Il sistema Hyperloop:
caratteristiche tecniche e sostenibilità economica

Ing. Pasquale Antuofermo

Seminario CIFI
Università di Padova 01.06.2018

Hyperloop: caratteristiche generali

Caratteristiche

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

I maggiori player internazionali

HYPERLOOP TRANSPORTATION TECHNOLOGIES

Virgin hyperloop one

TRANSPOD

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

ANGEL

TRANSPOD

mermec
AN ANGEL COMPANY

RAILWAY

SITAEL
AN ANGEL COMPANY

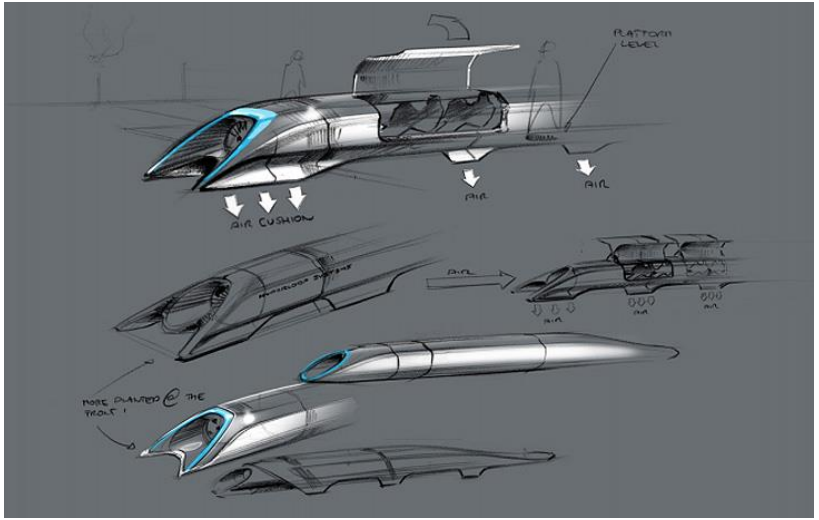
SPACE

BLACKSHAPE
AN ANGEL COMPANY

AVIATION

La 5^ Modalità di Trasporto

- Su strada
- Su rotaia
- Su acqua
- Aerea
- Hyperloop



Proprietà dei treni a levitazione

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

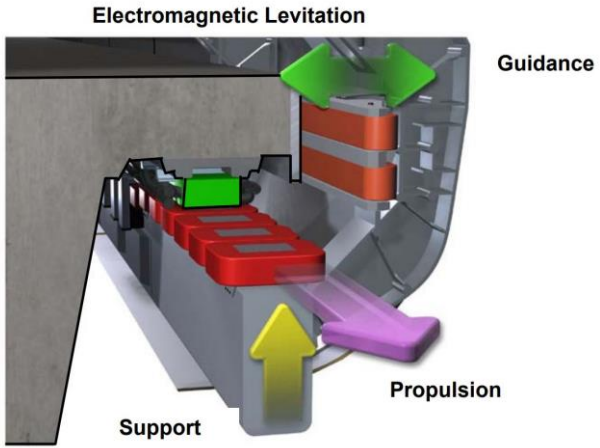
- Elevata complessità dell'infrastruttura. Difficile costruzione in ambito urbano
- Costi elevati dell'infrastruttura

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	Yamanashi Maglev Test Line (Japan)	42,8	505	EDS	LSM

Treni a levitazione magnetica: problematiche

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



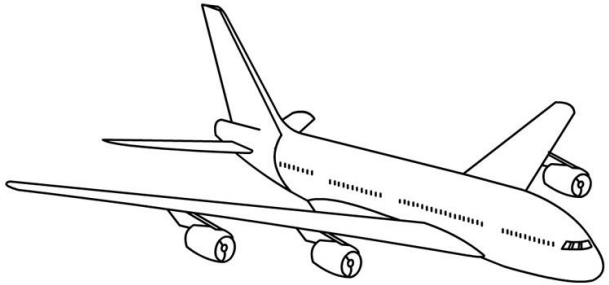
Vantaggi di un Sistema Hyperloop

- 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

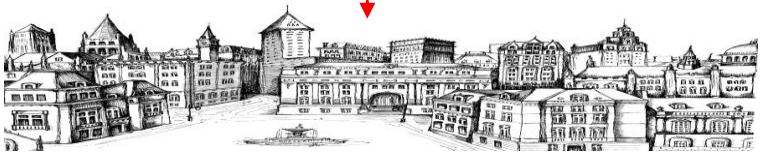
Condizioni operative

P = 1 mbar
(50km altitudine equivalente)

v = 1200 km/h



H = 10,000 m
P = 260 mbar
v = 900 km/h



Problematiche Ingegneristiche

- Levitazione
- Propulsione
- Tecnica del vuoto
- Aero-fluidodinamica
- Elettrotecnica (ottimizzazione dei campi elettromagnetici)
- Controlli automatici ad alta velocità
- Termodinamica
- Controllo automatico di assetto e condotta del pod
- Gestione automatica del traffico (segnalamento)

Il limite di Kantrowitz

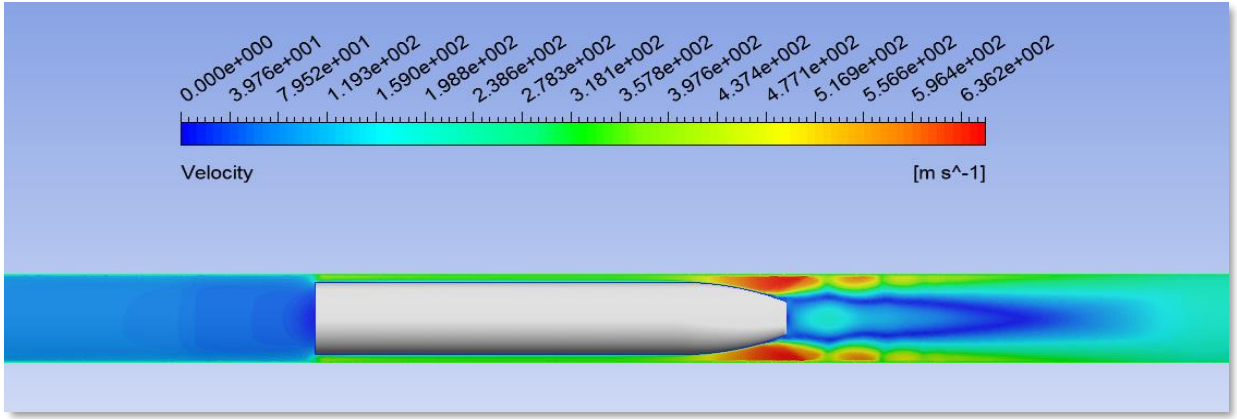
- Per un veicolo che si muove ad alta velocità in un tubo a bassa pressione, esiste un limite alla massima velocità raggiungibile.
- Per la legge di conservazione della massa, la velocità dell'aria nell'intercapedine può aumentare fino a un valore limite che è velocità del suono dove si verifica la saturazione (choking).
- In saturazione si ha una elevata resistenza dell'aria sul pod.
- Il limite di Kantrowitz definisce quindi la velocità limite per un dato rapporto tra la sezione del tubo e la sezione dell'intercapedine.

$$\frac{A_{bypass}}{A_{tube}} = \frac{M_{pod}}{M_{bypass}} \left(\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{bypass}^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{pod}^2} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(1-\gamma)}}$$

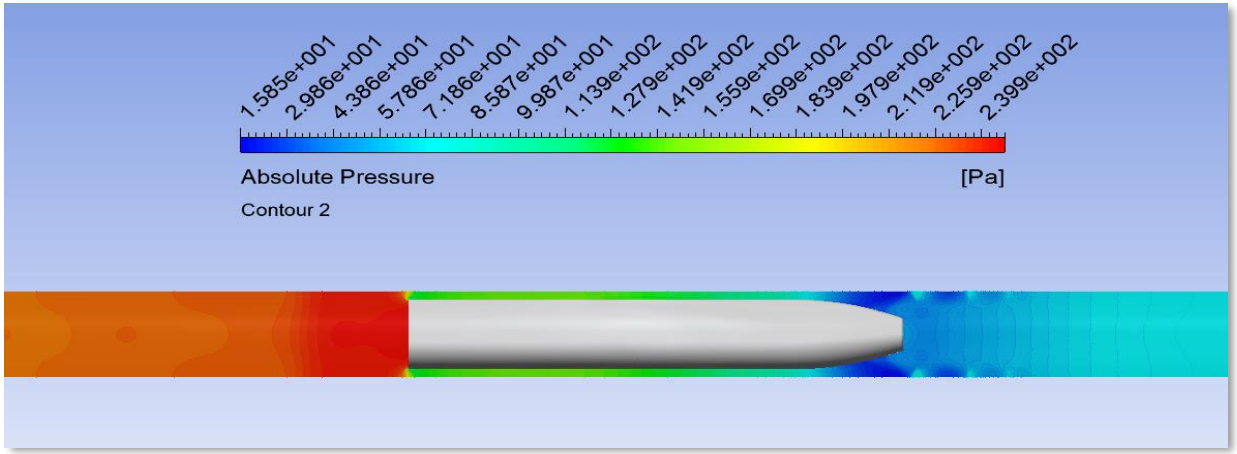
$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \cong 1.4$ *fattore di espansione isentropica*

M *Mach number*

Velocità e pressione nel tubo



Velocità

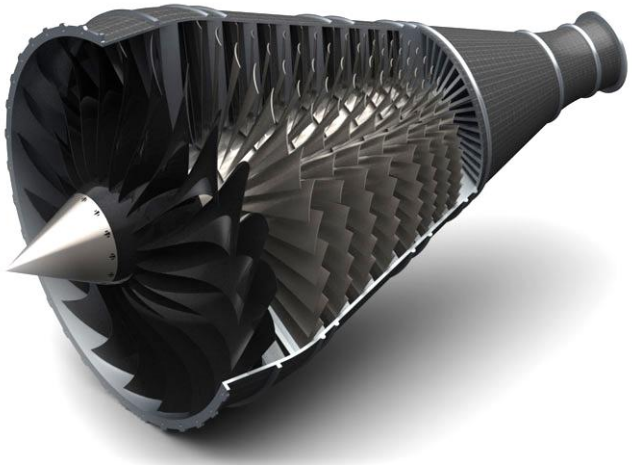


Pressione

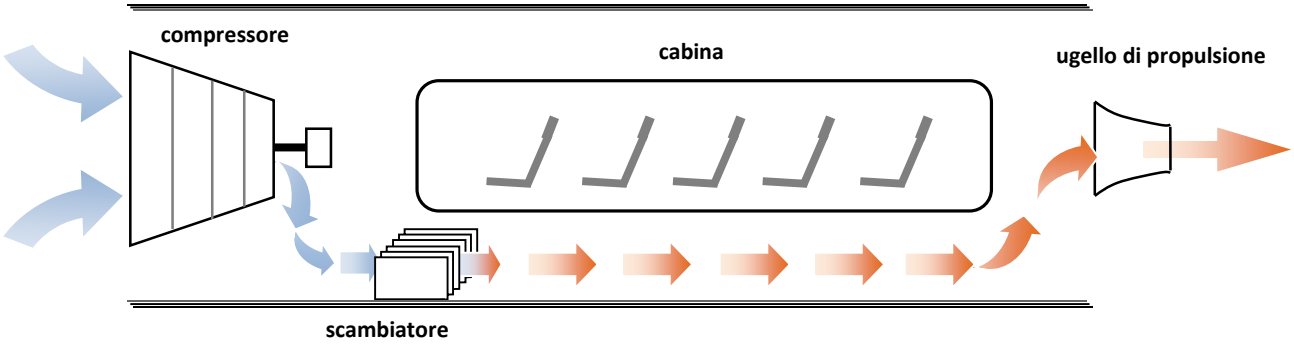
Come aggirare il limite di Kantrowitz

Per aumentare la velocità limite si può:

- Aumentare il diametro del tubo (aumento dell'intercapedine)
- Ridurre la densità dell'aria, ovvero la pressione nel tubo
- Creare una sezione di bypass attraverso il Pod (compressore assiale)

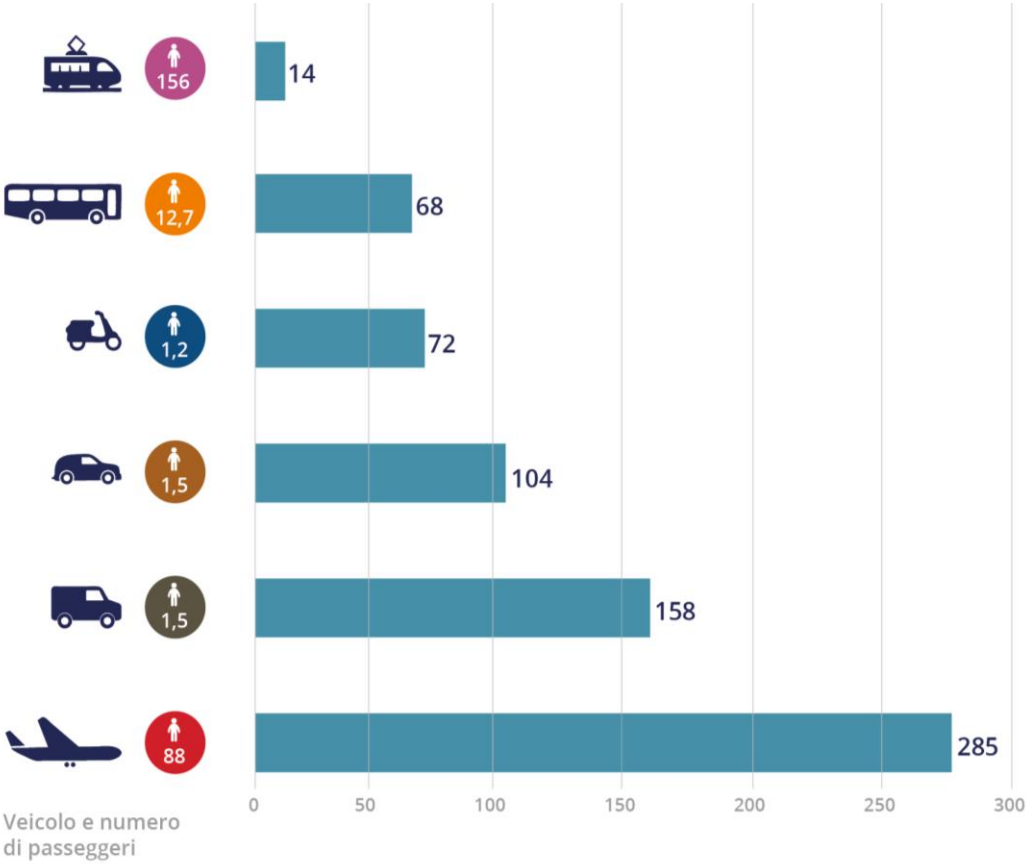


Flusso dell'aria aspirata



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

Emissione di CO_2 dei mezzi di trasporto

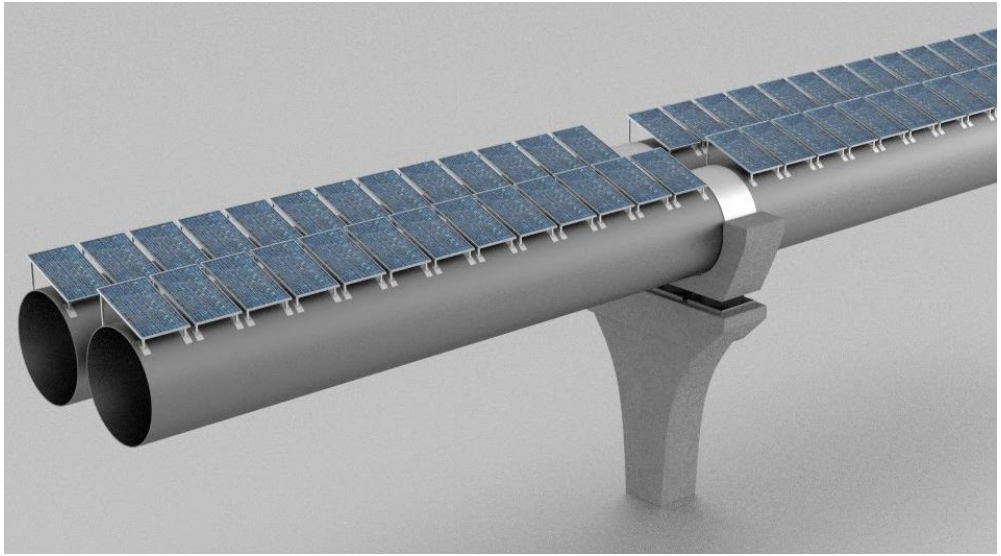


Grammi di CO_2 per passeggero-chilometro

Dati 2013 dell'AEA

(Agenzia Europea dell'Ambiente)

Bilancio energetico di un sistema Hyperloop



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 ≈ 3 minuti)
- Potenza utilizzata dal Pod: 3MW
- Tempo di percorrenza: 0.5 h

Energia totale consumata in un giorno

500 x 3 x 0.5 = **0,75 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: ≈ 1GWh

Coefficiente di perdita di aria: 10% /giorno → 0,1 GWh/giorno

Energia di propulsione

- **Batterie a bordo del pod**

  Massa elevata del pod (energia pari a 25 Tesla Model X; 15 ton di batterie)

  Tempo di ricarica molto alto rispetto alla frequenza di utilizzo di ciascun pod

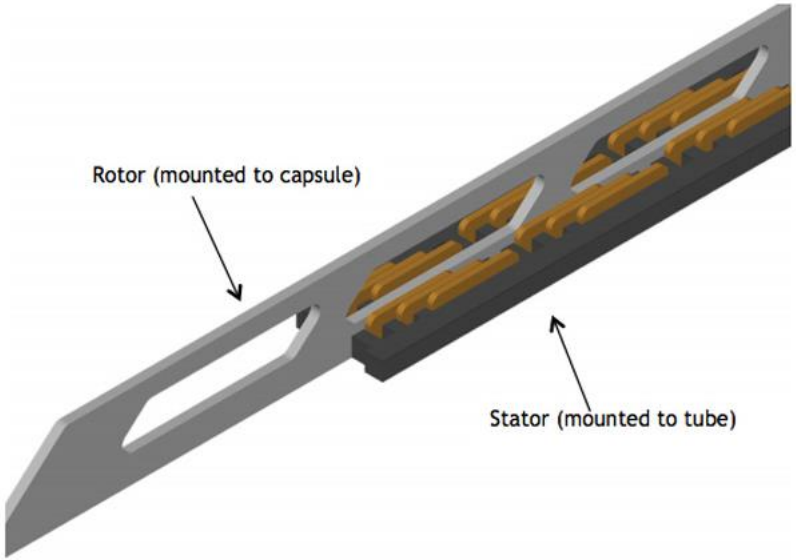
- **Trasferimento localizzato di energia cinetica**

  Propulsione e velocità discontinue

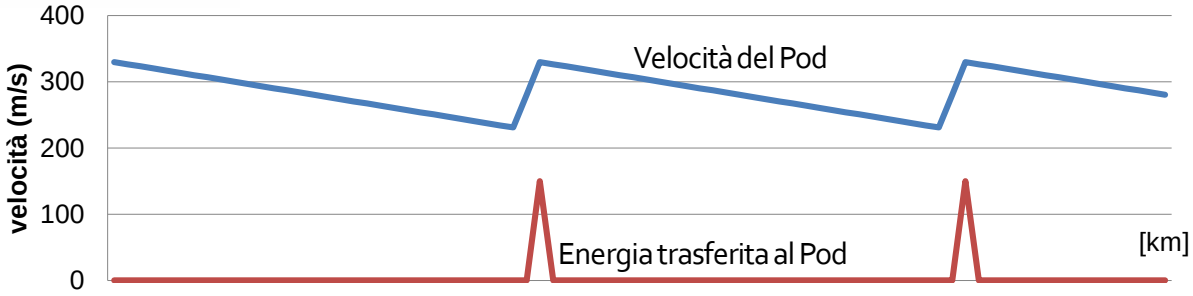
  Rischio di fermata del pod tra 2 punti di accelerazione

- **Trasferimento di energia mediante sistemi non a contatto**

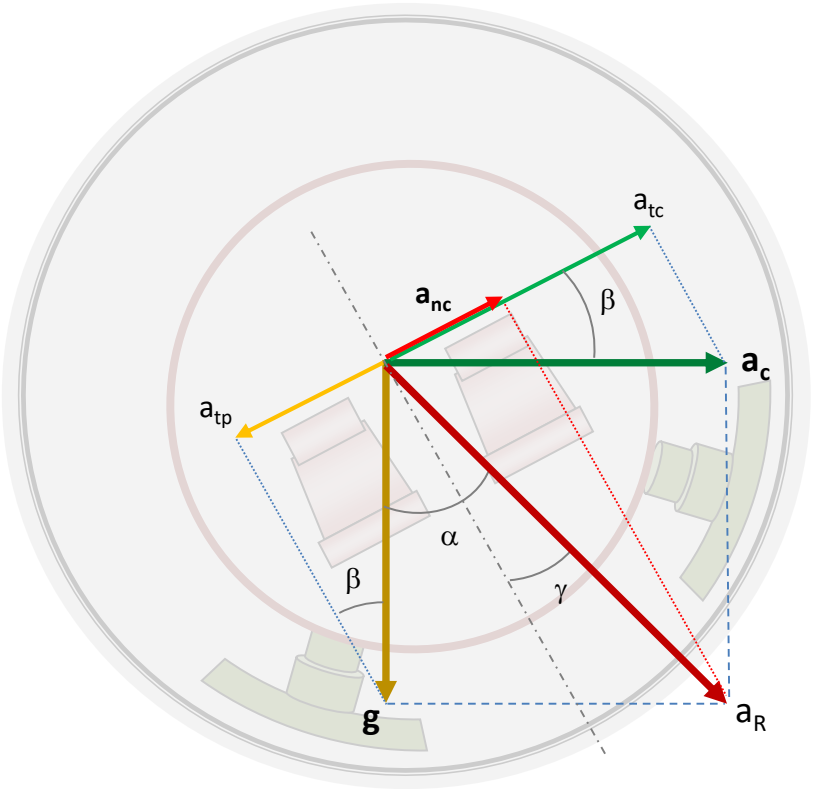
Trasferimento di energia localizzato



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



Accelerazioni in curva



$$a_{tc} = a_{tg}$$

Condizione di perfetta compensazione

$$a_c \cdot cos\beta = g \cdot sen\beta \quad \rightarrow \beta = \tan^{-1}\frac{a_c}{g} = \frac{v^2}{g \cdot R}$$

$$a_{nc} = a_c \cdot cos\beta - g \cdot sen\beta = \frac{v^2}{R} \cdot cos\beta - g \cdot sen\beta$$

Rotazione del Pod in curva

Binario convenzionale: $\beta_{max} = 7°$

Transrapid: $\beta_{max} = 12°$

Hyperloop:

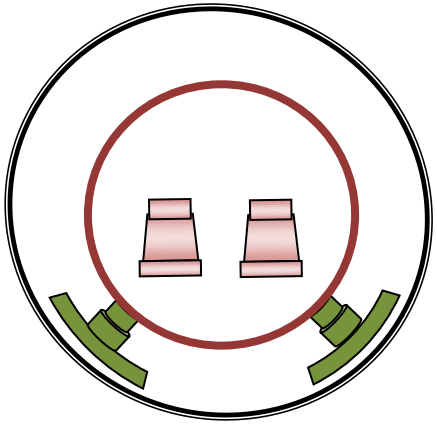
R=15 km

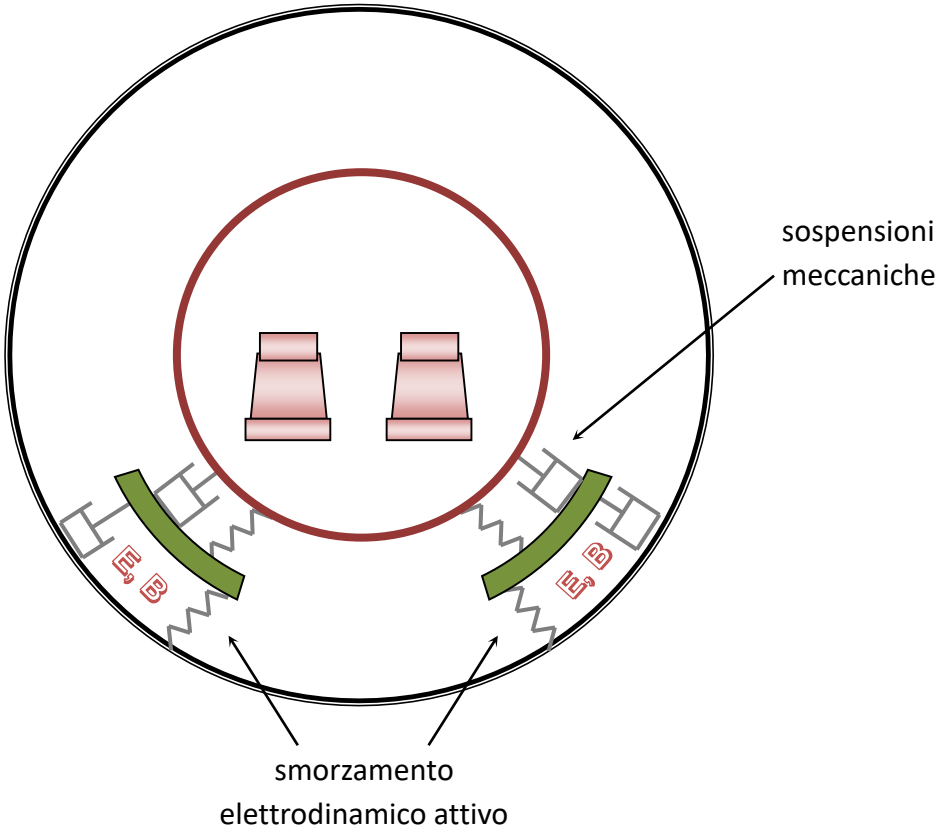
v= 300 m/s

$a_{nc} = 0$ se $\beta = 31{,}5°$

Se si accetta una $a_{nc} = 1\ m/s^2$ l'angolo $\beta = 26{,}5°$

Confort di marcia

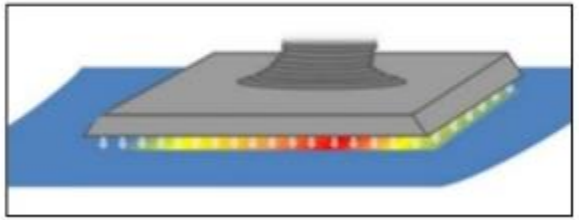




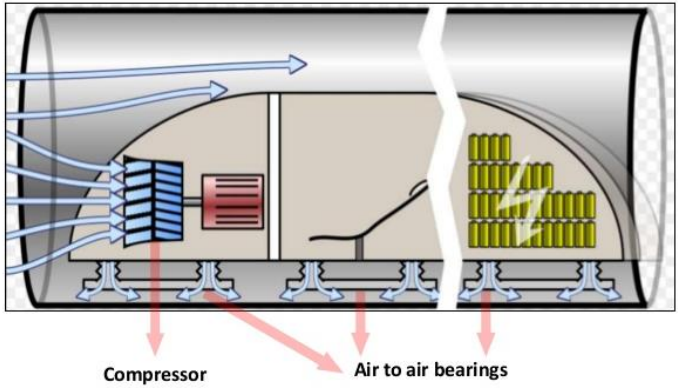
Levitazione su cuscino d'aria

Problemi tecnici molto importanti:

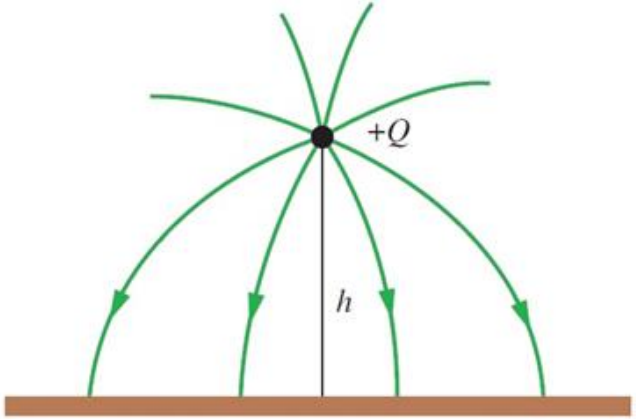
- clearance di circa 1 mm (la forza decresce esponenzialmente con la distanza)
- controllo pneumatico difficile e con costanti di tempo elevate
- interferenza con l'aria spostata dal pod



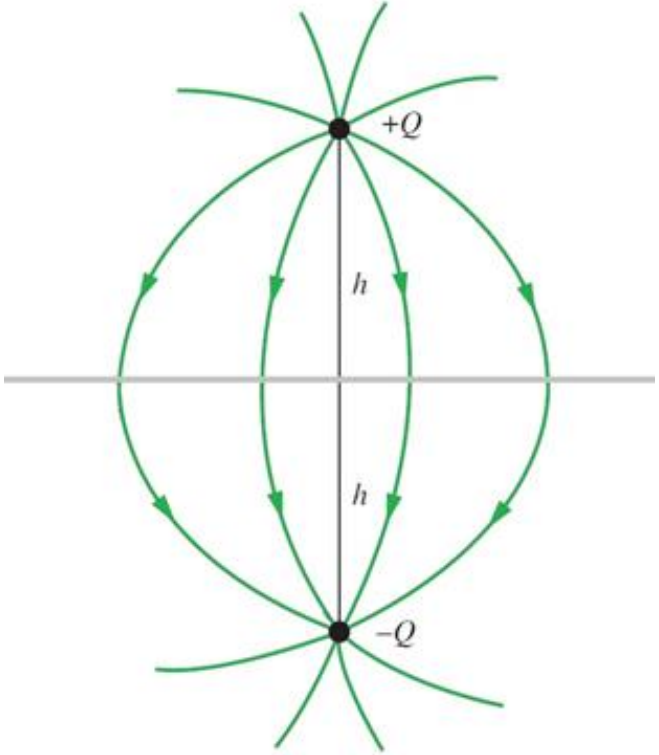
Suspension



Il metodo delle immagini in elettrostatica



superficie metallica

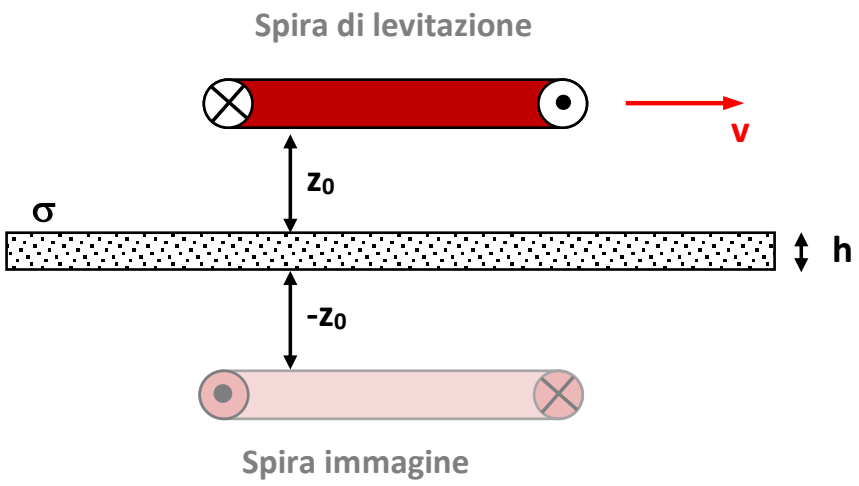


Il potenziale elettrico sulla superficie metallica

resta invariato

se sostituisco la superficie con una carica simmetrica

Immagine di una spira di corrente

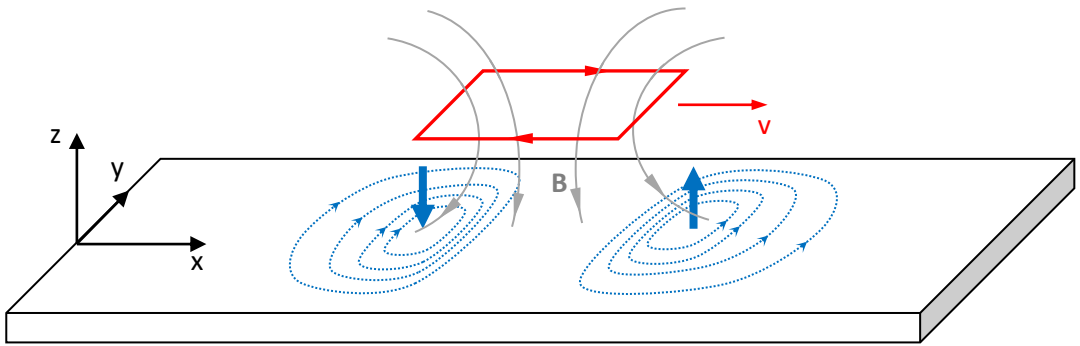


Una spira di corrente che trasla parallelamente a un piano metallico è equivalente a una spira con la sua immagine.

La corrente nella spira immagine ha verso opposto.

Tra le 2 spire nasce una forza elettrodinamica di tipo repulsivo.

Effetti elettromagnetici di una spira che trasla su una piano metallico



$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E}$ corrente indotta

$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ forza magnetomotrice

Quindi

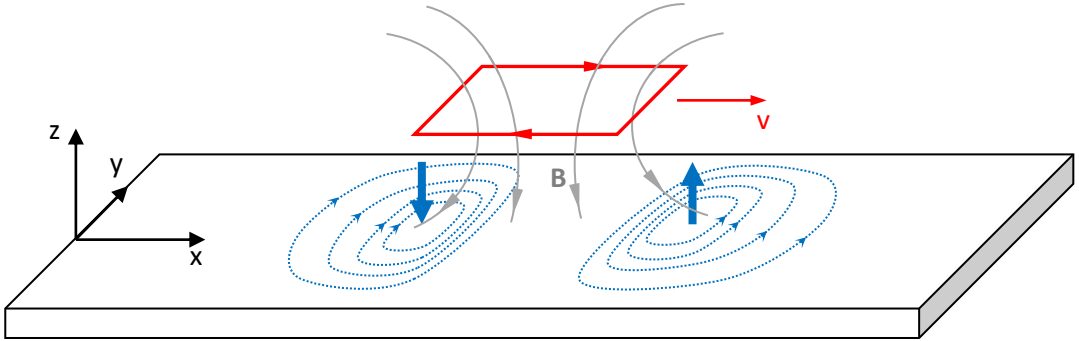
$\boldsymbol{J} = \sigma(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$

$\boldsymbol{F} = (\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B})$ forza di Lorentz

$$\boldsymbol{J} = \sigma \begin{vmatrix} i & j & k \\ v_x & 0 & 0 \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \rightarrow \boldsymbol{J} = \sigma v_x \begin{pmatrix} 0 \\ B_z \\ B_y \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{F} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & J_y & J_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \rightarrow \boldsymbol{F} = \sigma v_x \begin{pmatrix} B_y^2 + B_z^2 \\ B_x B_y \\ B_x B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix}$$

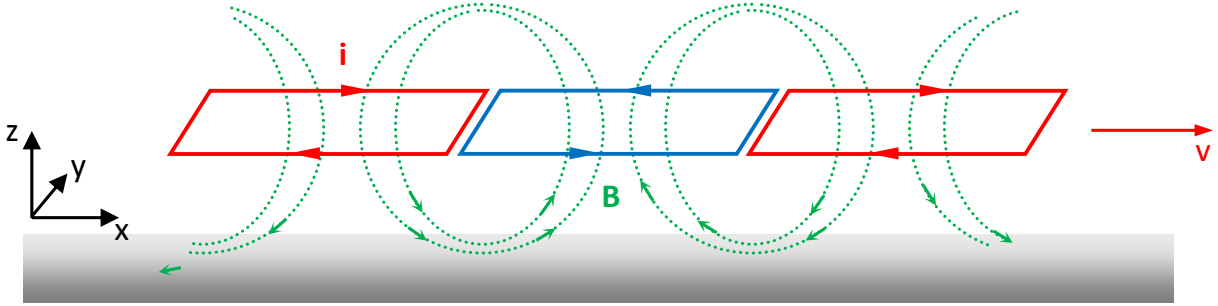
Riduzione della forza resistente



$$\boldsymbol{F} = \sigma v_x \begin{pmatrix} B_y^2 + B_z^2 \\ B_x B_y \\ B_x B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix}$$

- La forza di levitazione F_z è grande se è elevato il prodotto $B_x B_z$
- La forza frenante F_x dipende da $B_y^2 + B_z^2$
- All'aumentare della distanza della spira dal piano si riduce sia F_z che F_x
- Quindi bisogna ridurre B_y e aumentare B_x

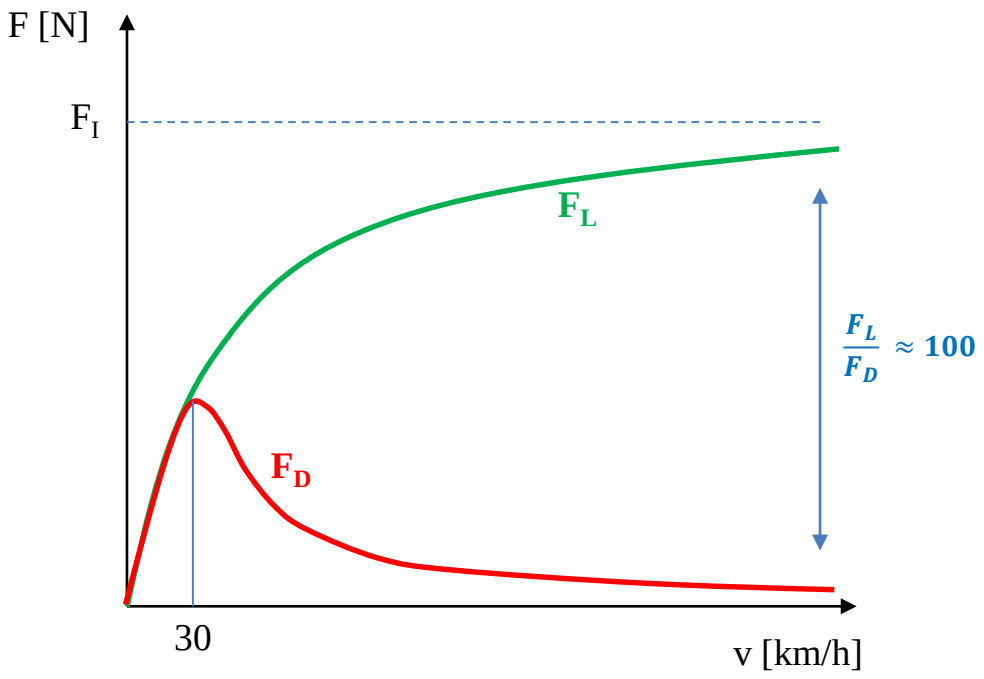
Ottimizzazione delle spire



$$\frac{\boldsymbol{F_z}}{\boldsymbol{F_x}} = \frac{B_x B_z}{B_y^2 + B_z^2} = \propto \frac{B_x}{B_y}$$

Per massimizzare il rapporto F_z/F_x bisogna avere spire strette lungo *y* con una lay-out che massimi la componente x del campo magnetico.

F_L versus F_D



$$F_L(v,z,t) = F_I \cdot \left[\frac{v^2}{v^2+w^2}\right] = F_I \cdot \left(1 - \frac{1}{1+\frac{v^2}{w^2}}\right)$$

$$F_D(v,z,t) = F_I \cdot \left[\frac{v \cdot w}{v^2+w^2}\right]$$

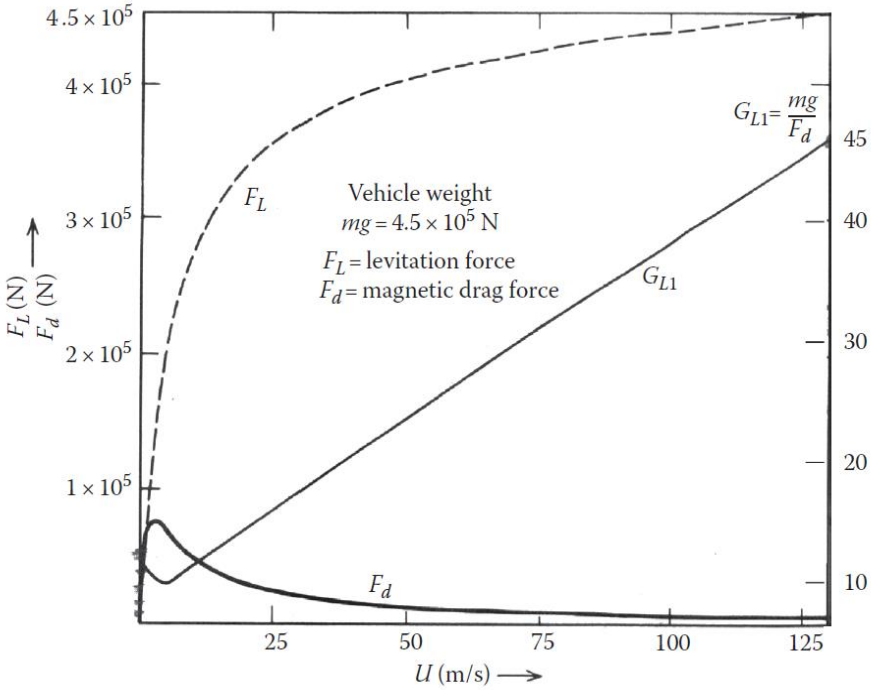
$$\frac{F_L}{F_D} = \frac{v}{w}$$

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

F_L: levitation force
F_D: drag force

I: corrente nella spira
z_0: distanza della spira dal piano
h: spessore del piano

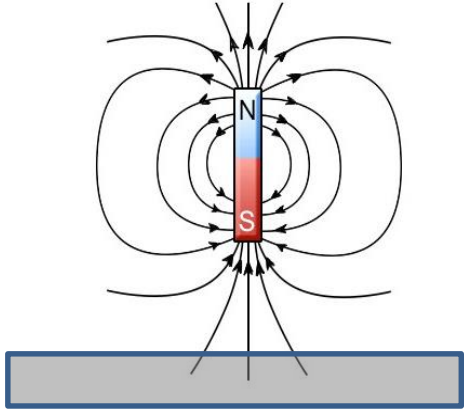
Esempio di forza di levitazione elettrodinamica

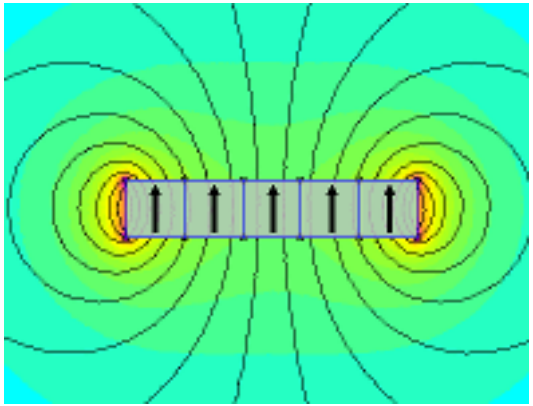


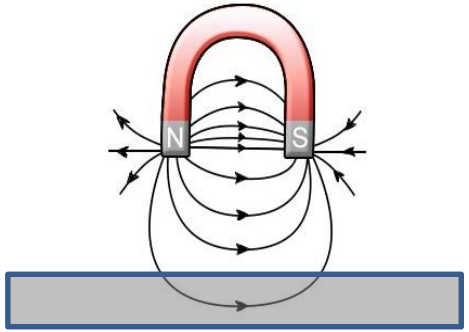
Lunghezza spira:	3 m
Larghezza spira:	0,5 m
Spessore piano metallico:	25mm
Altezza di levitazione:	300 mm
Corrente:	230 kAsp

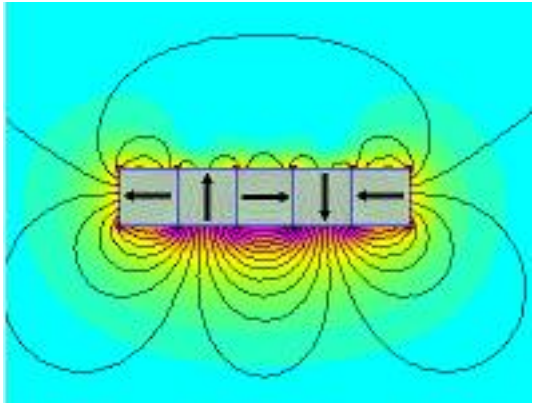
F_L= 55 ton

Levitazione con magneti permanenti







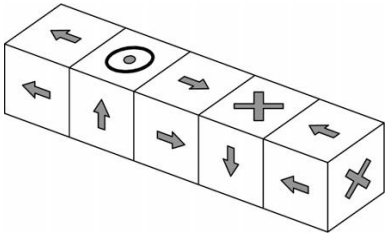


Array di Halbach

Levitazione con 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

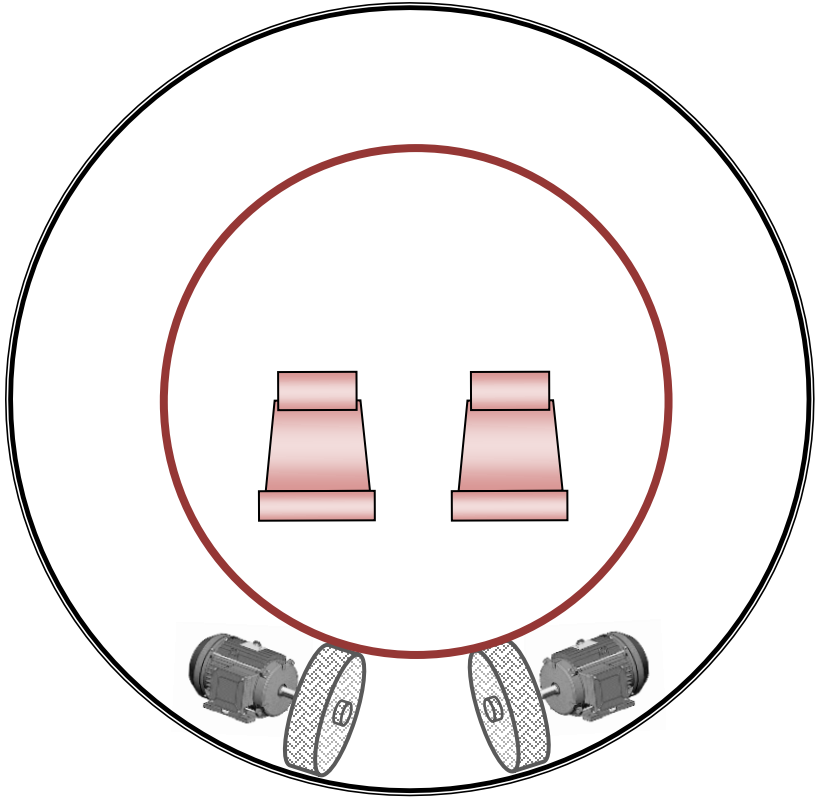


CONTRO

- 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
- Se dovesse incollarsi alla parete del tubo, sarebbe molto difficile staccarlo
- Accumula polvere ferromagnetica sulla sua superficie

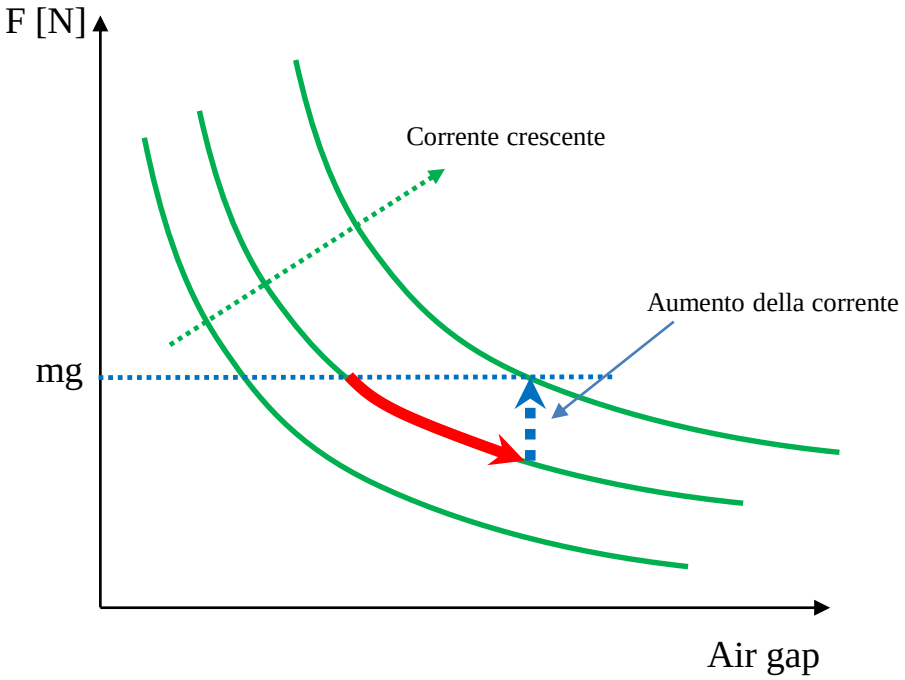
L'energia di levitazione del Transrapid è il 10% dell'energia totale impiegata

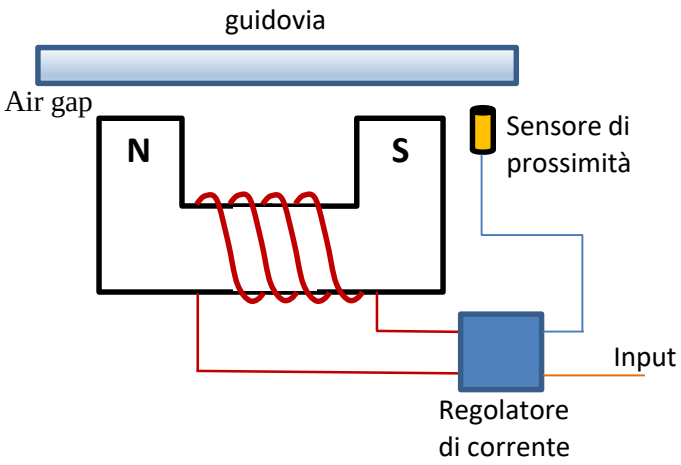
Spostamento su ruote a bassa velocità



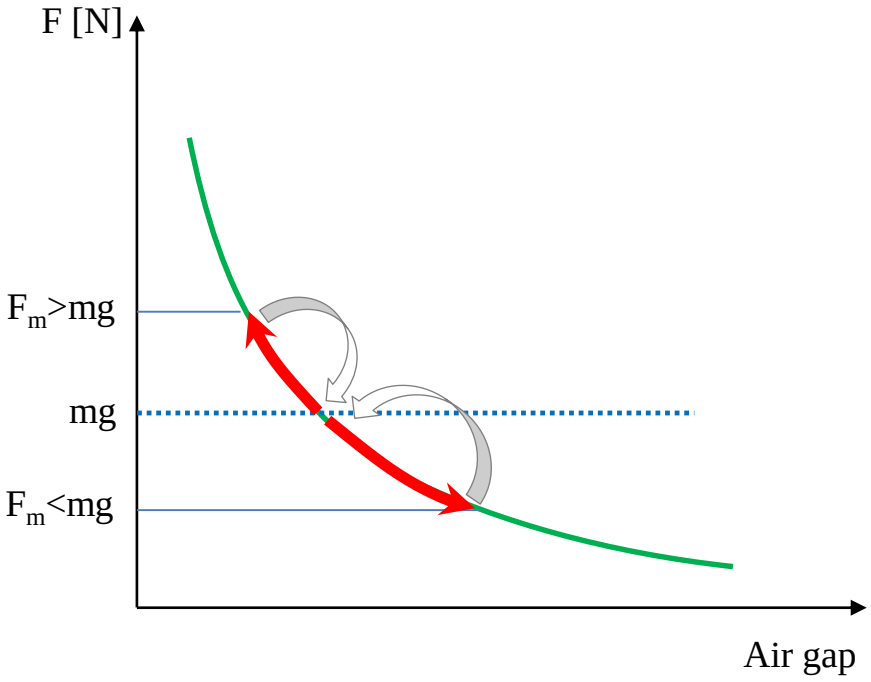
- A bassa velocità il Pod si muove su ruote azionate da motori elettrici.
- Al superamento di 80 km/h, le forze elettrodinamiche fanno levitare il Pod.

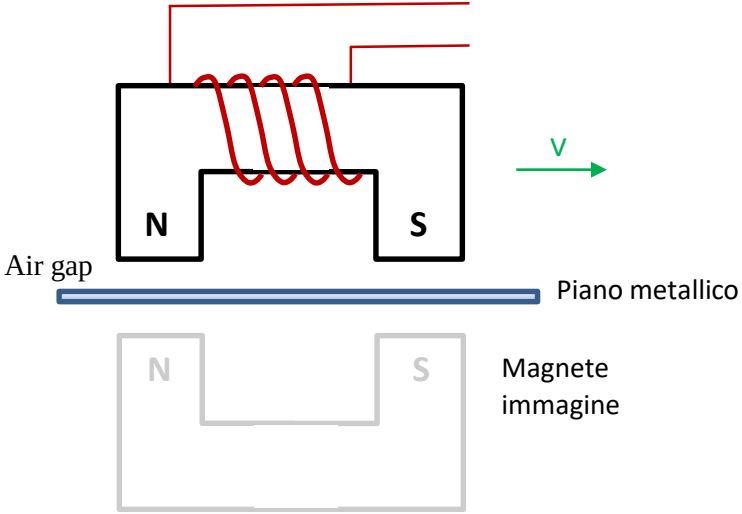
Stabilità di una forza attrattiva





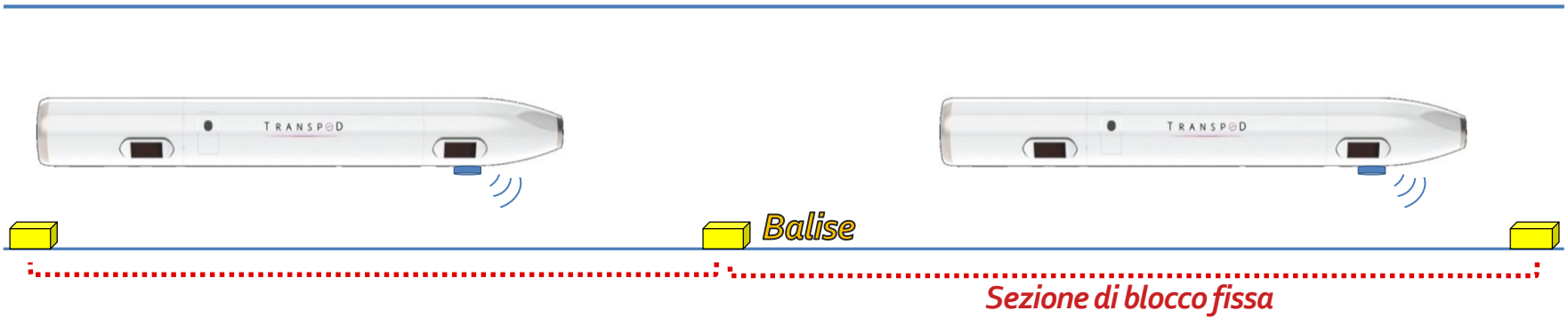
Stabilità di una forza repulsiva





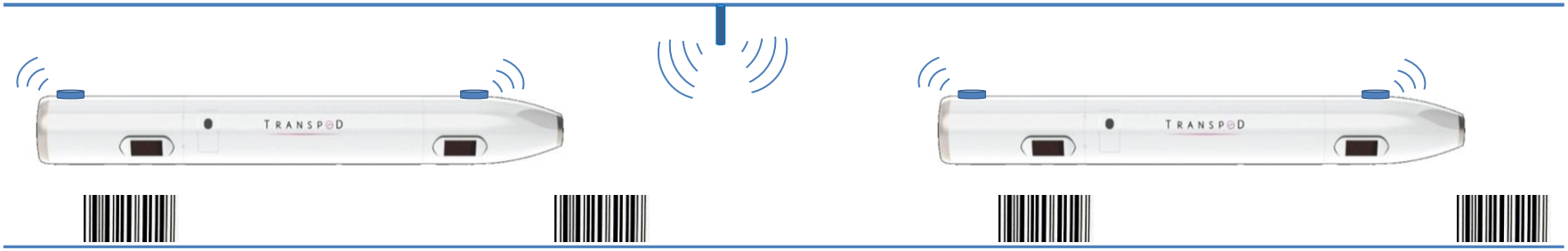
Un controllo è comunque necessario per regolare la dinamica del pod

Segnalamento a sezione di blocco fissa



- L'interazione con la boa elettromagnetica sarebbe troppo veloce per essere efficace e sicura
- E' un sistema di segnalamento di tipo discontinuo
- I blocchi fissi sono poco efficienti per un numero elevato di pod

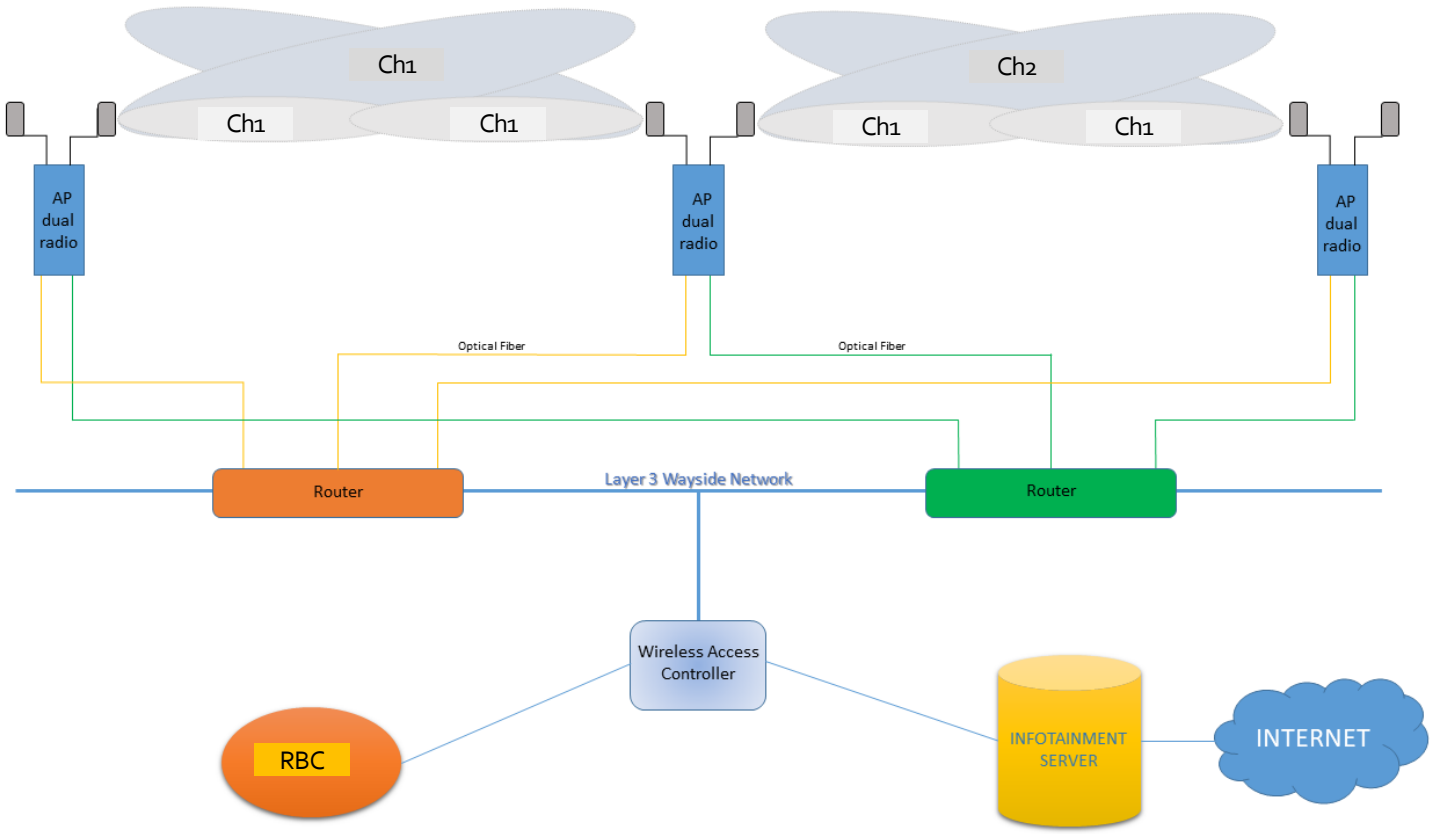
Segnalamento a sezione di blocco dinamica



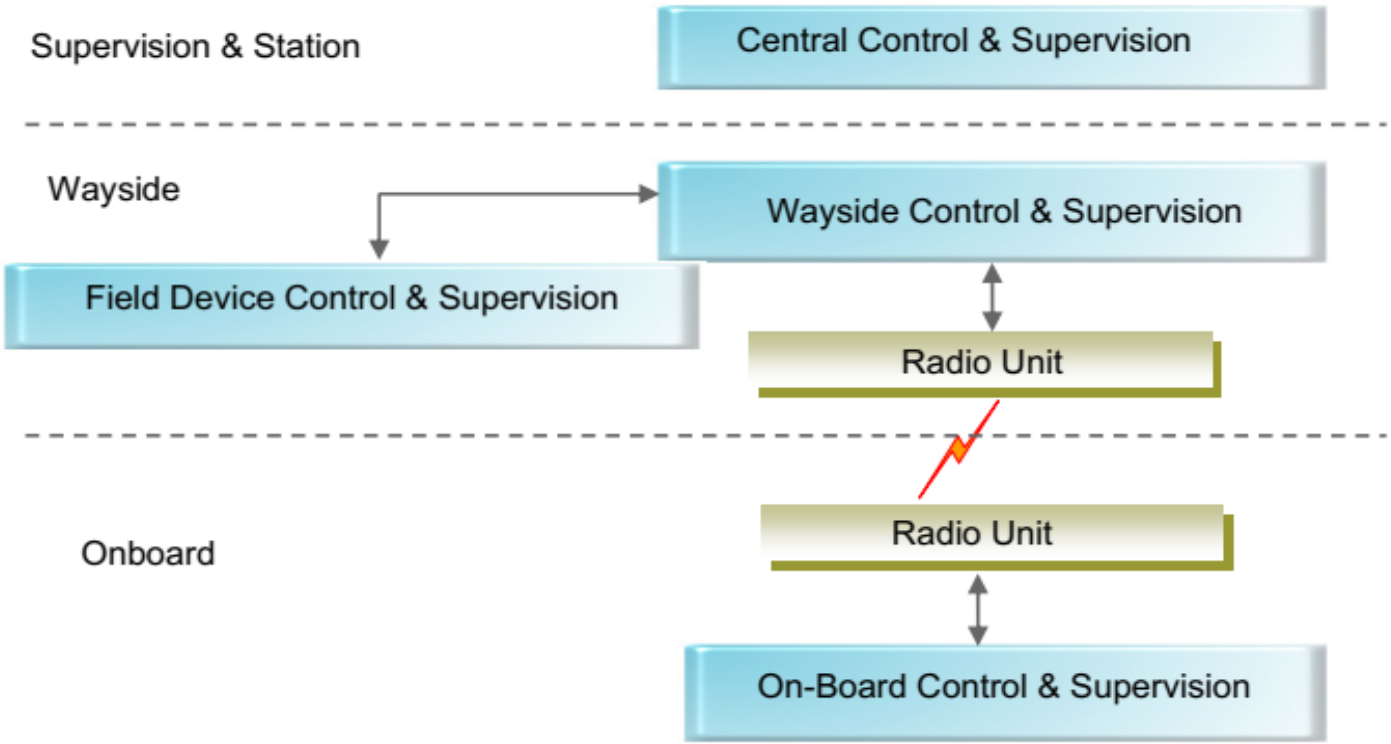
Tag di posizione

- Il pod rileva il la propria posizione leggendo i tag ottici
- Il pod comunica la propria posizione al Radio Block Center che fornisce l'autorizzazione al movimento
- Un problema importante è la gestione degli handover tra stazioni radio

Architettura della rete di segnalamento



Train Control Network



Criteri di selezione per collegamenti economicamente sostenibili

- Richiesta di traffico aereo tra 2 città
- Coppie di città e/o aree metropolitane molto popolate
- Orografia favorevole
- Bassa percentuale di attraversamenti di aree urbanizzate
- Distanza tra le città da collegare (500-700 km)
- Presenza di Hub aeroportuali

mermec
AN ANGEL COMPANY

Grazie per l'attenzione