Motores Elétricos Lineares

Prof. Antonio Carlos Ferreira
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Elétrica
ferreira@ufrj.br

Organização

- Princípio de funcionamento
- Classificação
- Aplicações
  - transportes
- Comentários finais

Conceituação

- Motores elétricos lineares são máquinas elétricas que convertem energia elétrica em energia mecânica com movimento de translação sem o auxílio de dispositivos de adaptação de movimentos.

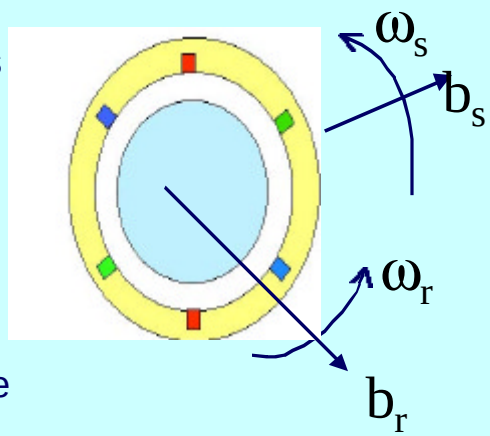
- O conceito tem mais de 150 anos. Primeira proposta patenteada em 1841 por Wheatstone. Primeiro Motor Linear de Indução foi patenteado em 1890.

Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo

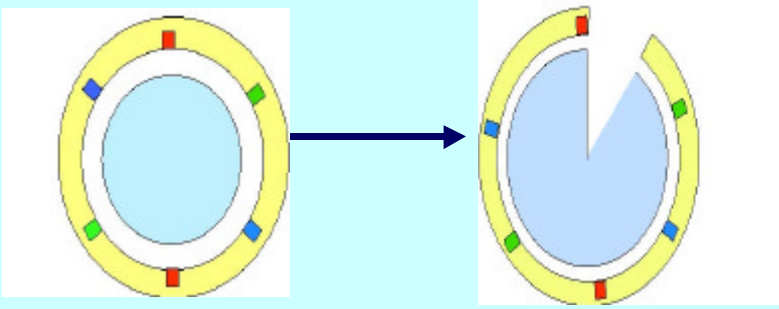
Campos produzidos pelo estator e rotor

- Mesmo número de pólos

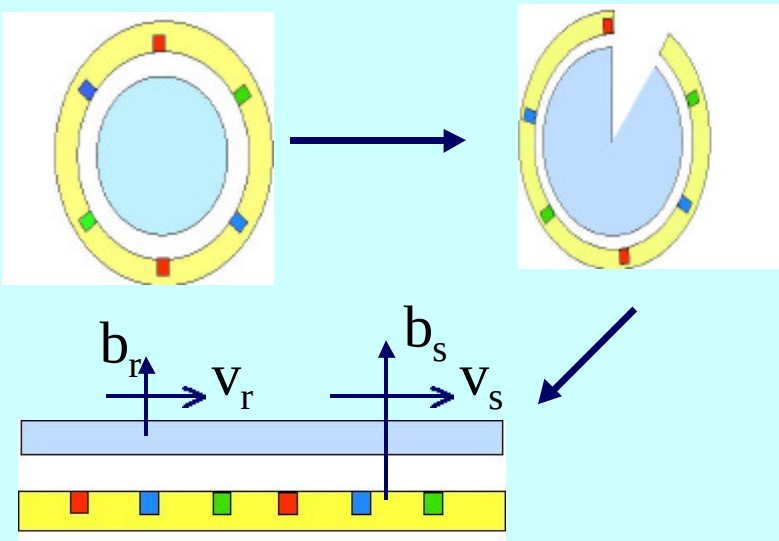
- Estacionários entre si no espaço



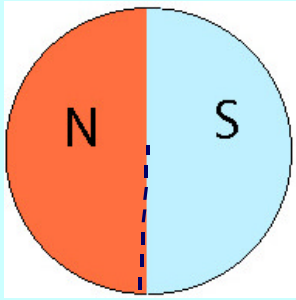
Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo



Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo

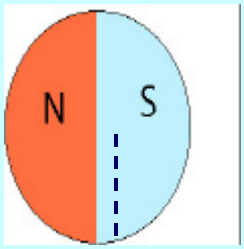


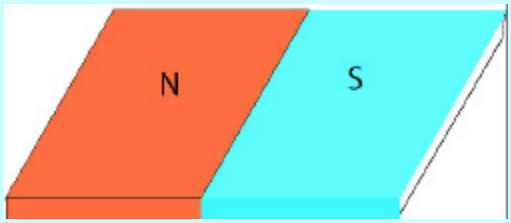
Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo



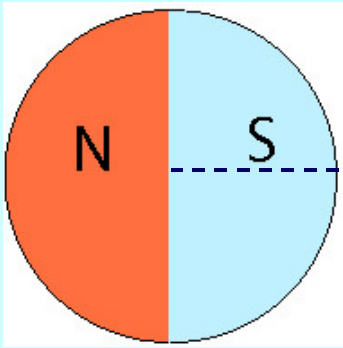
Ponto de corte

Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo



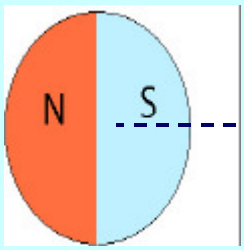


Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo

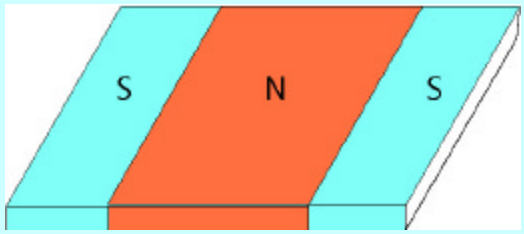


Ponto de corte

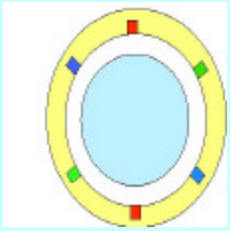
Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo



Número ímpar de pólos (modular)



Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo



ω

$$\text{ù} = \frac{2\,\text{ð}\,f}{p}$$

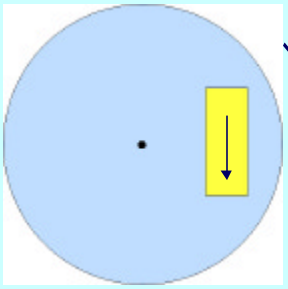
p - pares de pólos

v

$$v = 2\,f\,\text{ô}$$

τ - passo polar

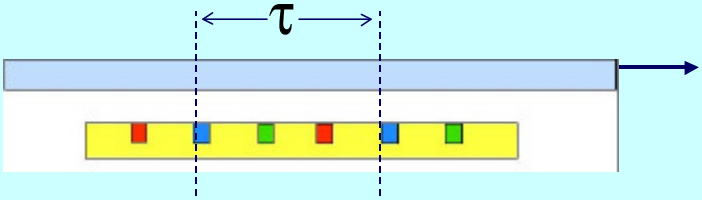
Desenvolvimento de um motor linear a partir de um motor rotativo



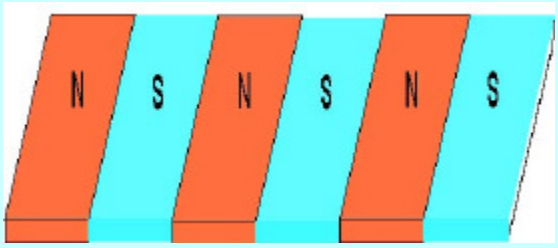
ω

Maior liberdade na velocidade de rotação para uma mesma freqüência de alimentação (engrenagem)

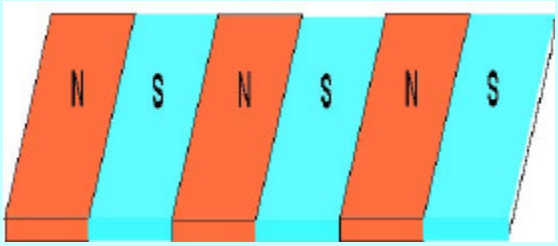
$$v = 2\,f\,\text{ô}$$



v

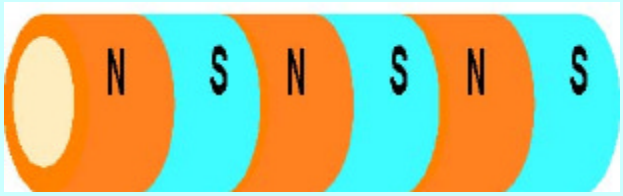


Motor linear plano



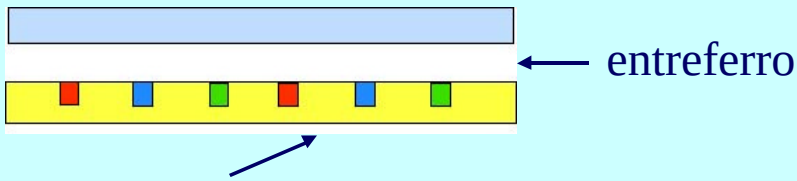
Motor linear plano

Motor linear tubular



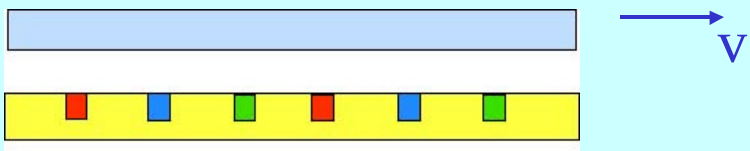
Classificação

campo (rotor, linor, placa de reação, secundário)



armadura (estator, primário)

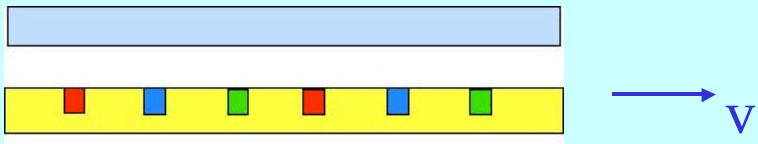
Classificação: parte móvel



Armadura fixa (ex. esteira de bagagem)

Classificação: parte móvel

Armadura fixa (ex. esteira de bagagem)



Armadura móvel (ex. transporte com motor de indução linear)

Classificação: comprimento relativo

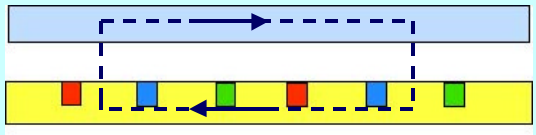
Armadura curta

Classificação: comprimento relativo

Armadura curta

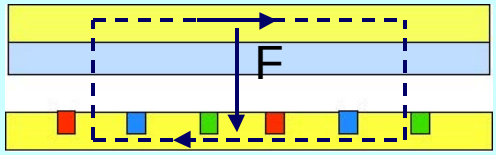
Armadura longa

Força de atração

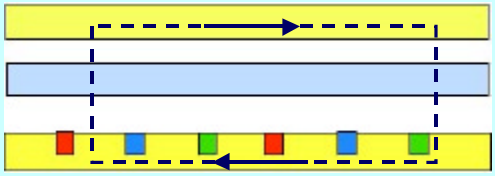


Baixa densidade de fluxo

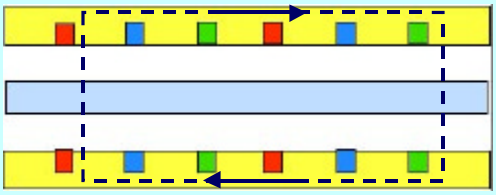
material ferromagnético



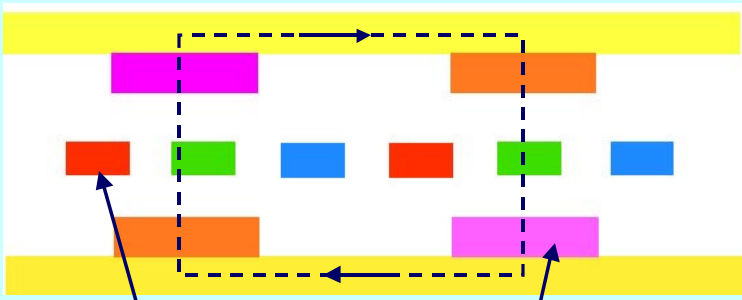
Força de atração (10 x força de tração)



Armadura simples
com circuito magnético

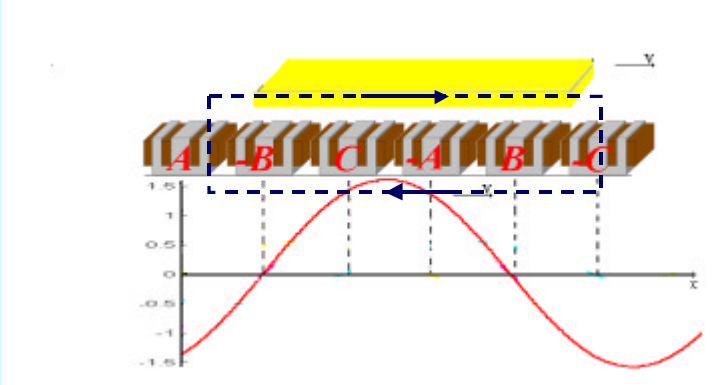


Armadura dupla

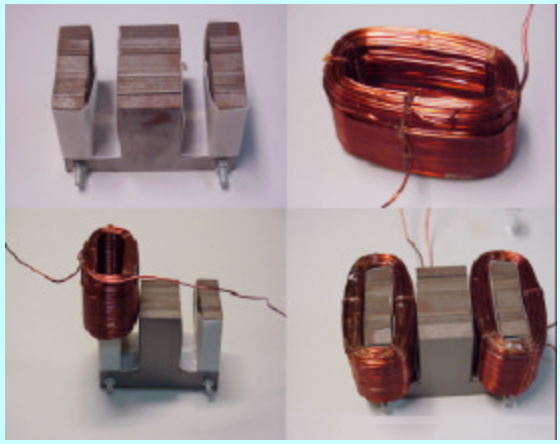


Campo duplo

Fluxo Longitudinal

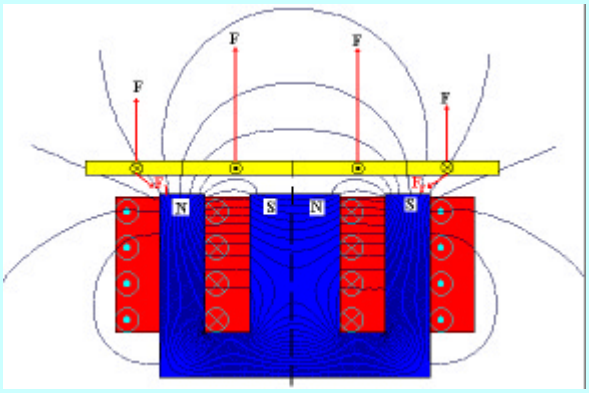


Linhas de fluxo estão num plano paralelo
à direção de deslocamento do campo trafegante

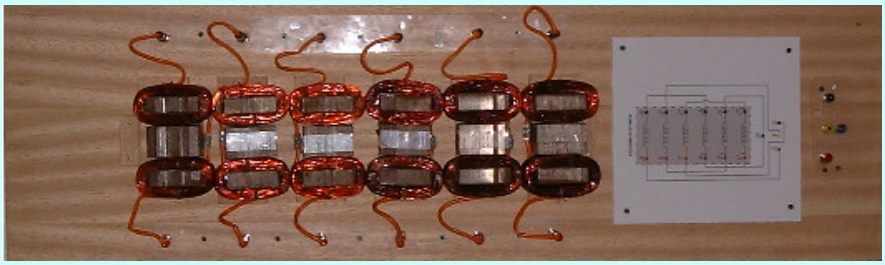


Rodolfo Oliveira
Universidade Nova de Lisboa

Levitação eletrodinâmica

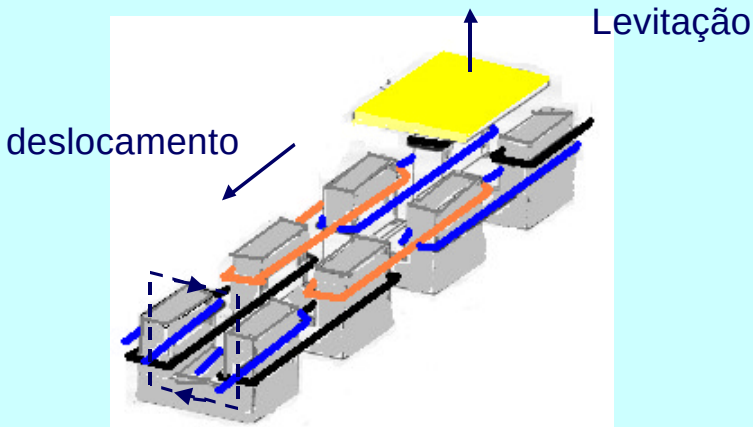


Fluxo Transversal



Rodolfo Oliveira
Universidade Nova de Lisboa

Fluxo transversal



menor corrente de magnetização

Motor linear plano/tubular

Armadura longa ↔ Armadura curta

Armadura fixa ↔ Armadura móvel

Armadura simples ↔ Armadura dupla

Campo simples ↔ Campo duplo

Fluxo longitudinal ↔ Fluxo transversal

Princípio de funcionamento

- Motor linear de corrente contínua
- Motor linear de indução
- Motor linear síncrono (com e sem enrolamento de campo)
- Motor linear de relutância

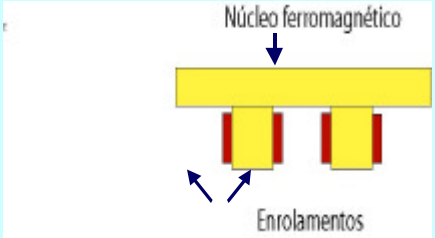
Motor de indução linear

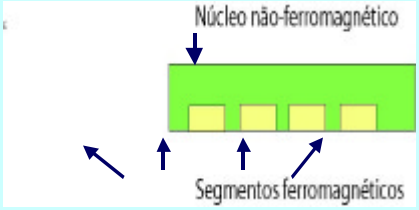
- Enrolamento de armadura
  - em geral condutores de cobre
  - distribuídos ou concentrados
- Enrolamento secundário
  - placa de alumínio ou cobre
  - gaiola (menos frequente)

Motor linear síncrono

- Enrolamento de armadura semelhante ao MLI (com ou sem núcleo ferromagnético)

- Enrolamento de campo





Bobina supercondutora

Aplicações

- 1895 e 1940 : Industria têxtil.
- 1905 : dois projetos de tração (MLI).
- 1923: Nova Iorque, esteira rolante acionada por um MLI, "Grand Central Terminal" à "Times Square".
  - 1945: "Electropult" , acelerar aviões na sua decolagem
    - MLI velocidade síncrona de 100m/s,
    - força de arranque de 75600 N
    - capacidade de acelerar uma massa de 5 toneladas aos 185 km/h em apenas 4,2 segundos.

Aplicações

- 1950's: bombas para metais líqüidos
- 1960: transporte de aço
- 1960: propulsão de veículos para simulação de colisões

- 1970: transporte de massa em alta e baixa velocidades
  - Motor Linear de Indução
  - Motor Linear Síncrono ; ímãs permanentes com terras raras e bobinas supercondutoras

Aplicações

- **Aplicações industriais**

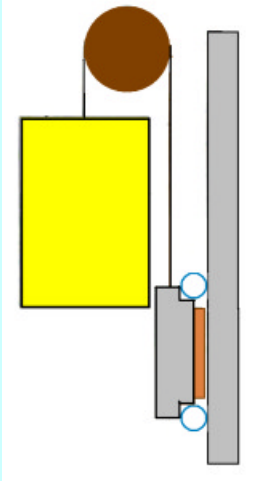
  portas automáticas, transporte de mercadorias, máquinas ferramentas, ferramentas de impacto, mesas XY, bombas de pistão (motor tubular)

  indústria de diversão
- **Drives verticais**

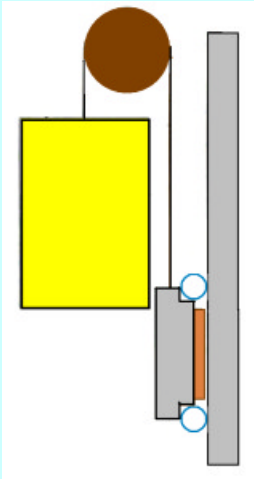
  Conforto (elevadores)

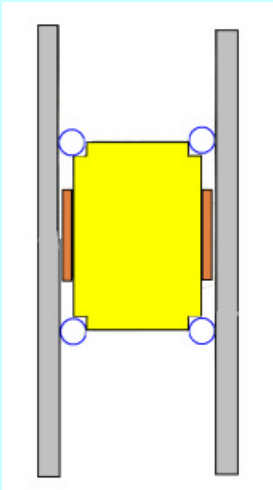
- **Transporte**

Elevadores



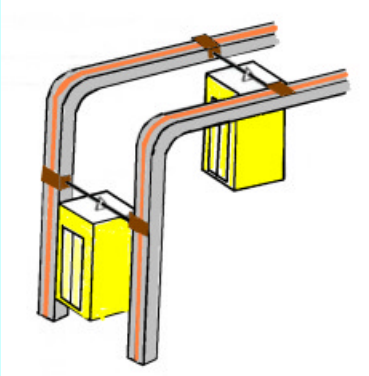
Elevadores





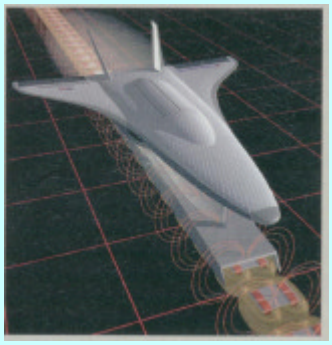
Elevadores

Deslocamento
vertical e horizontal



Lançadores eletromagnéticos

- Porta aviões
  - Rendimento
    - 40 - 70 %
    - vapor 5%
  - Motor linear Síncrono
- NASA
  - Auxílio lançamento
  - 965 km/h - 2,4 km
  - 200 kWh
  - 20% redução de peso
  - Atual $4500/kg
  - MagLev $450/kg



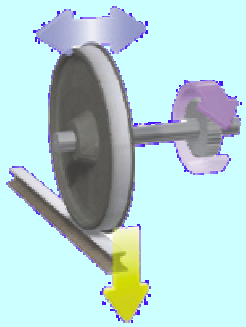
Lançadores eletromagnéticos

- 15,2 metros
- Motor Linear de Indução
- Veículo 1,5 metros
  14 kg
- Aceleração 6 G

Lançadores eletromagnéticos

Transporte: Baixa velocidade

- Propulsão e frenagem independentes da aderência da roda ao trilho



- Obra civil: piso, túneis
- Maiores inclinações
- Menor raio de curvatura
- Motor de Indução Linear com armadura no carro

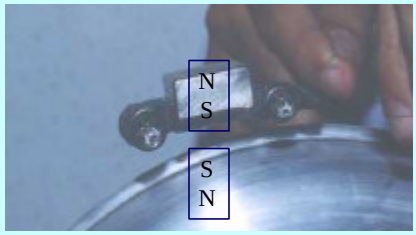
Transporte: Alta velocidade

- Uso de rodas: ruído, vibração, custo de manutenção
- Veículos com levitação magnética (MagLev)
- 1,5 m/s^2, 300 km/h em 5 km
  - Percursos abaixo de 1000 km: competitivo com avião
- Motor Linear Síncrono
  - Bobina Supercondutora x ímã ⇨custo

Transporte: Alta velocidade

- Levitação Eletromagnética
  - força de atração
  - instável sem controle com re-alimentação

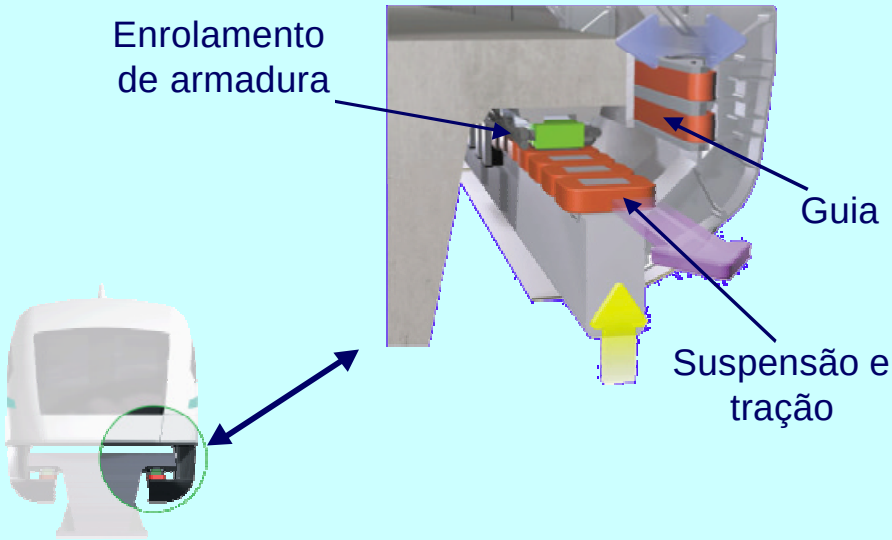
- Levitação Eletrodinâmica
  - força de repulsão
  - pode trabalhar com entreferros maiores



Transporte: Transrapid (Alemanha)

- Levitação Eletromagnética (eletroímã)
- Tração
  - Motor Linear de Indução com armadura dupla (1979)
  - Motor Linear Síncrono com armadura longa

Transporte: Transrapid

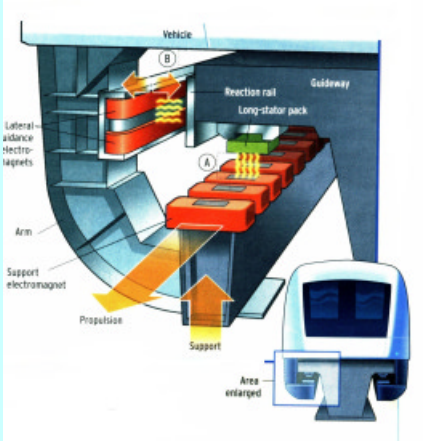


Transporte: Transrapid (Alemanha)

- Controle independente: tração e levitação
- Frenagem eletrodinâmica (energia devolvida à rede)
- Alimentação com conversor eletrônico
- Trilho alimentado por seções

Transporte: Shangai Maglev

- Tecnologia Transrapid
- Em teste (Outubro)
- Shangai-Aeroporto
  - 30 km
  - 430 km/h
  - 8 minutos
  - Carro 40 minutos



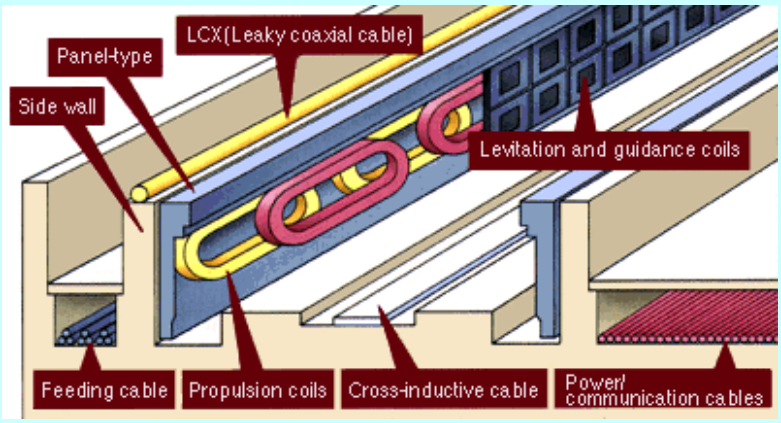
Transporte: Chuo Shinkansen (Japão)

- Atualmente: Tokaido Shinkansen
  270 km/h
- Nova linha: 500 km/h
- Yamanashi Maglev Test Line
  - 42,8 km
  - velocidade máxima de projeto 550 km/h

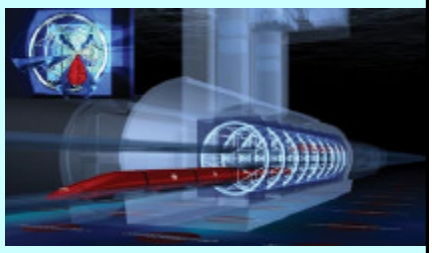
Transporte: Chuo Shinkansen (Japão)

- Levitação Eletrodinâmica: força de repulsão entre espiras estacionárias curto-circuitadas dispostas nas paredes laterais do trilho e eletromagnetos supercondutores
- Os mesmos eletromagnetos são usados para guia
- Tração: motor linear síncrono com enrolamento de armadura ao longo das paredes laterais do trilho

Transporte: Chuo Shinkansen (Japão)

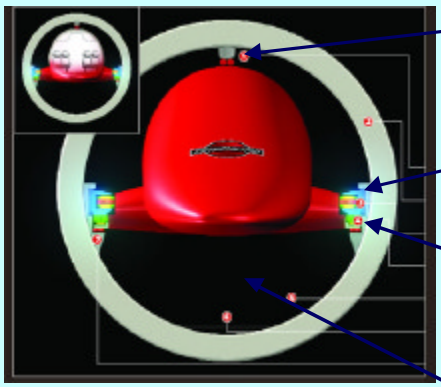


Transporte: Swissmetro



- Saturação de transportes rodoviário e ferroviário
- Topografia
-
- Características esperadas
  - acima de 500 km/h
  - 4000-6000 pass./h
  - conexão com trasporte urbano
  - consumo: metade do ferroviário convencional

Transporte: Swissmetro



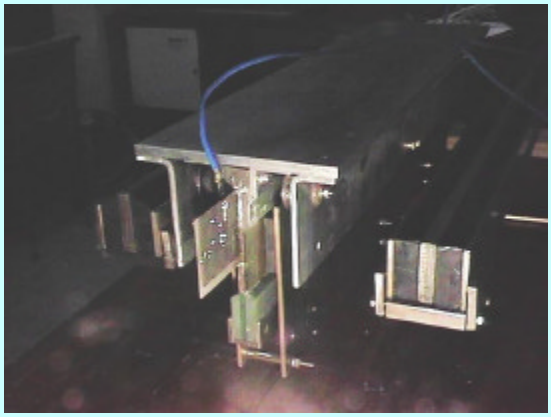
Transporte: Swissmetro

Category (link)	Distance	Desired speed	Timescale
Inter-city links	50-200 km	400 km/h	2020
City-airport links	50-100 km	400 km/h	2020
City network and large inter-city corridors	> 300 km	600-700 km/h	2030-2050
Airport networks	> 100 km	400-700 km/h	2030-2050

Transporte: Projeto LEVMAG (UFRJ)

- Levitação supercondutora

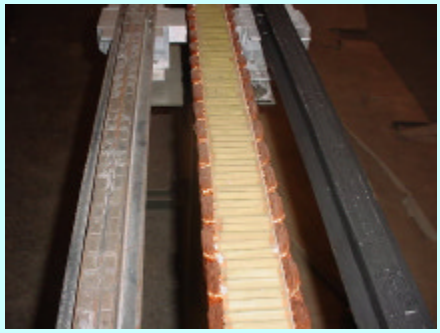
Transporte: Projeto LEVMAG (UFRJ) - Fase 1



Motor linear síncrono (armadura no carro)

trilho reto 7 metros

Transporte: Projeto LEVMAG (UFRJ) - Fase 2



- Motor linear síncrono com armadura ao longo do trilho / circuito fechado 30 metros
- Campo com ímãs de Nd-Fe-B fixos no carro

Transporte: Projeto LEVMAG (UFRJ) - Fase 2

Transporte: Projeto LEVMAG (UFRJ) - Fase 2

Comentário finais

- Technology News - Novembro 2002
  - "*O número de motores lineares vendidos na Europa quadruplicará até 2008*"
  - 33.300 (2001) ⇨ 125.500 (2008)

- **Motor Linear x Motor Rotativo**
  - relação custo / benefício
  - maior entreferro: rendimento, fator de potência, aquecimento da armadura
  - menor relação potência de saída/massa e potência de saída/volume de material ativo.

Comentário finais

- **Aplicação em transporte**
  - Baixa velocidade
    - redução do custo da obra civil (urbano)
  - Alta velocidade
    - fundamental