altitudine di volo per un jet è stato di 37.65 km (4 mbar), ottenuto il 1977 con un MIG-25 modificato.
- **Elevata energia elettrica assorbita**
- **Gas di scarico a temperatura elevata**
- **Elevato momento angolare che rischia di essere trasferito al pod in caso di blocco accidentale del rotore**

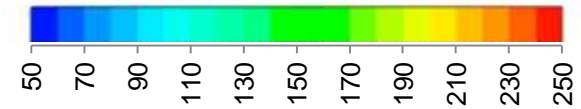


MACH NUMBER

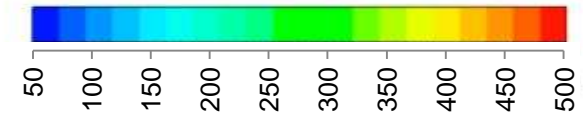
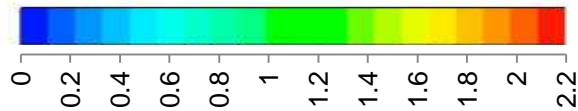


600 km/h

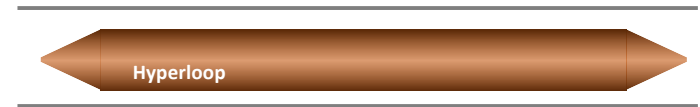
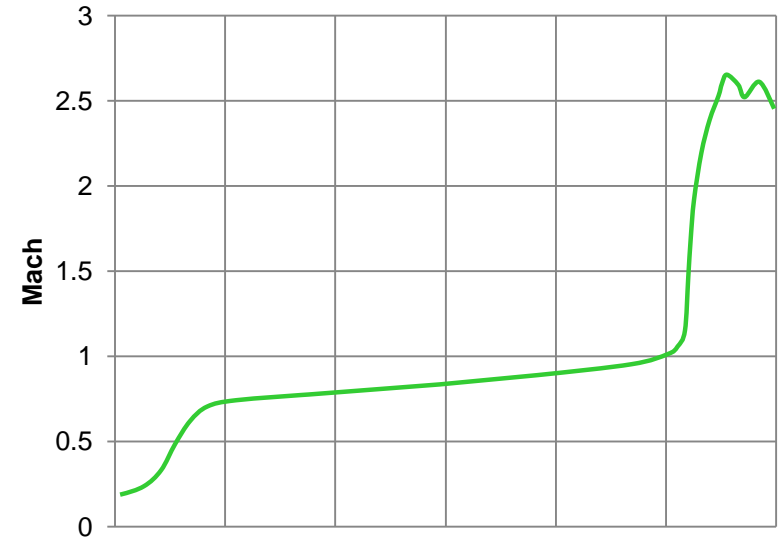
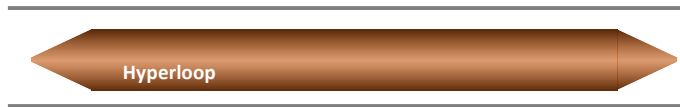
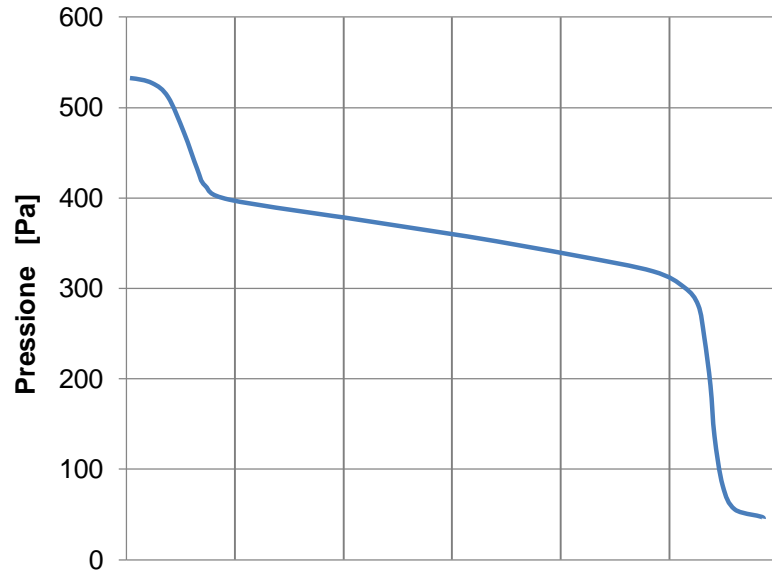
PRESSIONE [Pa]



1200 km/h



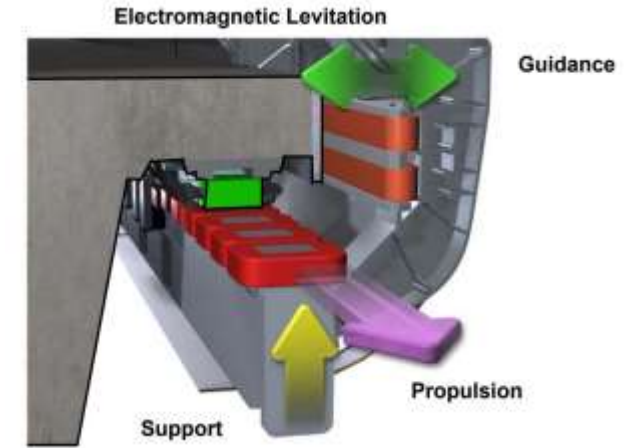
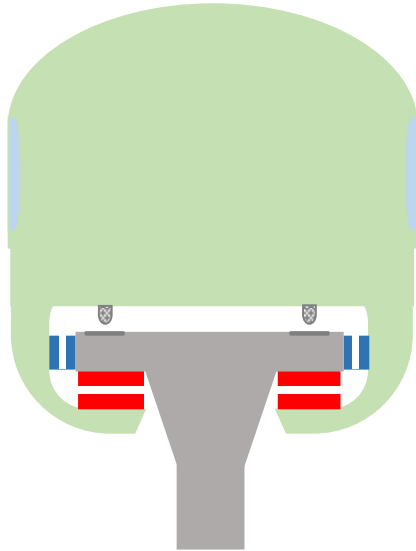
Pressione e Velocità nell'intercapedine

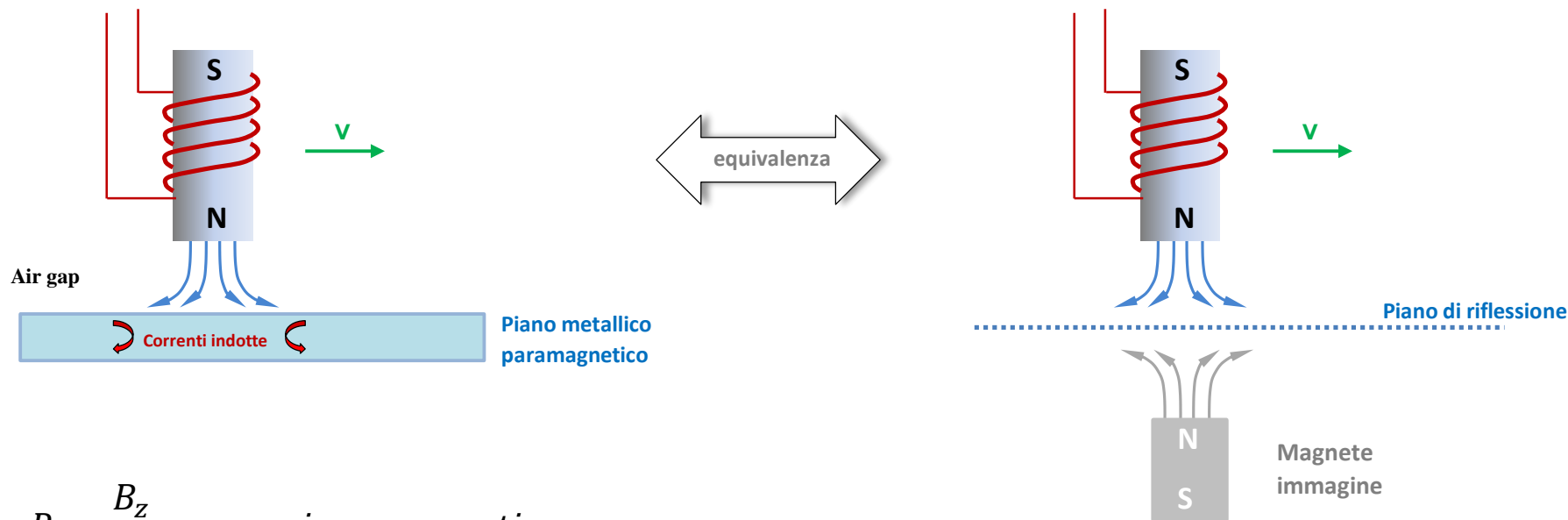


Treni a levitazione magnetica in esercizio

	Nome	Tratta	Lunghezza (km)	Velocità (km/h)	Levitazione	Propulsione
	Transrapid	Shangahi - Pudong International Airport	30,5	430	EMS	LSM
	Linimo	Nagoya Subway (Japan)	8,9	100	EMS	LIM
	Incheon Maglev (ECOBEE)	Incheon International Airport (nord Korea)	6,1	110	EMS	LIM
	Changsha Maglev Express	Changsha Airport (Cina)	18,5	100	EMS	LIM
	Beijing S1 line	Jin'anqiao-Shichang	8,2	110	EMS	LIM
	L0 SC-Maglev (MLX)	Yamanashi Maglev Test Line (Japan)	42,8	505	EDS	LSM

- Elevata complessità dell'infrastruttura
- Costi elevati
- Consumo di energia molto alto per velocità elevate



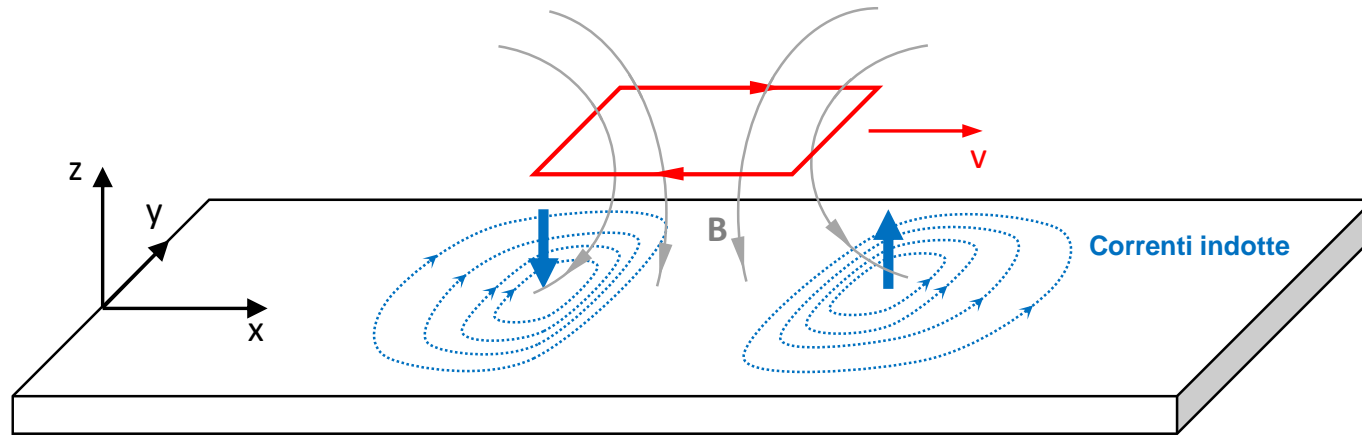


$$P = \frac{B_z^2}{2\mu_0} \quad \text{pressione magnetica}$$

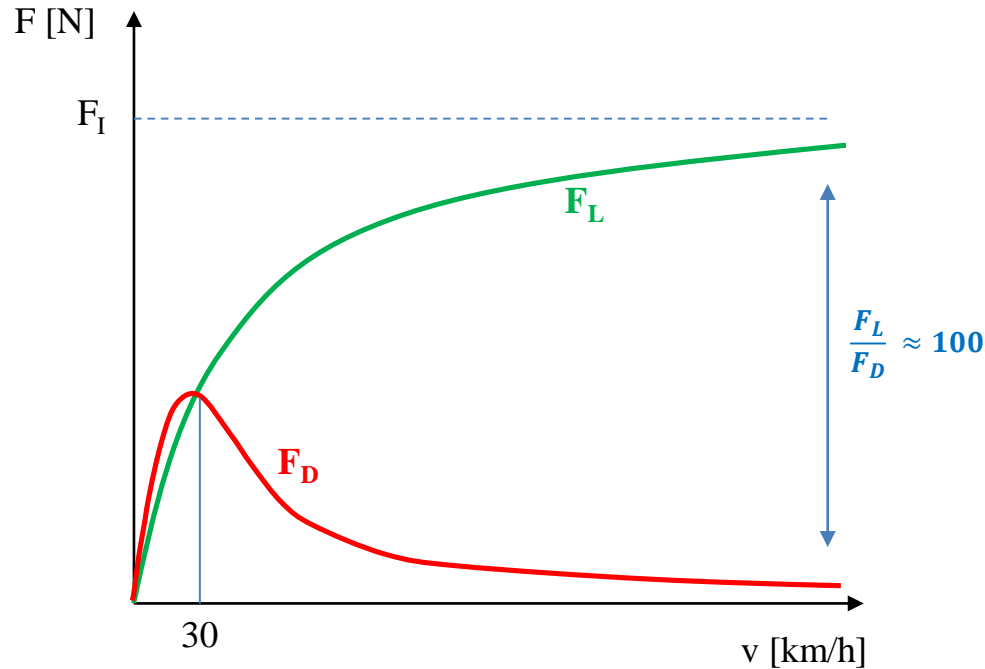
$$\begin{cases} \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]} \\ B_z = 1 \text{ [T]} \end{cases}$$

$$P = 400 \text{ kN/m}^2$$

$$S = 1 \text{ m}^2 \rightarrow 40 \text{ t}$$



- **Le correnti indotte creano campi magnetici che si oppongono alla variazione di flusso**
- **Si sviluppa una forza di levitazione sul fronte della spira e una forza frenante in coda**



F_L : levitation force

F_D : drag force

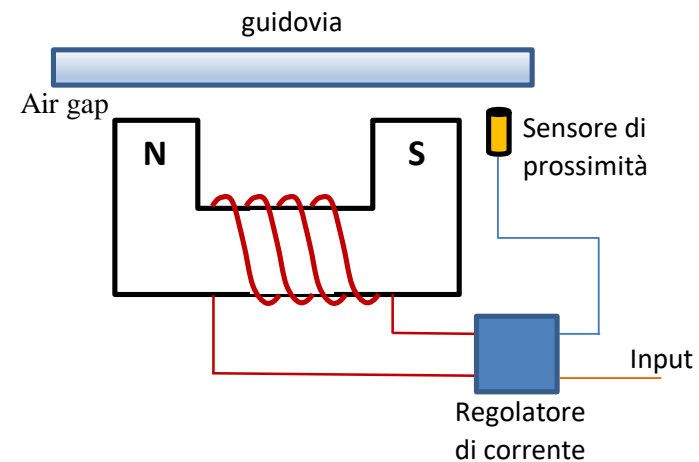
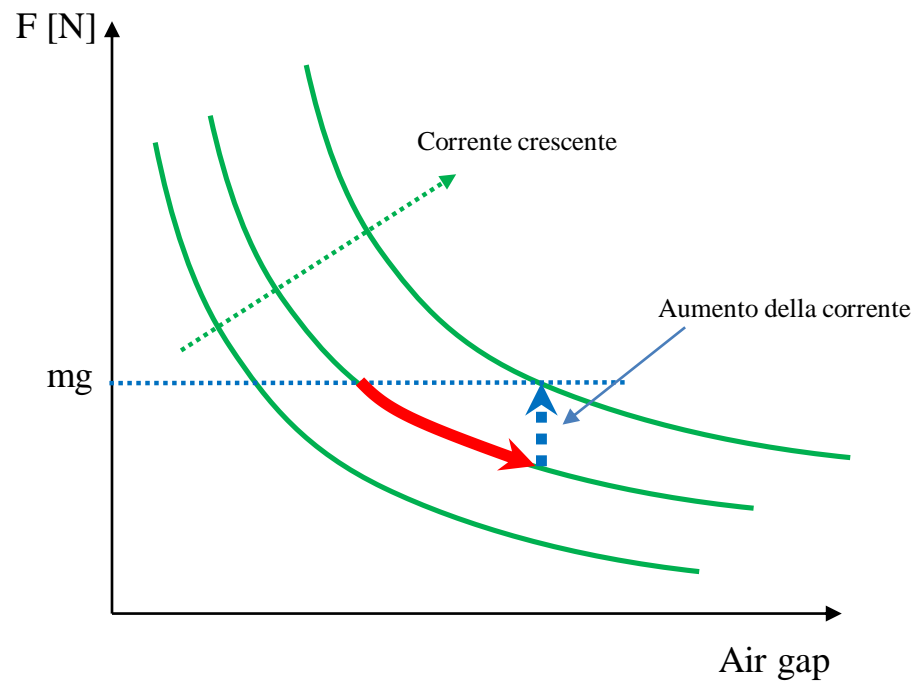
$$\frac{F_L}{F_D} = \frac{v}{w}$$

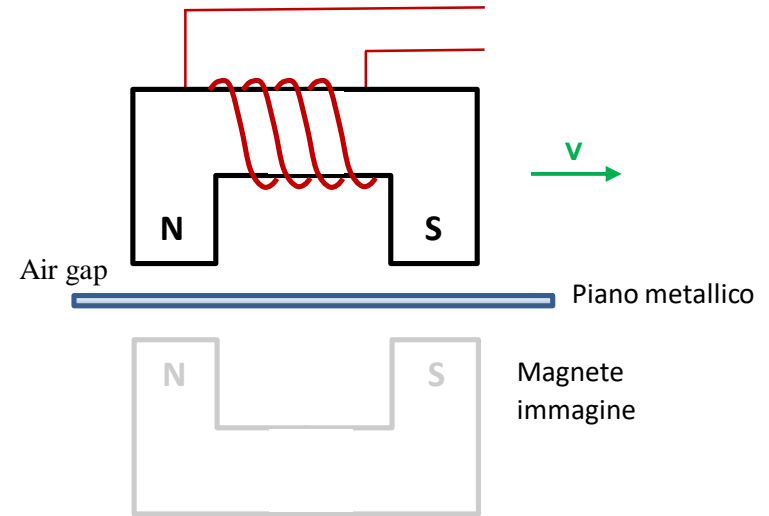
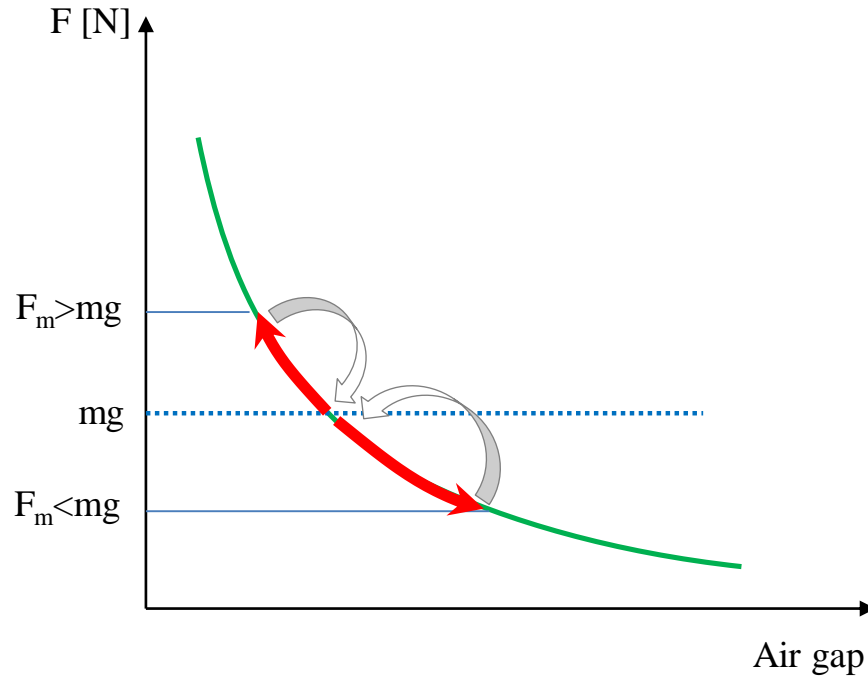
$$F_I = \frac{\mu_0 I^2}{4 \pi z_0} \quad w = \frac{2}{\mu_0 \sigma \delta}$$

I : corrente nella spira

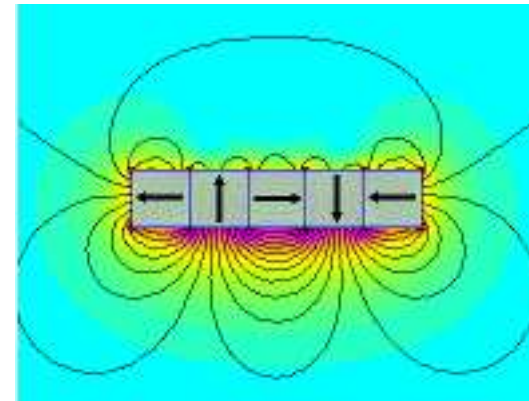
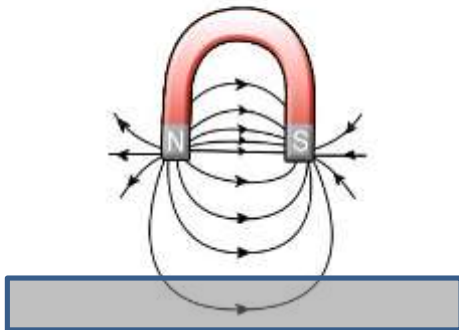
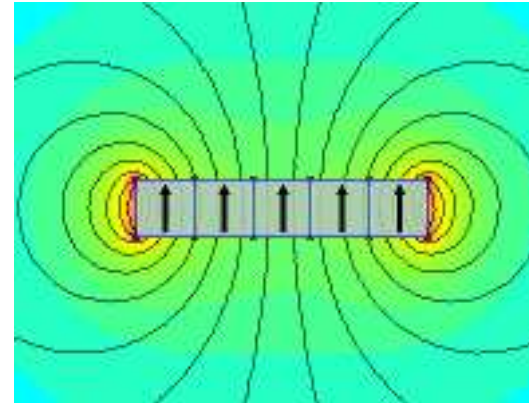
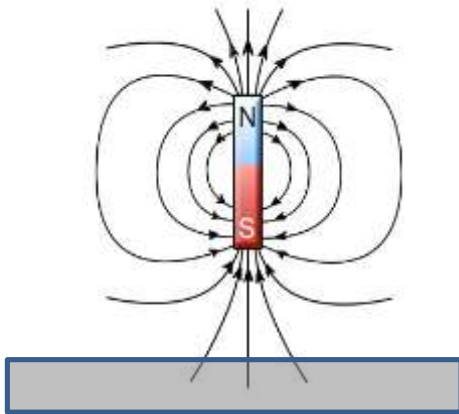
z_0 : distanza della spira dal piano

δ : profondità delle correnti indotte (effetto pelle)





Un controllo è comunque necessario per regolare la dinamica del pod



**Array di
Halbach**

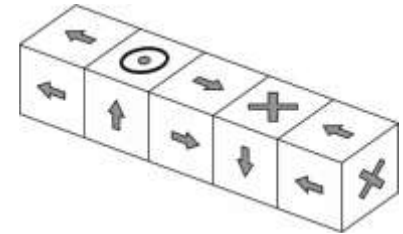
PRO

- Consente la levitazione senza consumo di energia
- Rende semplice il modulo di levitazione
- Consente di sollevare una massa pari a 5 volte la massa del magnete



CONTRO

- Resistenza al moto a basse velocità
- Minore efficienza di levitazione a parità di massa rispetto a un elettromagnete
- E' comunque necessario un elettromagnete per il controllo della dinamica del pod
- All'aumentare della velocità aumenta l'altezza di levitazione e diminuisce l'efficienza del motore lineare a induzione
- Se dovesse incollarsi alla parete del tubo, sarebbe molto difficile staccarlo
- Accumula polvere ferromagnetica sulla sua superficie



L'energia di levitazione del Transrapid è il 10% dell'energia totale impiegata

PRINCIPALI FONTI DI DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA

- Resistenza aerodinamica
- Perdite elettriche negli elettromagneti
- Perdite dovute alle correnti parassite (eddy current)
- Aria condizionata

VINCOLI

- Contatto strisciante non utilizzabile
- Accoppiamento induttivo molto costoso (alternatore lungo centinaia di chilometri)

SOLUZIONI PROPOSTE

- Alimentazione autonoma mediante batterie
- Trasferimento discontinuo di energia cinetica ed energia elettrica
- Alimentazione mediante scarica in plasma freddo

Supponiamo un'efficienza energetica del pod pari a un treno ad alta velocità (ma con velocità 3 volte maggiore)

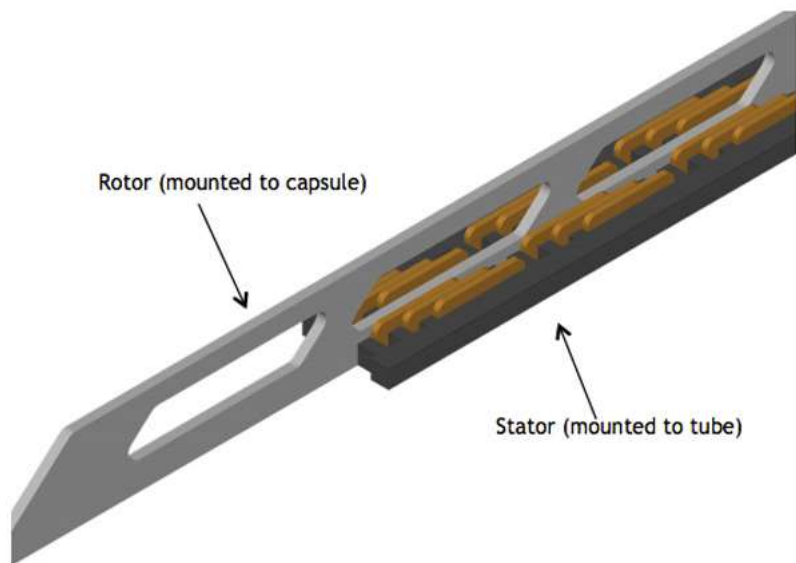
- Efficienza energetica di un pod: **50 Wh/km/passeggero**
- Pod con 30 passeggeri → **1.5 kWh/km**
- Energia necessaria per una tratta di 500 km: **750 kWh**
- Se si considera una carica di riserva e il degrado nel tempo, serve una capacità di **1 MWh**
- Densità di energia per le batterie al litio: **250 Wh/kg**
- Peso del gruppo batterie: **4000 kg** (20% del peso del pod)
- Tempo di ricarica: **10 min** → Potenza del caricatore: **6MW**
- Efficienza di carica del **90%** → **100 kWh** di energia termica da smaltire

Numero di ricariche l'anno:

1 viaggio/ora → 20 viaggi/giorno → 7000 viaggi/anno → **7000 ricariche l'anno**

Costo di un gruppo batterie: 100 €/kWh → **100 k€**

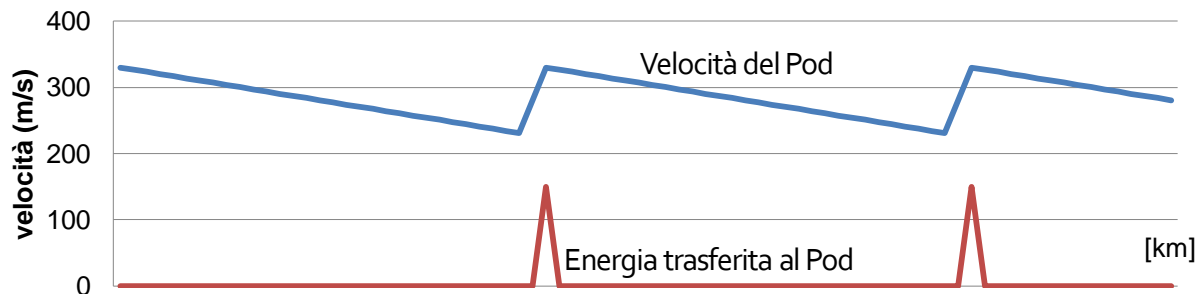


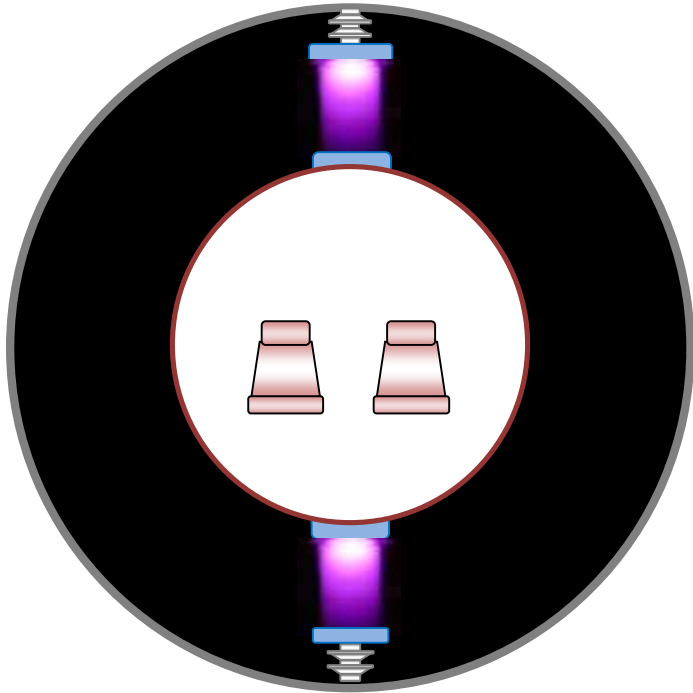


L'energia cinetica viene trasferita al Pod in maniera intermittente mediante degli avvolgimenti di statore posizionati lungo il tubo ad intervalli di alcuni chilometri.

Svantaggi:

- Confort di marcia scadente
- Abbassamento della velocità media
- Costi non bassi





A bassa pressione e per differenze di potenziale relativamente basse si innesca una scarica a bagliore.

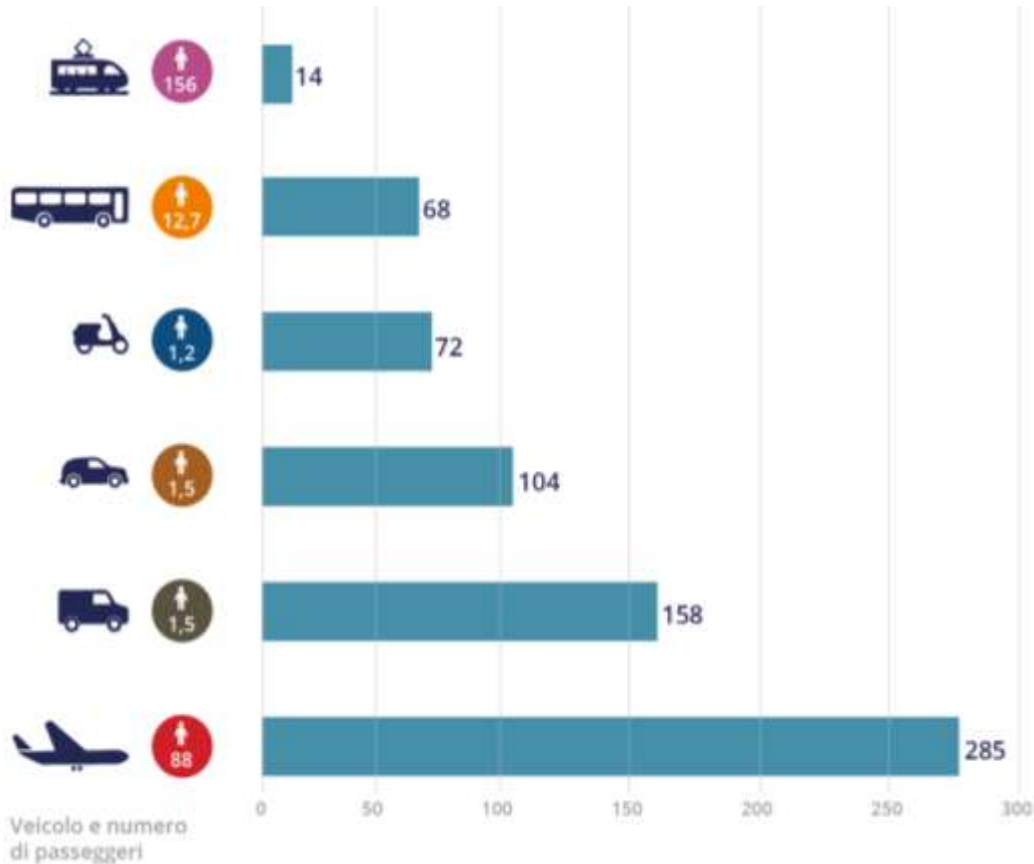
La bassa densità di molecole comporta un aumento del cammino libero medio degli elettroni che riescono a ionizzare le molecole anche con basse tensioni.

La probabilità di collisioni è bassa, per cui la ionizzazione procede in maniera graduale; non si verifica quindi l'effetto valanga (breakdown), che provoca una scarica ad arco, distruttiva perché ad alta temperatura.

A bassa pressione gli elettroni sono caldi mentre ioni e molecole sono fredde per cui il plasma è complessivamente freddo.

$$P = \Delta V \cdot I = 5 \text{ kV} \times 400 \text{ A} = 2 \text{ MW}$$

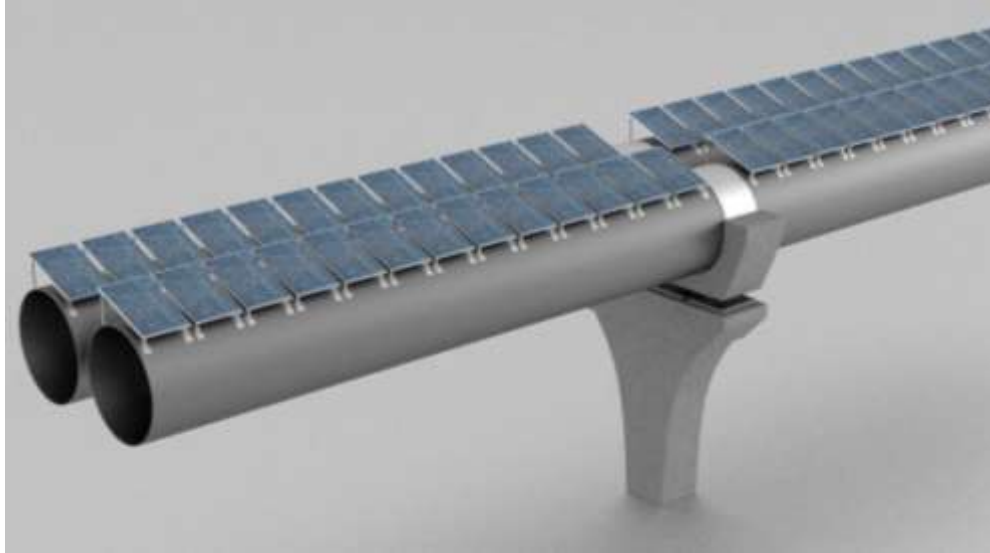
Emissione di CO2 dei mezzi di trasporto



Grammi di CO₂ per passeggero-chilometro

Dati 2013 dell'AEA
(Agenzia Europea dell'Ambiente)





Dati tipici di un sistema Hyperloop

- Tratta di 500 km
- Energia da fotovoltaico: **1 GWh/giorno**
- 250 Pod/giorno per senso di marcia (ogni 5 min)
- 500 Pod/giorno (1 Pod ogni \approx 3 minuti)
- Potenza utilizzata dal Pod: 3MW
- Tempo di percorrenza: 0.5 h

Energia totale consumata in un giorno

$$500 \times 3 \times 0.5 = \mathbf{0,75 \text{ GWh/giorno}}$$

Transrapid

Potenza media utilizzata: 4MW

Potenza spesa per la resistenza dell'aria a 400 km/h: 3.5 MW

Energia per portare i tubi alla pressione di 1 mbar: \approx 1GWh

Coefficiente di perdita di aria: 10% /giorno \rightarrow **0,1 GWh/giorno**

Grazie per l'attenzione