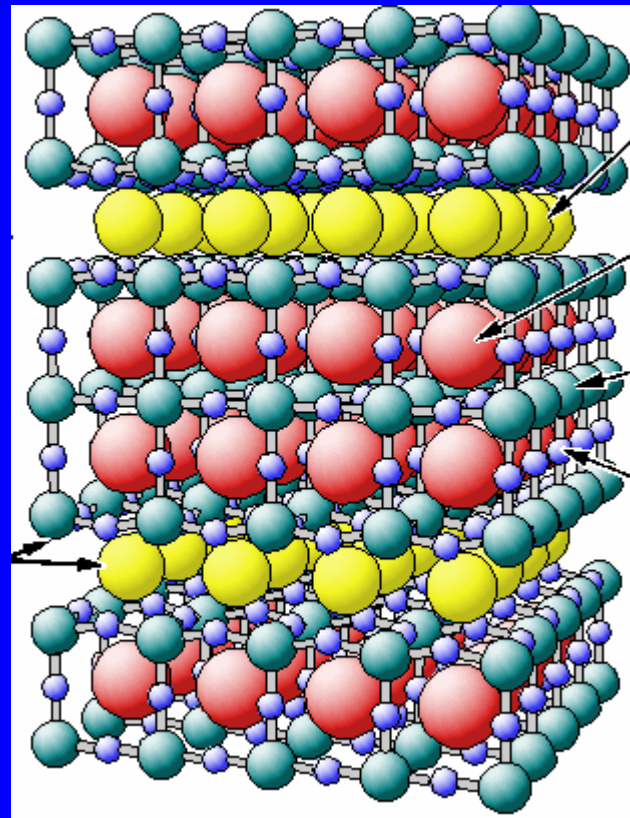


Os Materiais Supercondutores em Sistemas Eléctricos de Potência

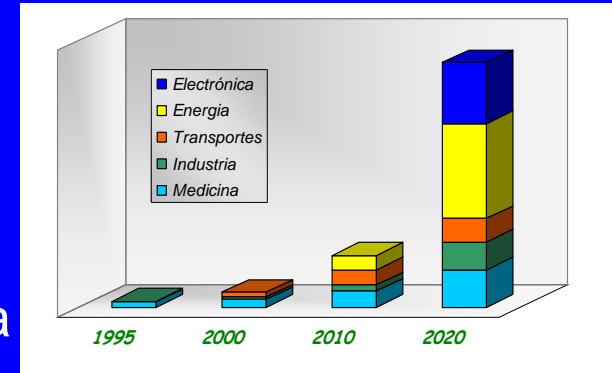


A. Leão Rodrigues

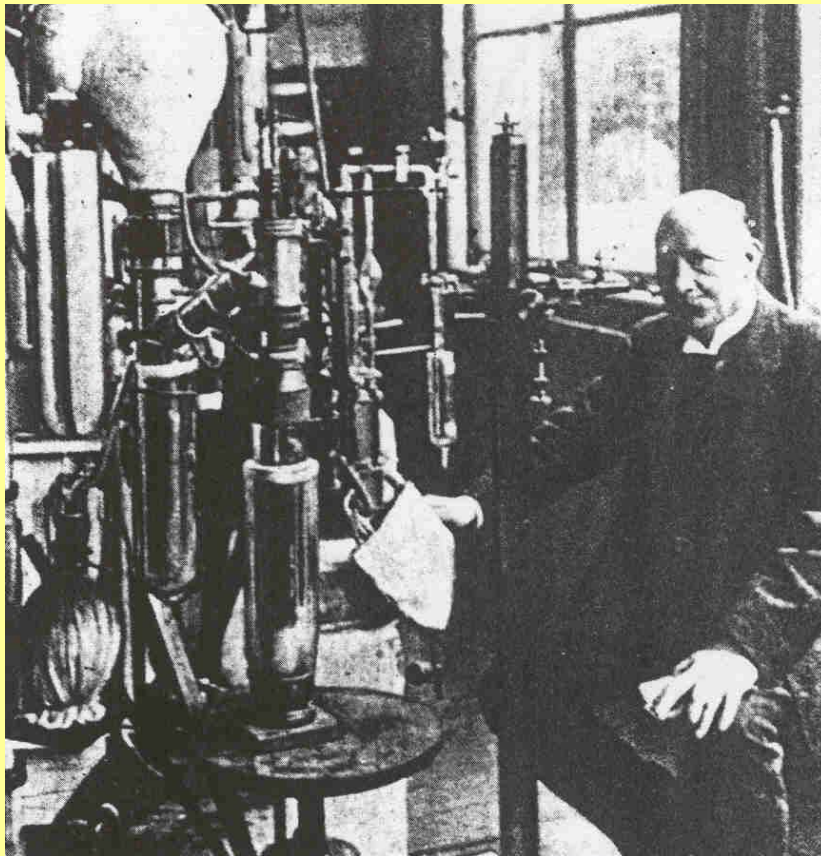
1 Propriedades dos Materiais Supercondutores

2 Aplicações em Sistemas de Potência

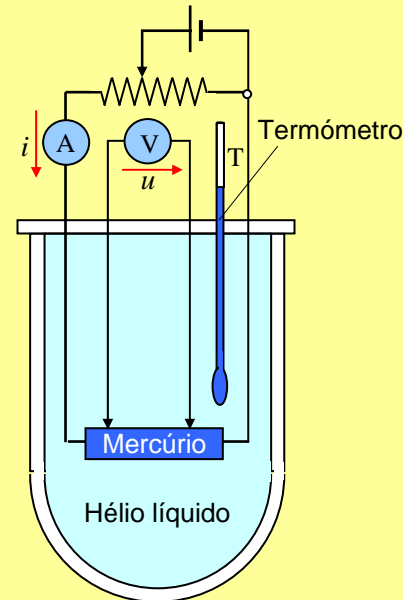
- Cabos Eléctricos
- Transformadores de Potência
- Limitadores de Corrente (Disjuntores)
- Sistemas de Armazenamento de Energia
- Motores Eléctricos de Relutância e de Histerese
- Chumaceiras magnéticas
- Parques Eólicos
- Levitação Electromagnética em Transportes (Maglev)



• Descoberta da supercondutividade

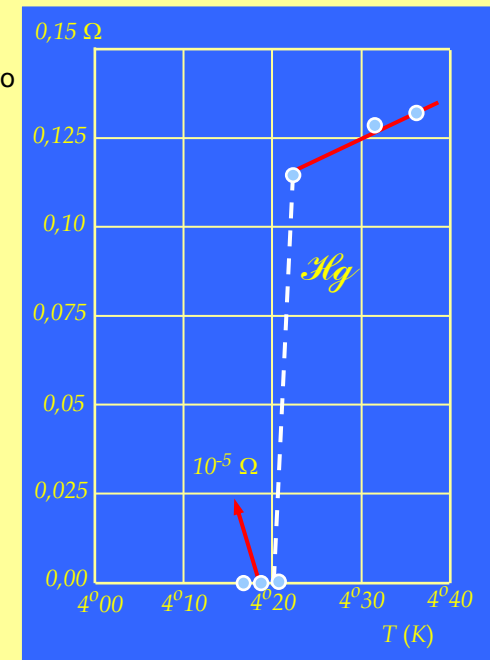


Heike Kamerling Onnes no seu laboratório de criogenia na Universidade de Leiden, Holanda, em 1911



Experiência de Onnes

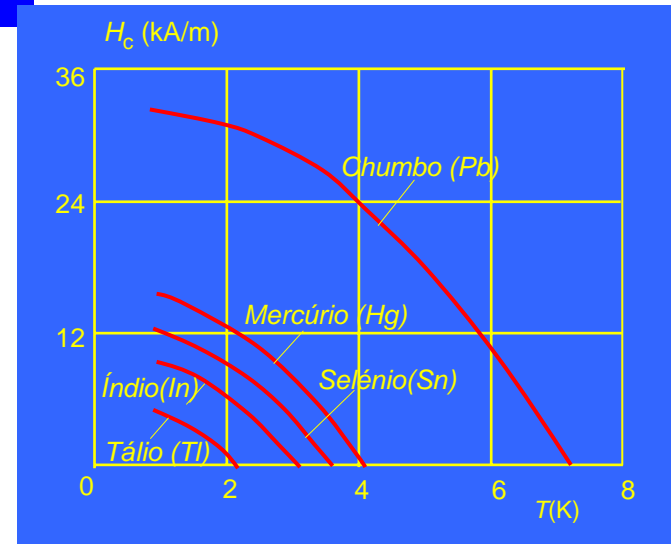
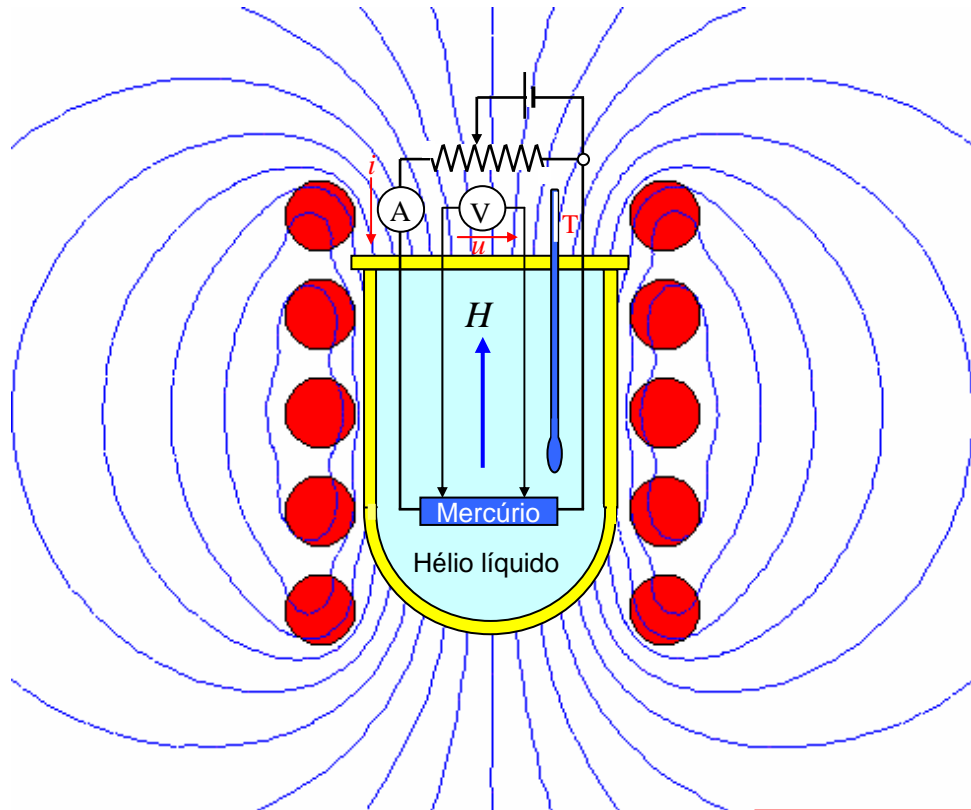
$$R = \frac{u}{i}$$



Resultado

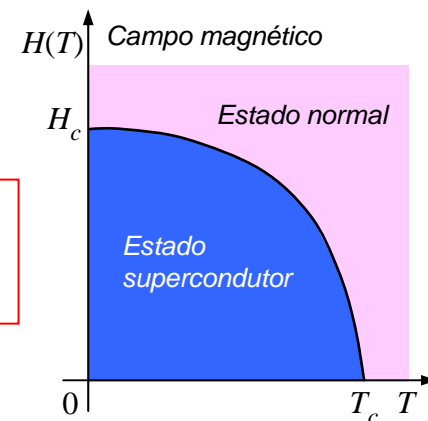
O mercúrio perde a resistência à temperatura de 4,2 graus Kelvin, tornando-se num supercondutor.

• Efeito do campo magnético e da corrente



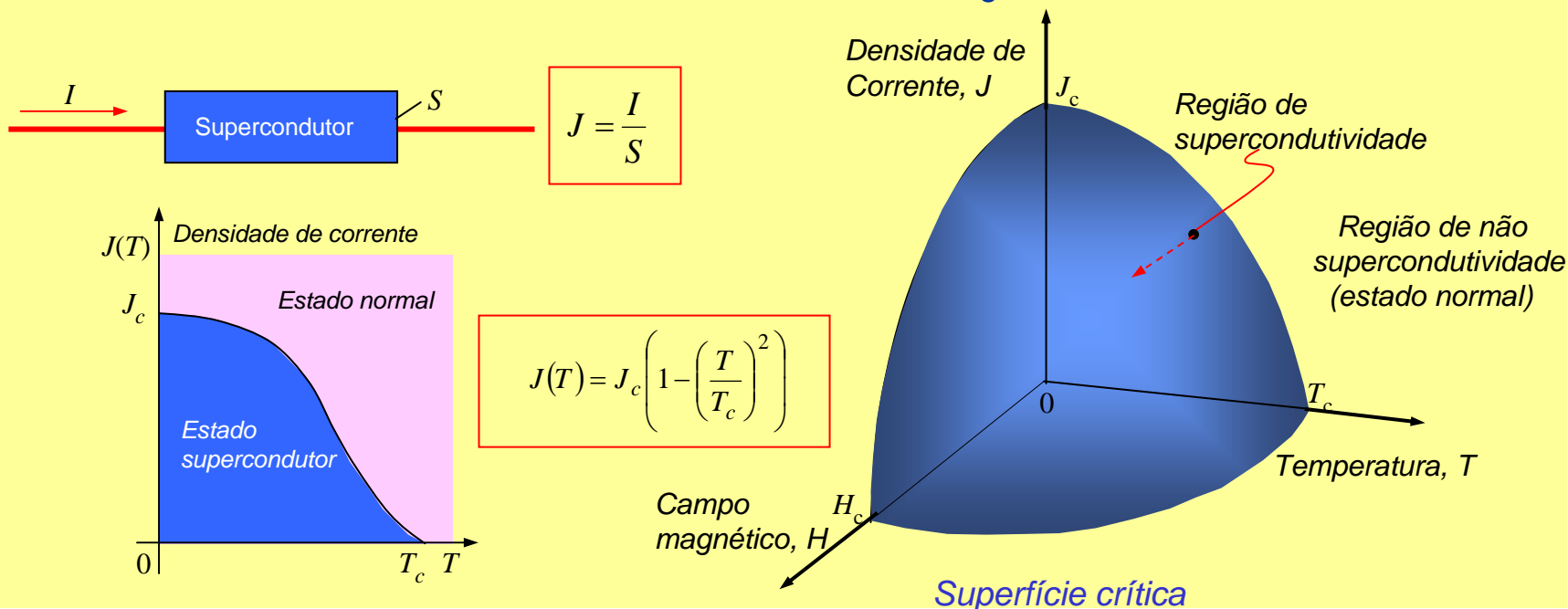
Supercondutores de baixa temperatura (LTS) ou de 1ª geração descobertos até à década de 70

$$H(T) = H_c \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right)$$



Destruição da supercondutividade

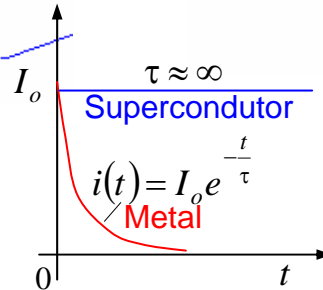
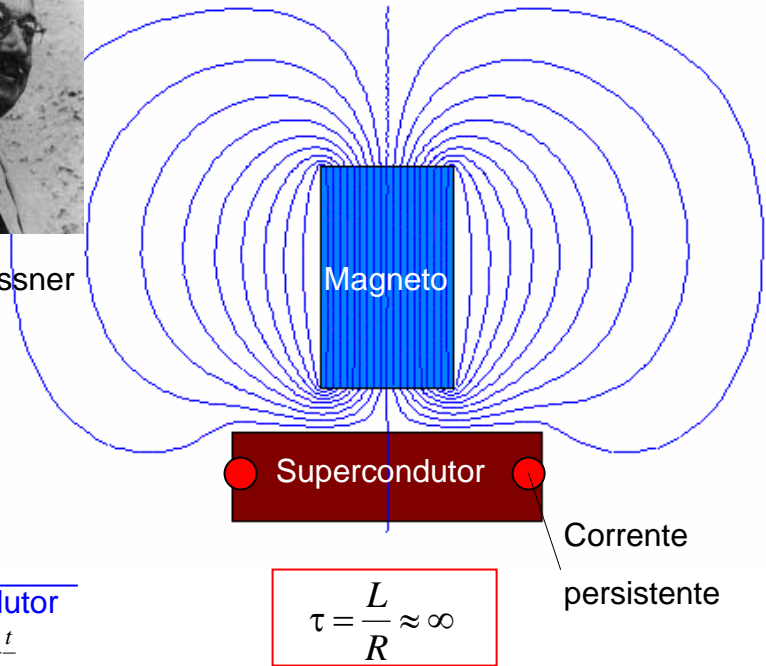
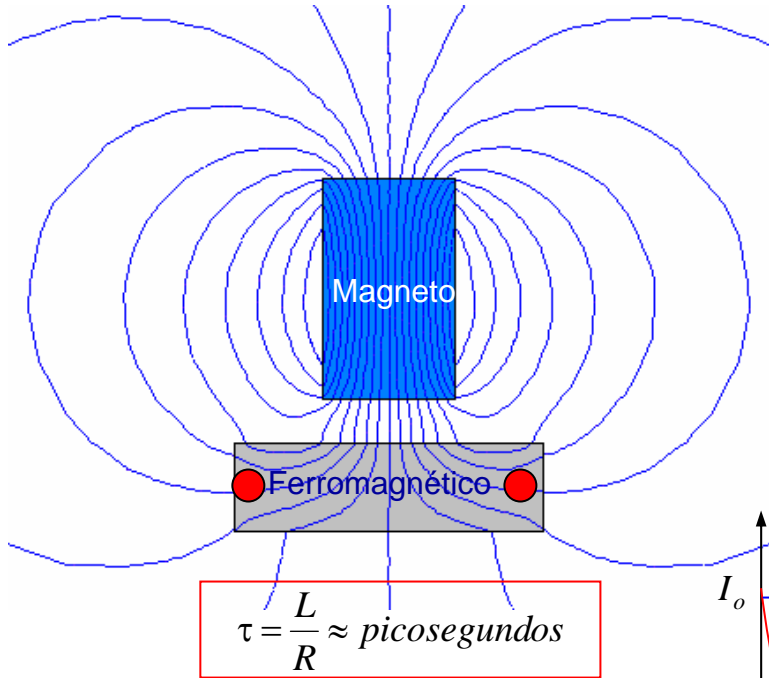
- O estado de supercondutividade de um material é destruído se um dos três parâmetros seguintes estiver fora da superfície crítica:
 - Temperatura crítica (T_C)
 - Campo magnético crítico (H_C)
 - Densidade de corrente crítica (J_C)



Efeito de Meissner



Walter Meissner



- Em 1933, Walter Meissner e Robert Ochsenfeld observaram que o fluxo magnético era expelido do interior de um supercondutor.

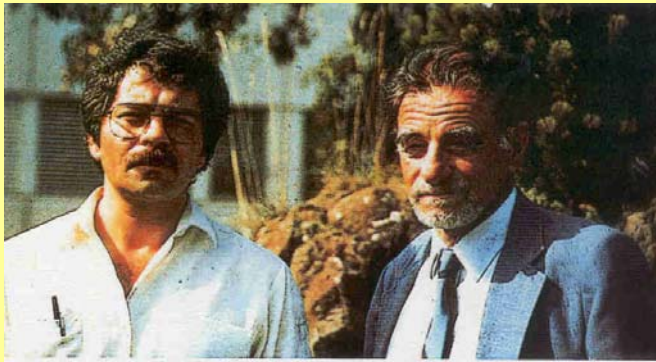
Um supercondutor é um material diamagnético $-\chi = \frac{M}{H}$

Levitação magnética



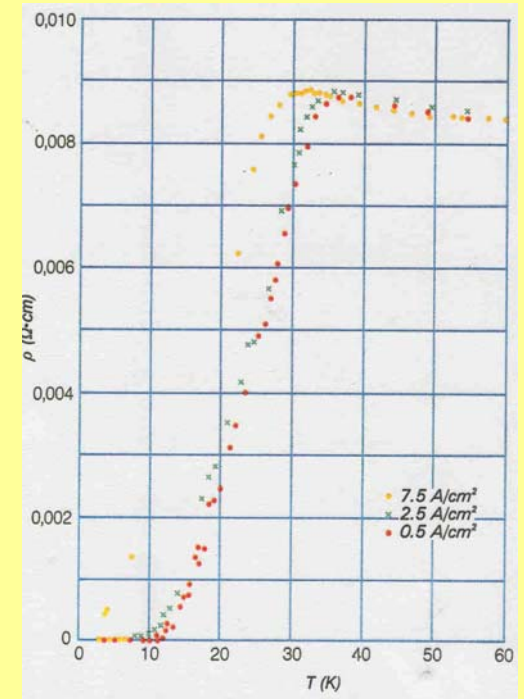
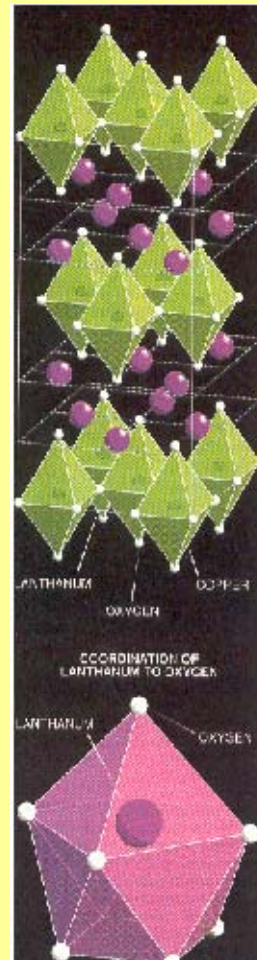
Clique em cima da foto para visualizar o filme

• Supercondutores Cerâmicos de Alta Temperatura (HTS)



Bednorz e Alex Muller, nos laboratórios da IBM, perto de Zurique, em 1986.

- Em 1986, no laboratório de investigação da IBM, em Rüschliko (Suíça), os investigadores Georg Bednorz e Alex Müller descobriram um composto cerâmico à base de lantânio que se tornava superconductor abaixo da temperatura de transição de cerca de 20 K.

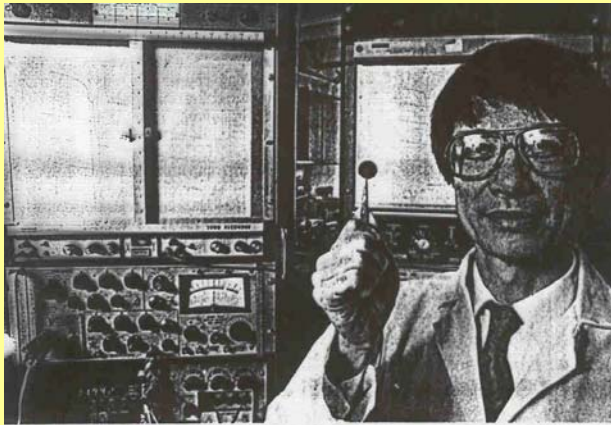


Curvas de transição do La_2CuO_4

$$T_c = 20 \text{ K}$$

Estrutura cristalina do La_2CuO_4

• Supercondutor YBCO (Ítrio, bário e óxido de cobre)

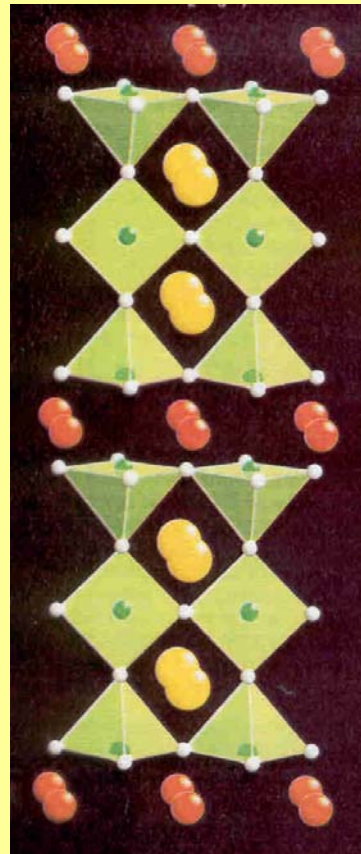
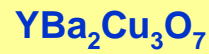


Paul Chu no laboratório de materiais da Universidade de Huston, em 1987



Bolachas cerâmicas de YBCO

$T_c = 86 \text{ K}$



Estrutura cristalina do YBCO

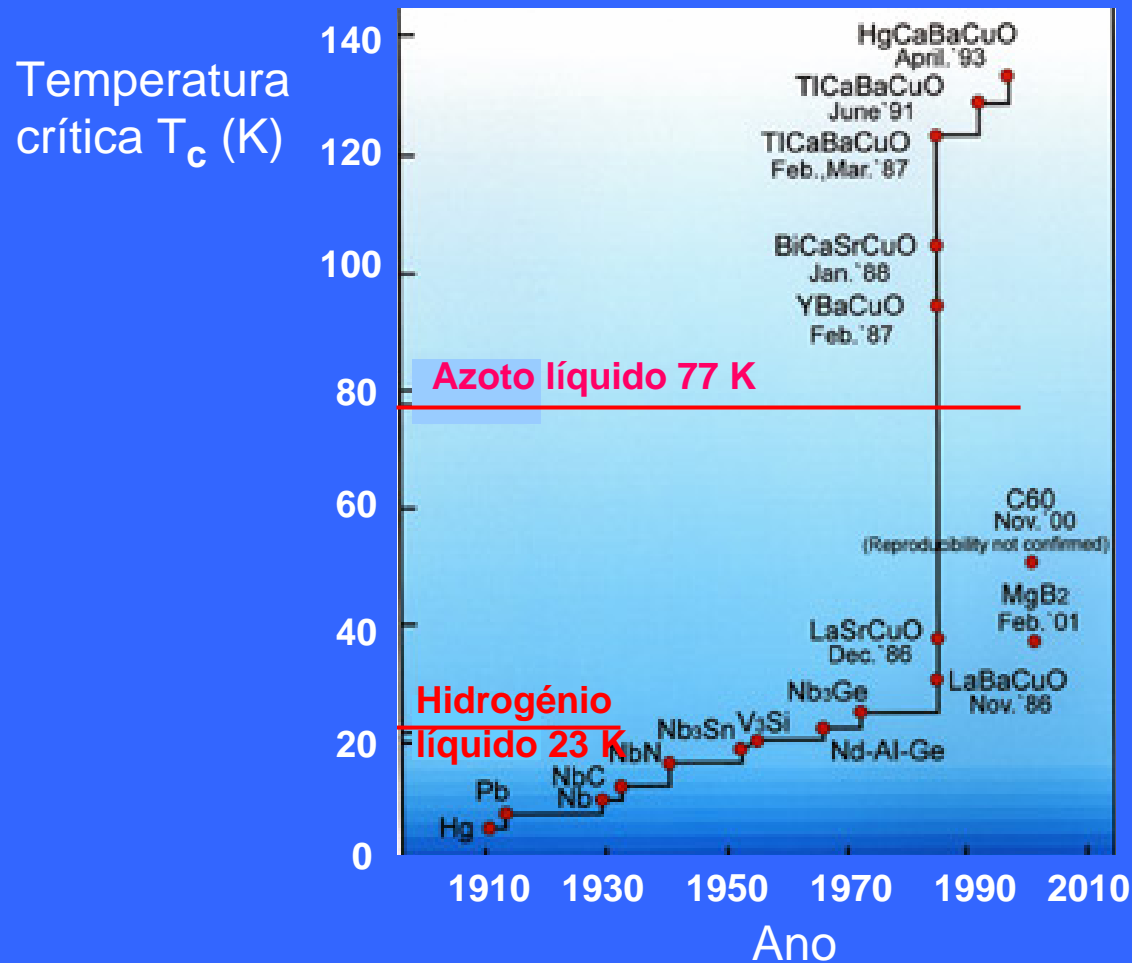


Blocos cerâmicos de YBCO

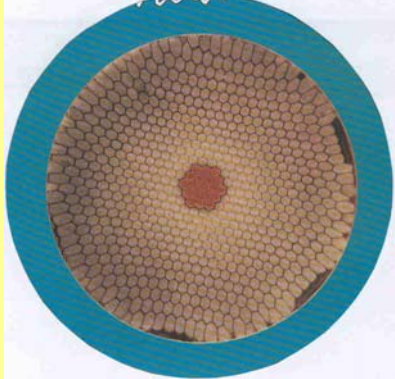


Anéis cerâmicos de YBCO

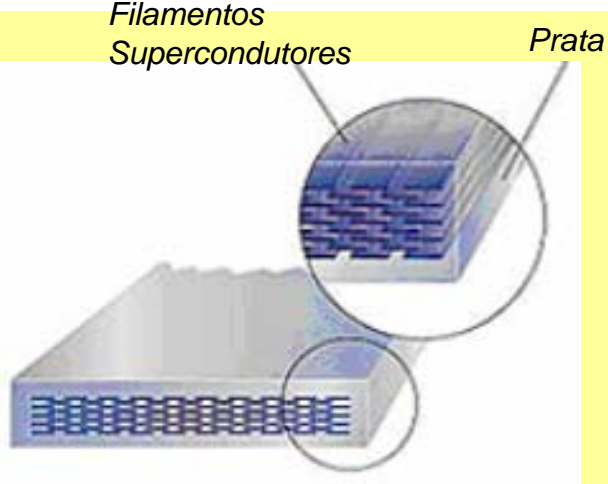
• Evolução dos supercondutores ao longo do tempo



☐ Cabos eléctricos



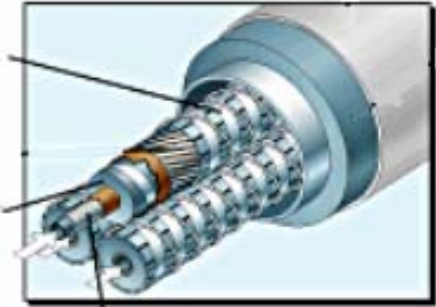
Os cabos supercondutores podem transmitir 3 a 5 vezes maior energia do que os cabos convencionais em cobre, sem qualquer perda de energia.



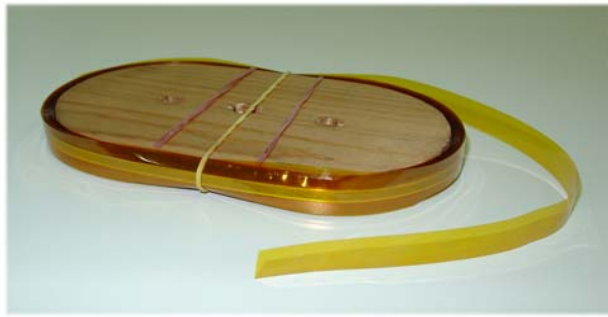
Devido à necessidade de refrigeração estes cabos são subterrâneos e o azoto é utilizado como elemento refrigerador e isolante. Não contaminam os solos como os de óleo

Dieléctrico – azoto líquido

Isolante

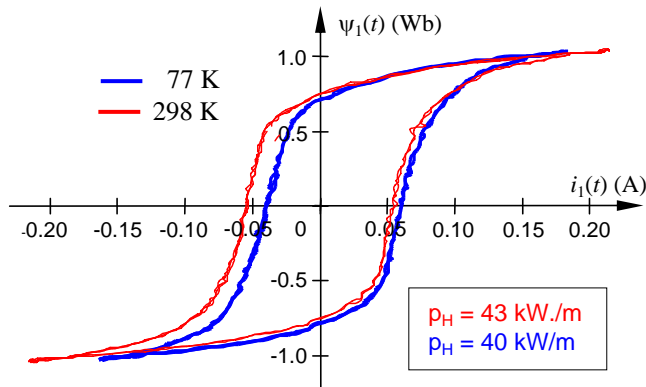


Supercondutor

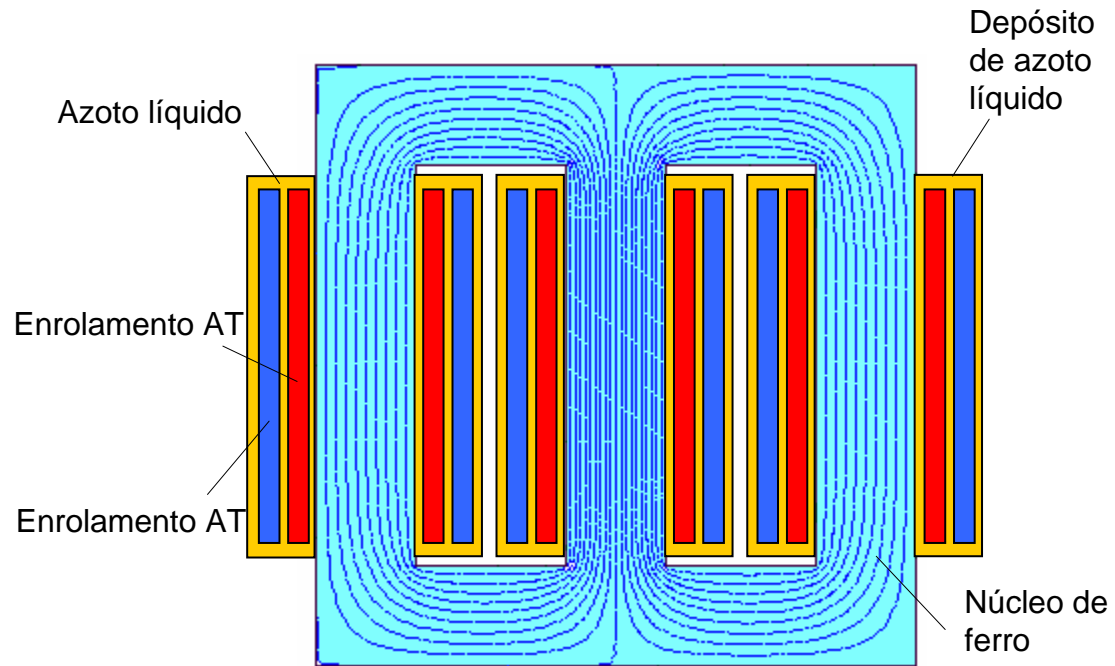


Fita supercondutora em BSCCO

Transformador de potência Supercondutor



Perdas no ferro à temperatura ambiente (298 K) e a azoto líquido (77 K)



Constituição da parte activa de um transformador trifásico supercondutor

Os enrolamentos são construídos de material cerâmico BSCCO (pronuncia-se 'bisko'). arrefecidos a 196 °C , usando azoto líquido é isolante e não inflamável Os isolantes deverão no entanto resistir a esta baixa temperatura. A vantagem do transformador supercondutor é o aumento da sua potência específica e a redução drástica de perdas.

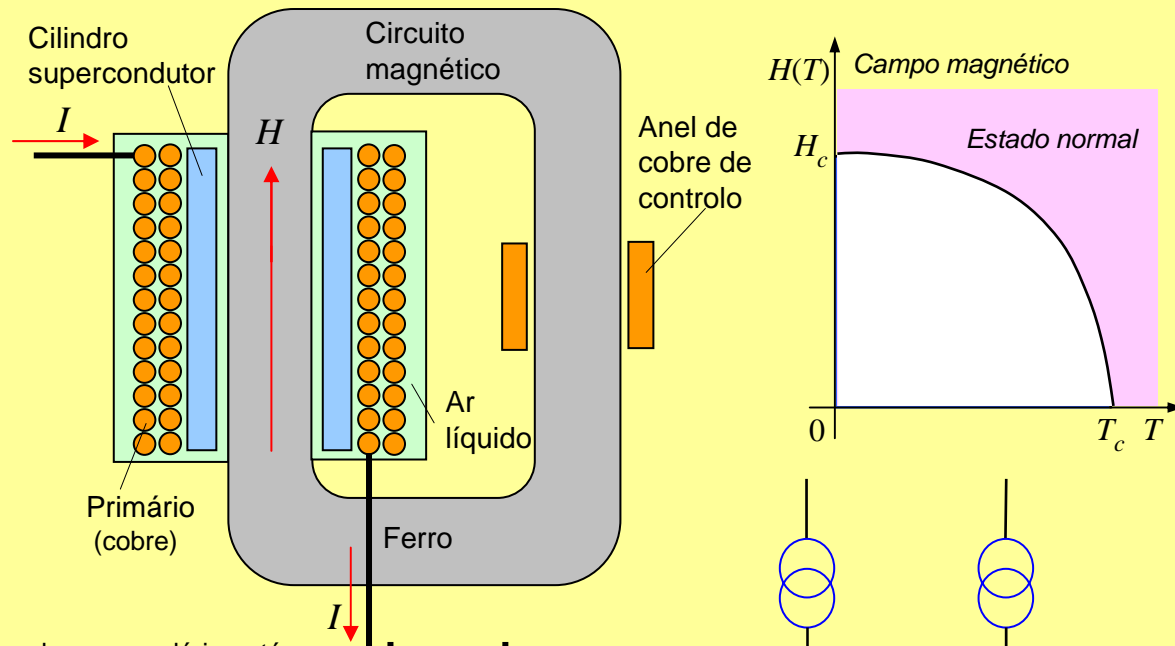


Características

Capacity	500 kVA
Frequency	60 Hz
Voltage (primary/secondary)	6600 V / 3300 V
Current (primary/secondary)	76 A / 152 A
Core	silicon steel plate
height/width	1580 mm / 1110 mm
cross-sectional area	986 cm ²
magnetic induction	1.7 T
Cryostat	GFRP
height	1210 mm
diameter	785 mm / 337 mm
Winding diameter (primary/secondary)	465, 553/509, 597 mm
Winding height	748 mm
Secondary load	500 kVA inductive coil

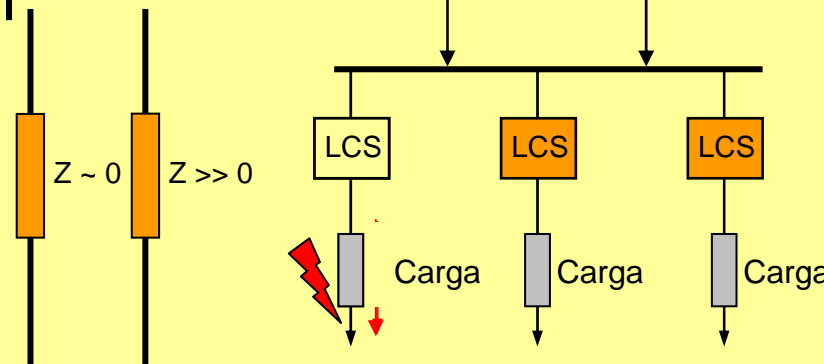
Características de um transformador supercondutor de 500 kVA

• Limitadores de corrente



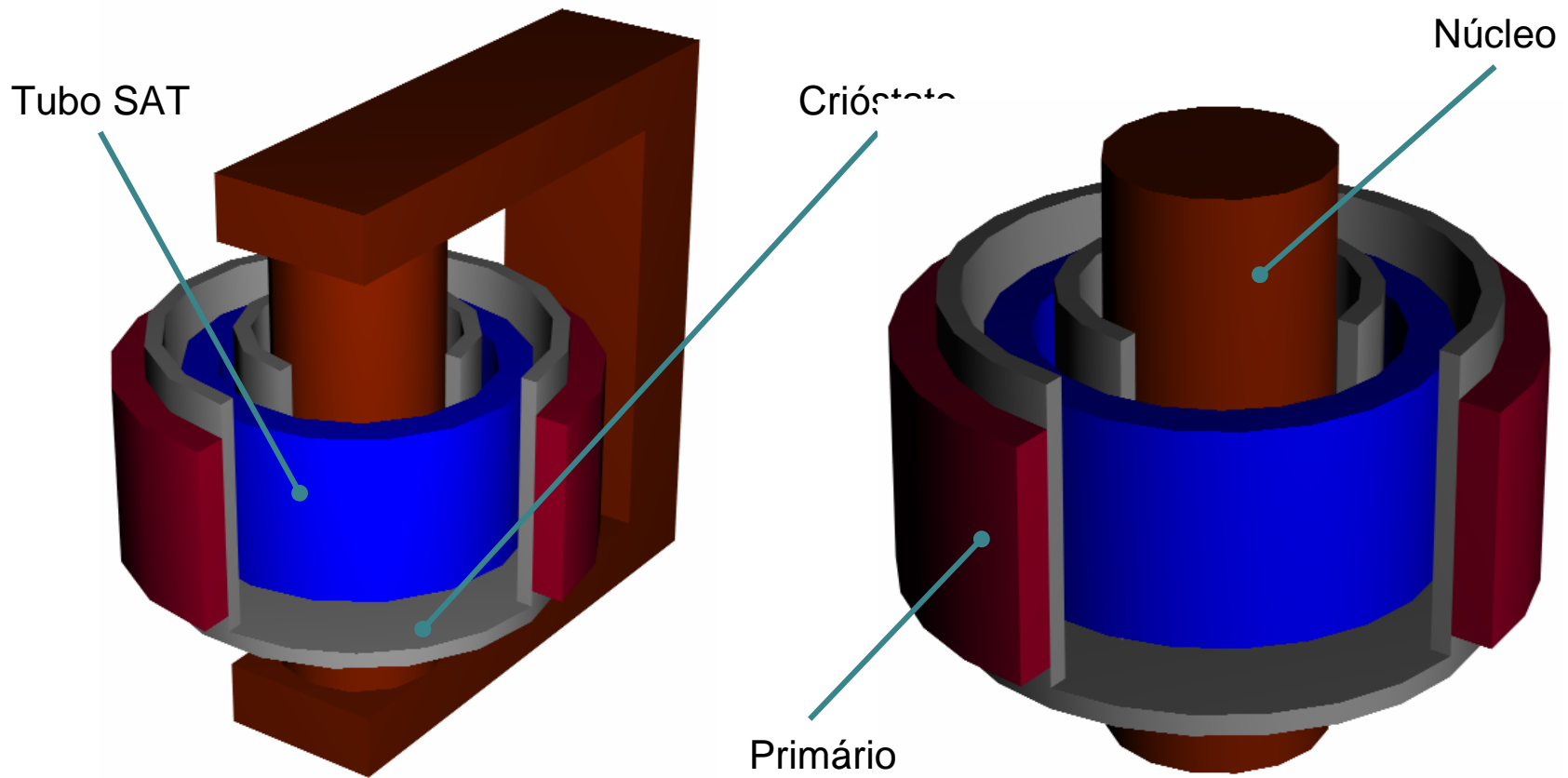
Quando o secundário está no estado supercondutor o transformador está em curto circuito e portanto a impedância vista do primário é nula.

Se a corrente aumentar exageradamente o campo H aumenta e provoca a passagem ao estado normal do secundário, aumentando a impedância e limitando a corrente de curto circuito



Aspecto de um limitador de corrente

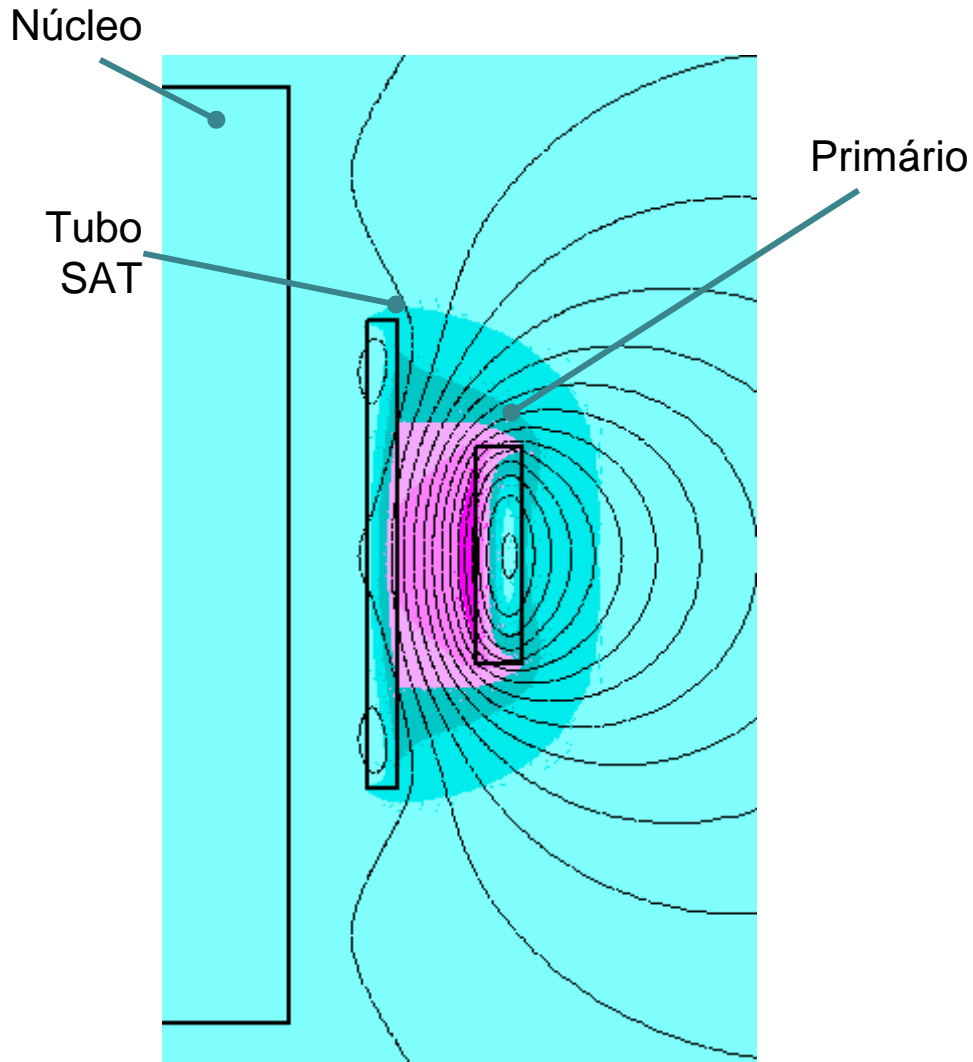
Aspecto físico do limitador de corrente



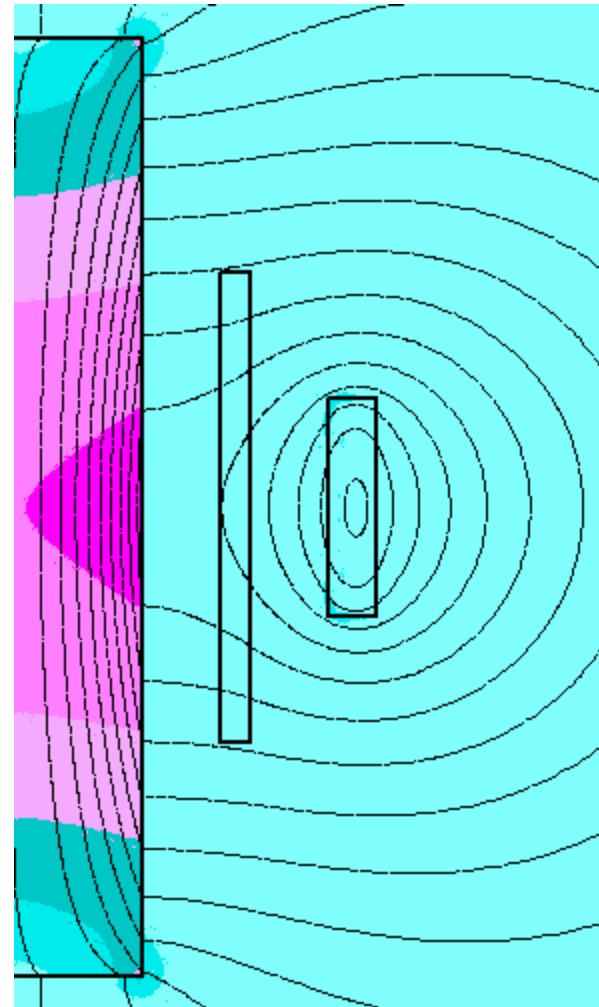
Limitador de núcleo fechado

Limitador de núcleo aberto

Operação normal (baixa impedância)



Falta (alta impedância)



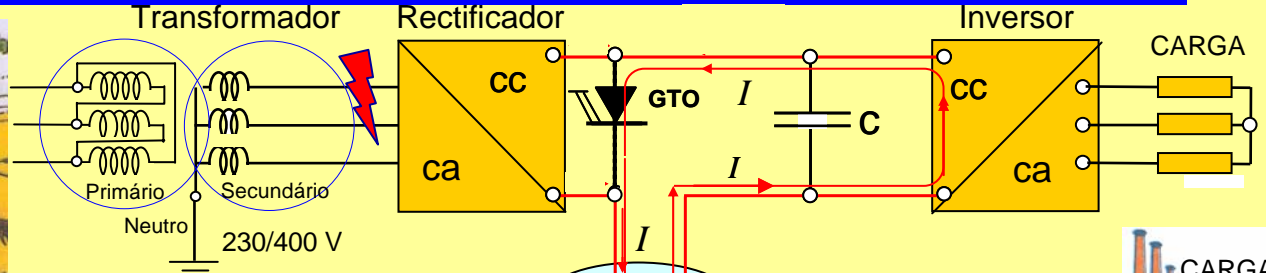


- Projecto ABB (1996) de uma instalação protegida com um limitador

Sistemas para armazenamento de energia (SMES)



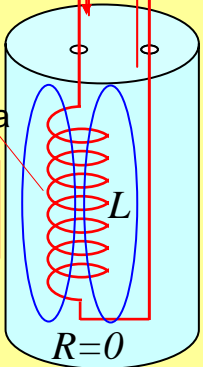
Linha de transmissão de energia



Bobina supercondutora

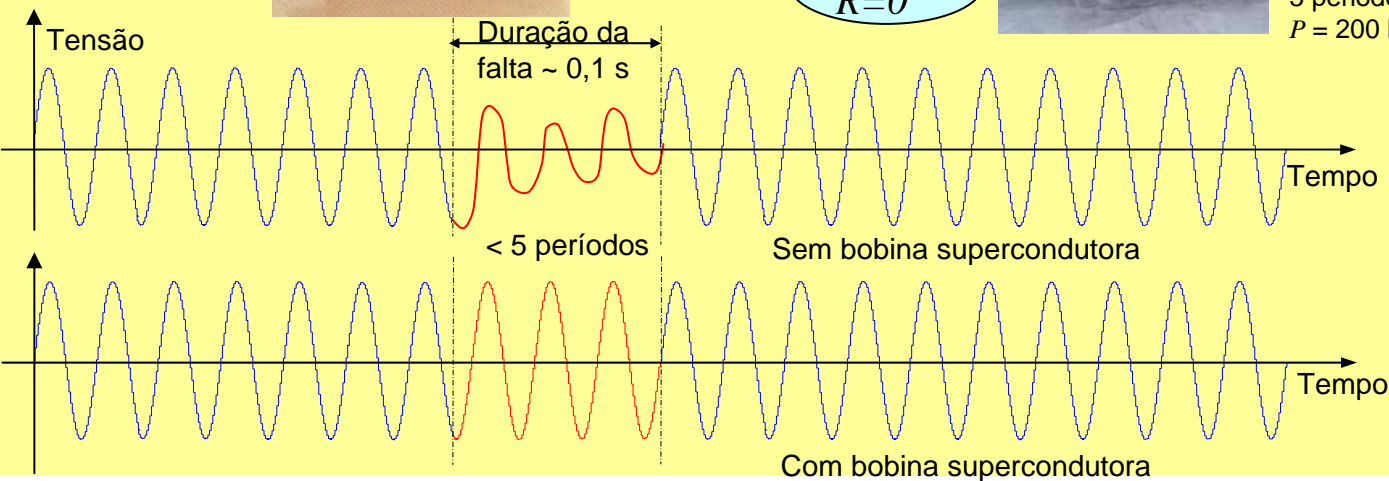
$$W_{mag} = \frac{1}{2} LI^2$$

$$P_{Joule} = 0$$



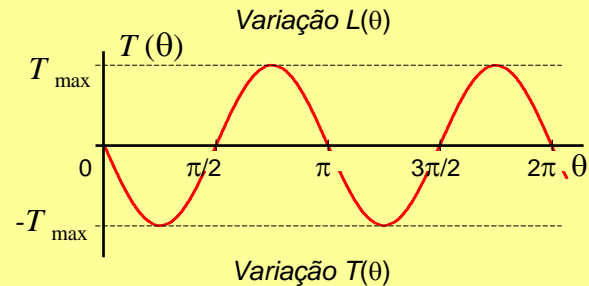
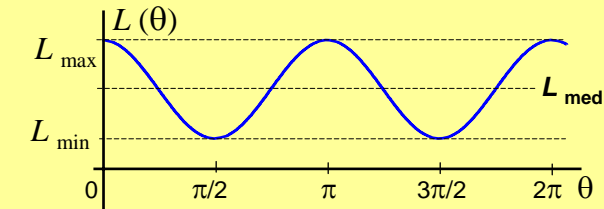
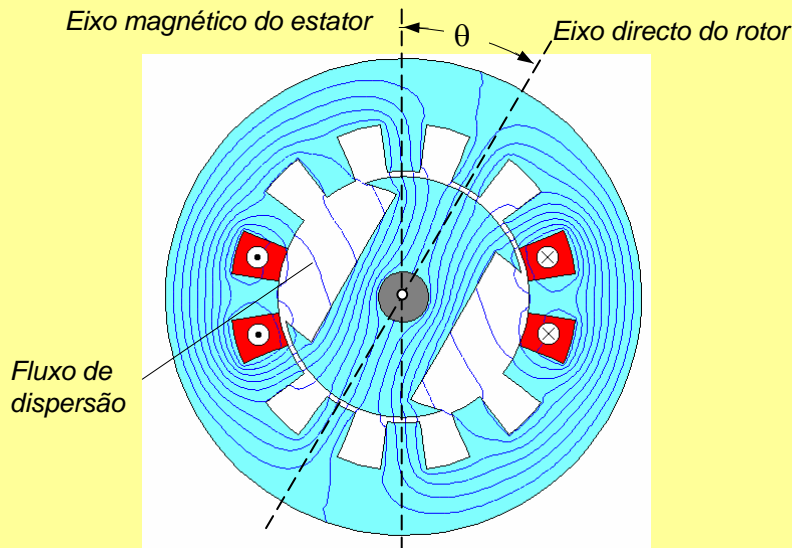
Bobina armazenadora de energia magnética

- $L = 4 \text{ H}$
- $I = 100 \text{ A}$
- $W = (1/2)LI^2 = 20 \text{ kJ}$
- 5 períodos = 0,1 s
- $P = 200 \text{ kW}$



Princípio do binário de relutância

$$L(\theta) = \frac{1}{2}(L_{\max} + L_{\min}) + \frac{1}{2}(L_{\max} - L_{\min}) \cos 2\theta$$



Varição de $L(\theta)$ em função da posição rotórica

Varição de $L(\theta)$ e $T(\theta)$

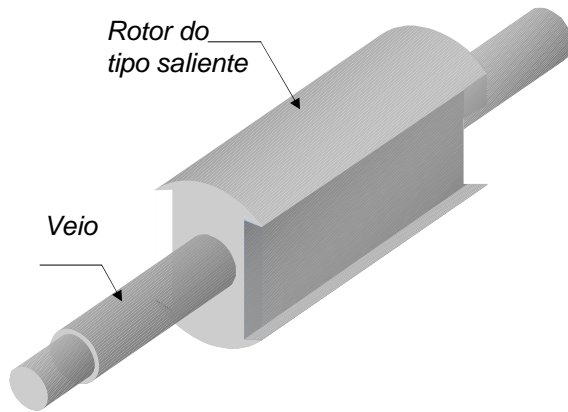
$$T(\theta) = \frac{3}{2} I^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} = -\frac{3}{2} I_{rms}^2 (L_{\max} - L_{\min}) \sin 2\theta$$

$$T(\theta) = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{rms}^2}{\omega^2 L_{\max} L_{\min}} (L_{\max} - L_{\min}) \sin 2\theta$$

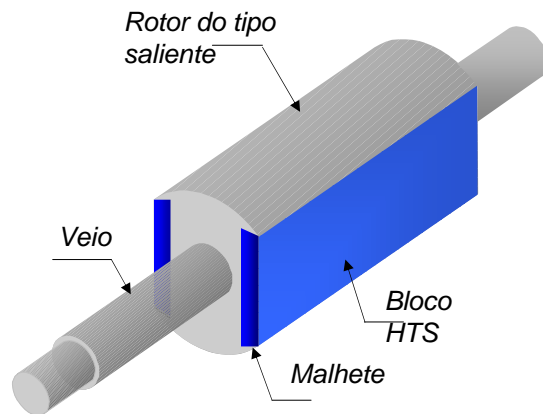
I_{rms} - Constant

U_{rms} - Constant

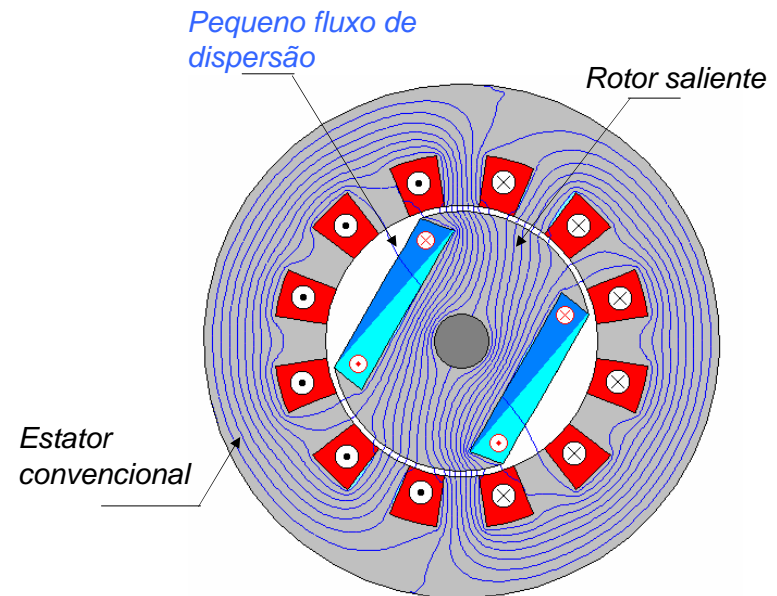
• Motores supercondutores de relutância



Rotor de Relutância Convencional

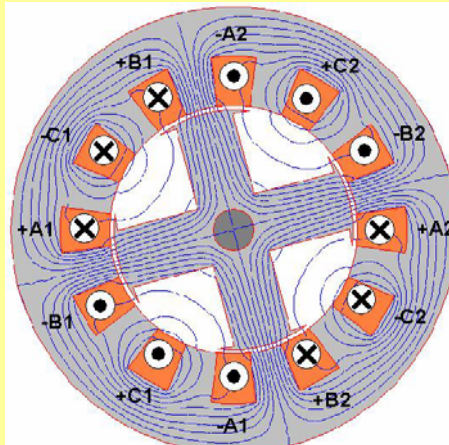


Rotor de Relutância Supercondutor

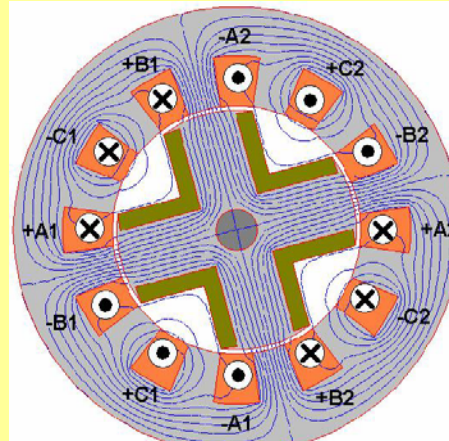


Fluxo no Motor de Relutância Supercondutor

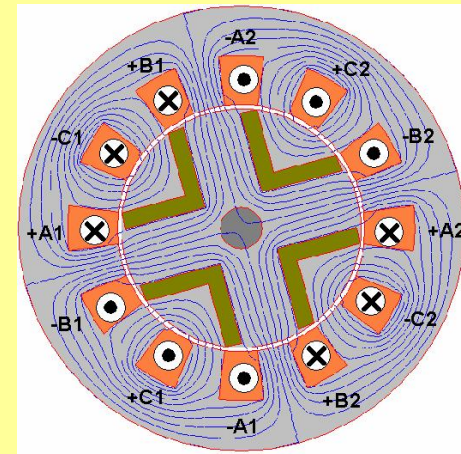
$L_{\max} = 673,9 \text{ mH}$



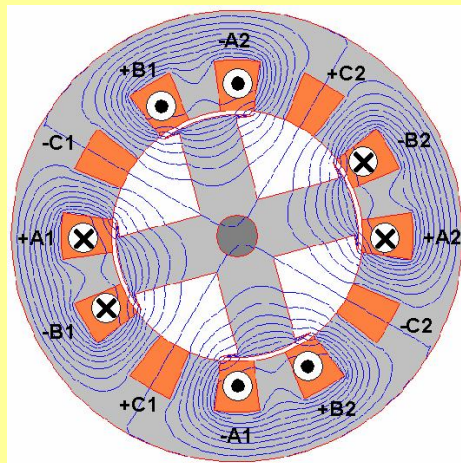
$L_{\max} = 655,2 \text{ mH}$



$L_{\max} = 708,9 \text{ mH}$

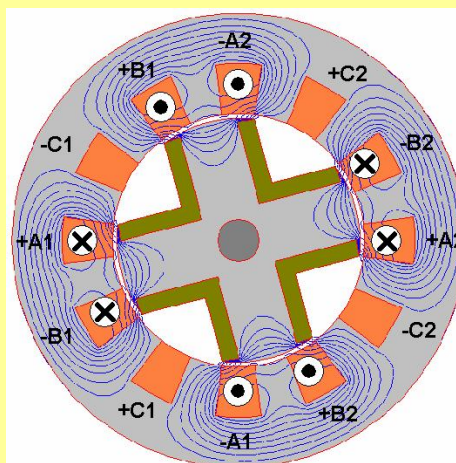


$L_{\max} - L_{\min} = 331,5 \text{ mH}$



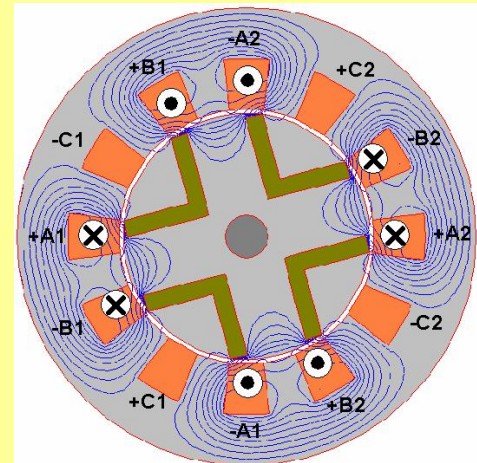
$L_{\min} = 342,4 \text{ mH}$

$L_{\max} - L_{\min} = 432,2 \text{ mH}$



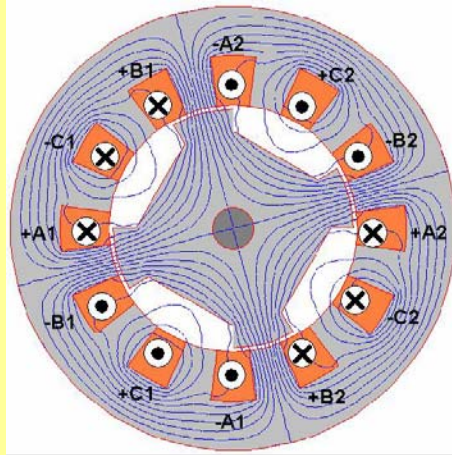
$L_{\min} = 223,0 \text{ mH}$

$L_{\max} - L_{\min} = 481,6 \text{ mH}$

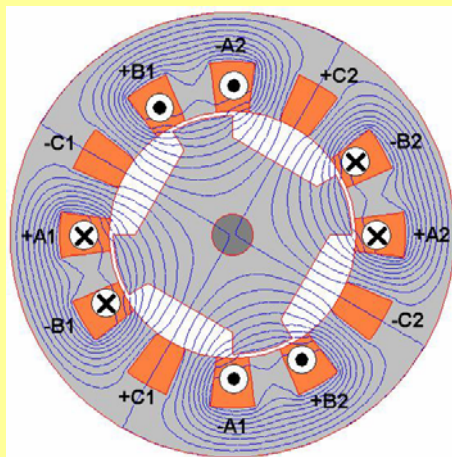


$L_{\min} = 227,3 \text{ mH}$

$L_{max} = 721,4 \text{ mH}$

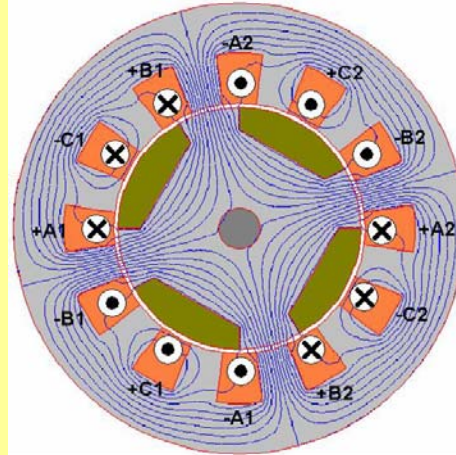


$L_{max} - L_{min} = 386,1 \text{ mH}$

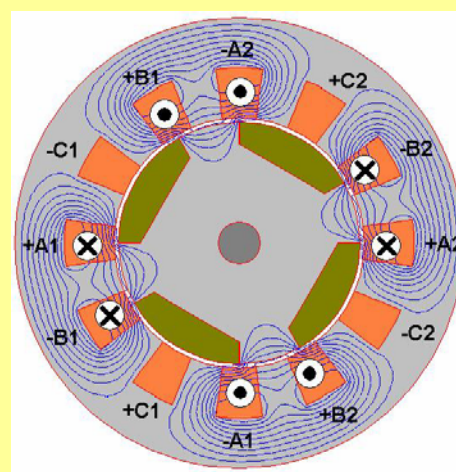


$L_{min} = 335,4 \text{ mH}$

$L_{max} = 669,3 \text{ mH}$

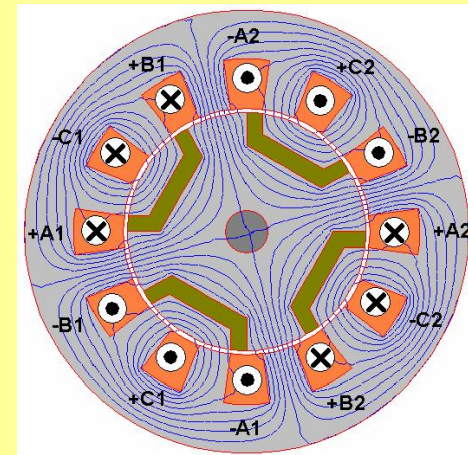


$L_{max} - L_{min} = 550,4 \text{ mH}$

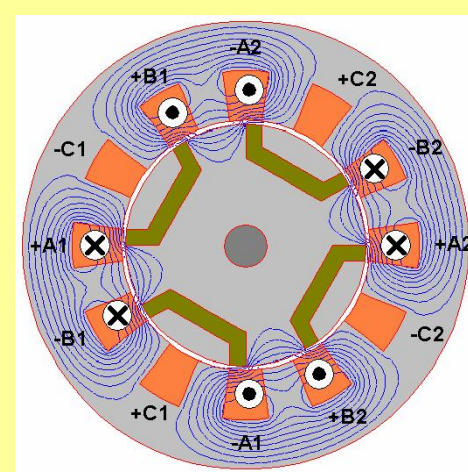


$L_{min} = 149,0 \text{ mH}$

$L_{max} = 665,8 \text{ mH}$

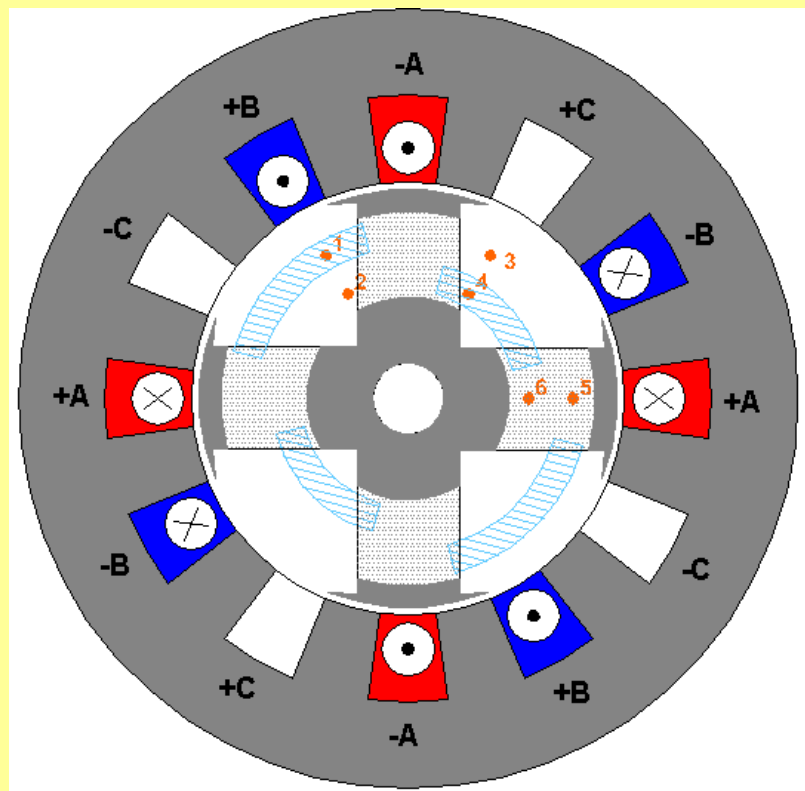


$L_{max} - L_{min} = 615,8 \text{ mH}$

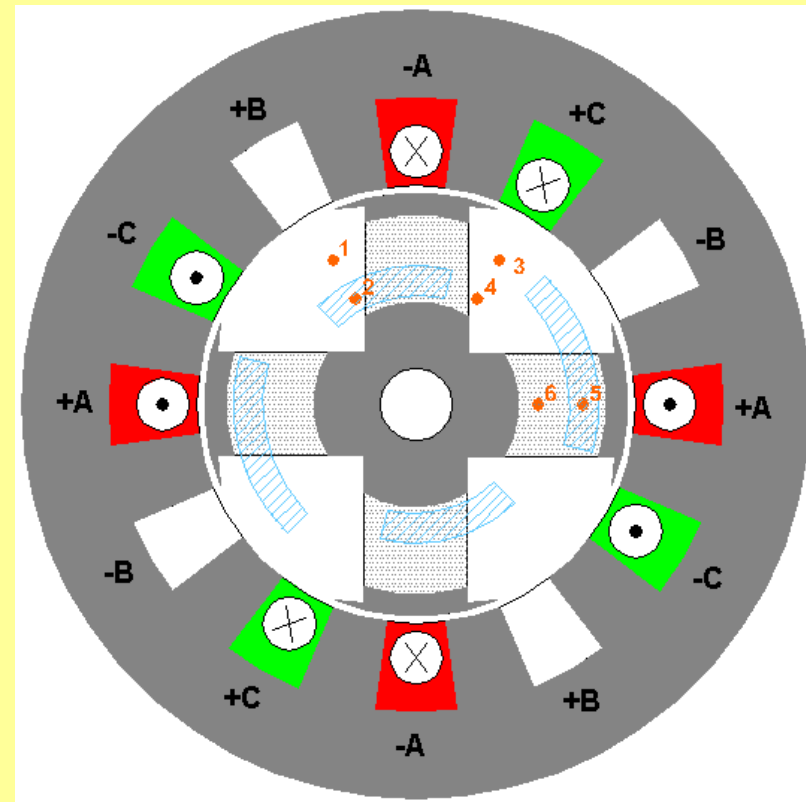


$L_{min} = 50,0 \text{ mH}$

• Motor de relutância auto pilotado

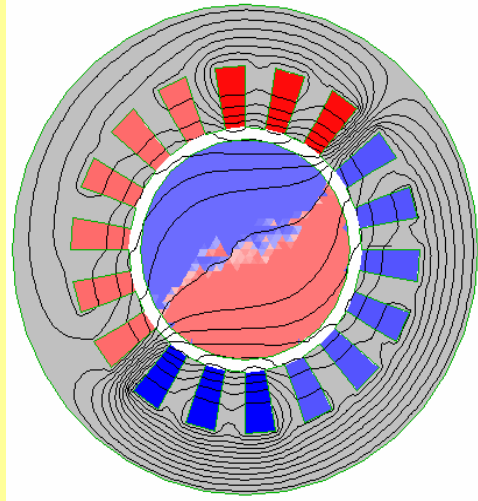


Sentido horário

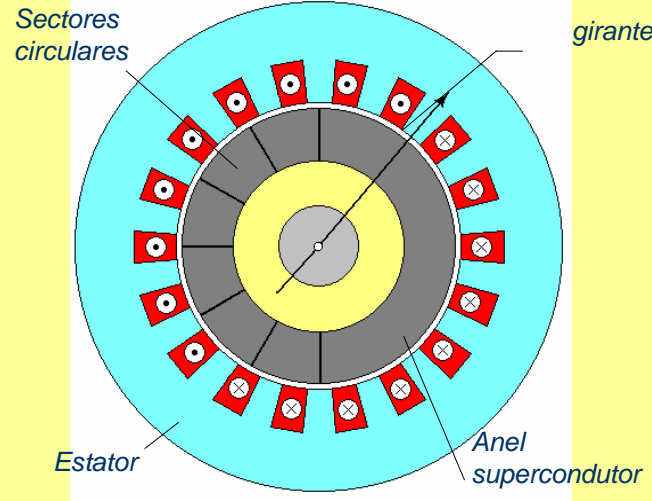


Sentido anti-horário

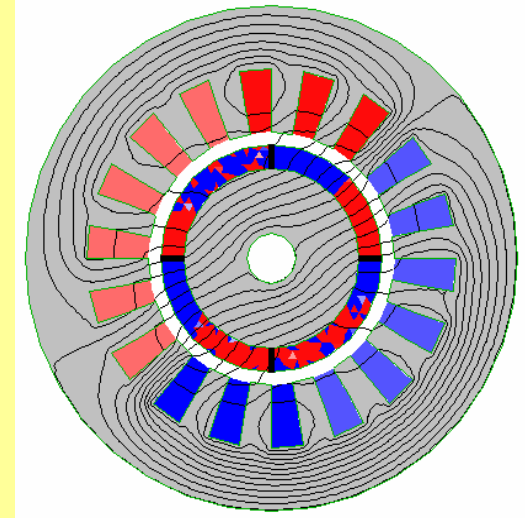
. Motores eléctricos de histerese



Geração do Binário de Histerese



Topologia do Motor de Histerese



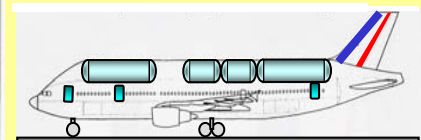
Motor de Histerese com 4 sectores



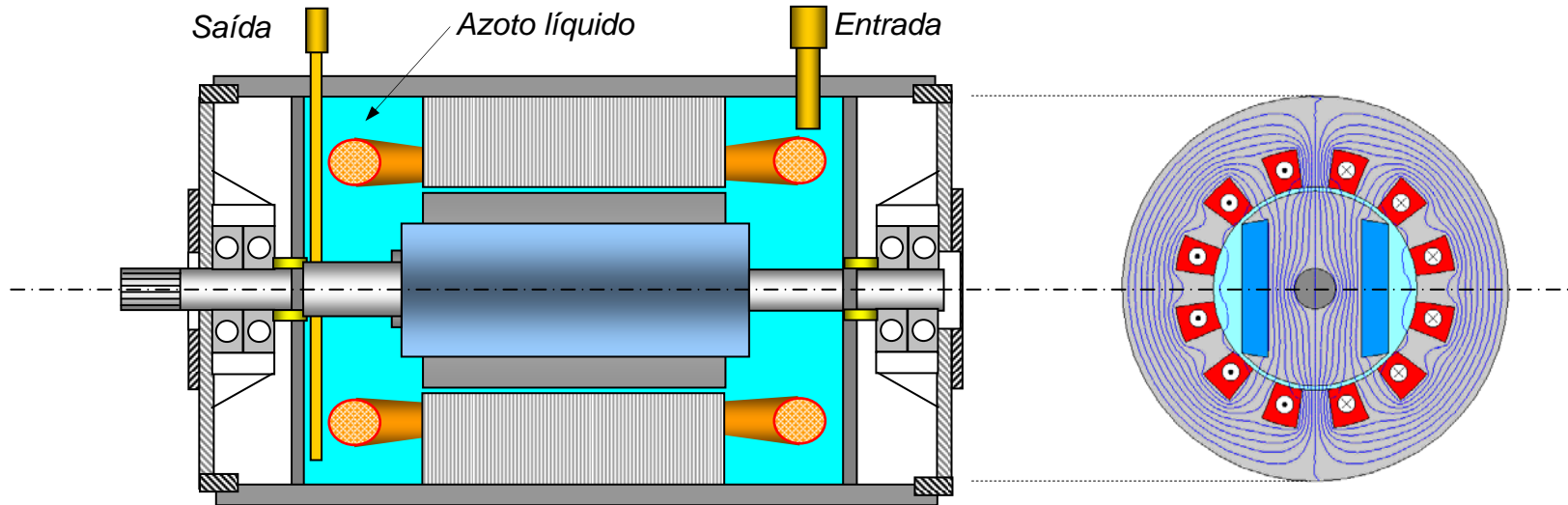
Aspecto do Rotor do Motor de Histerese



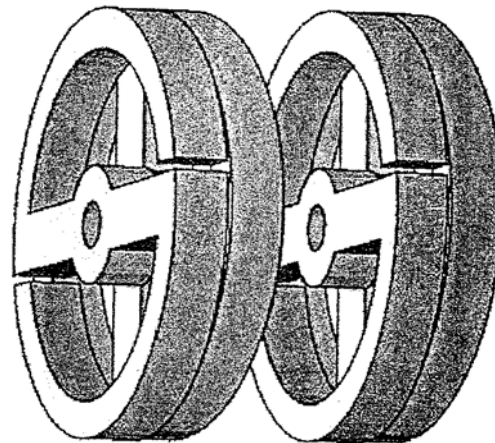
Bomba para trasfegar hidrogénio (motor de histerese)



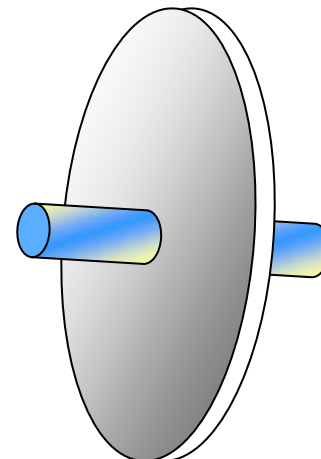
Avião criogénico (Tupolev)



Máquina síncrona com o rotor pré magnetizado (trapped flux)

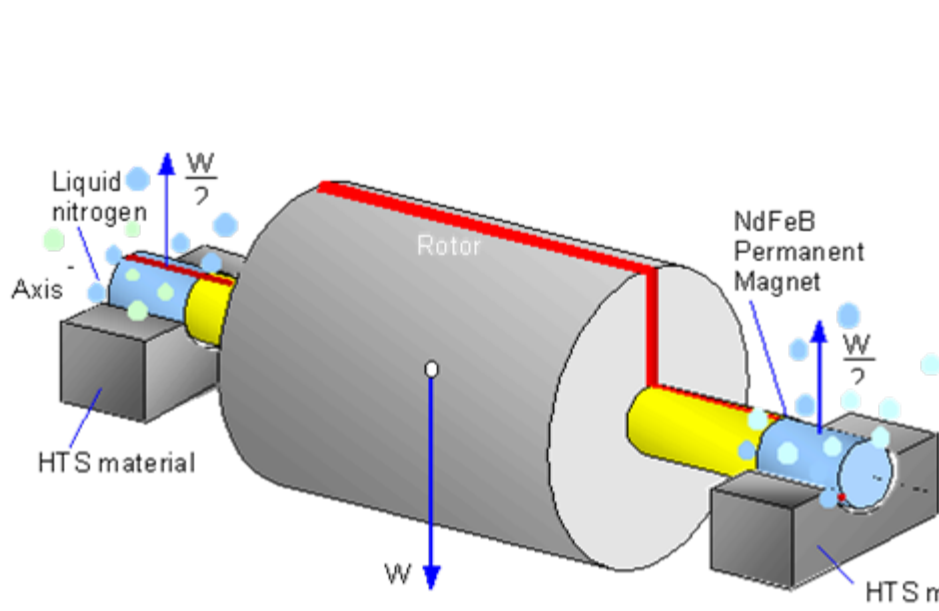


Estator bifásico e bipolar supercondutor

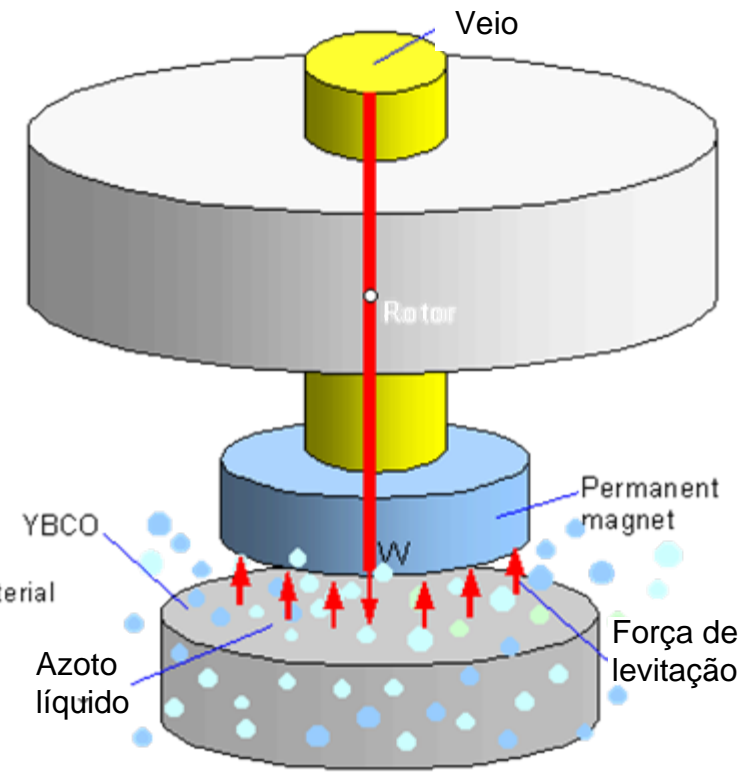


Rotor em disco supercondutor

Chumaceiras para máquinas rotativas

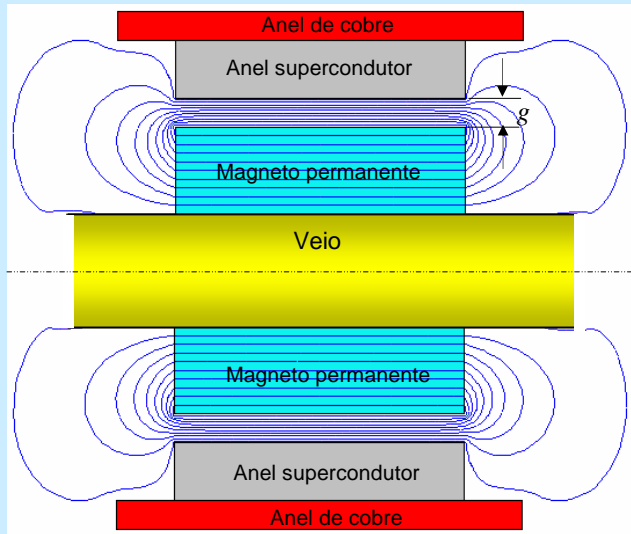


a) Chumaceira horizontal



b) Chumaceira vertical ou de impulso

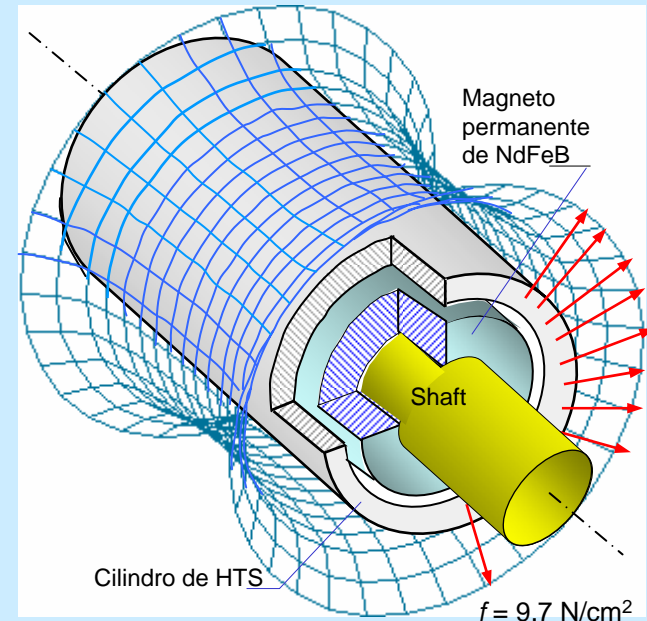
• Chumaceira horizontal



Corte da chumaceira horizontal



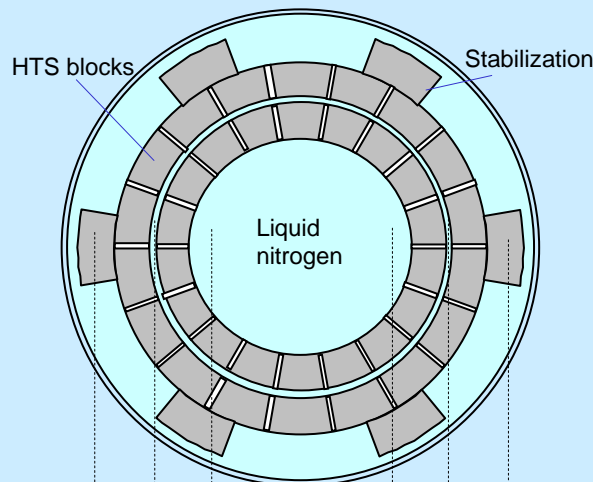
Chumaceira magnética comercial



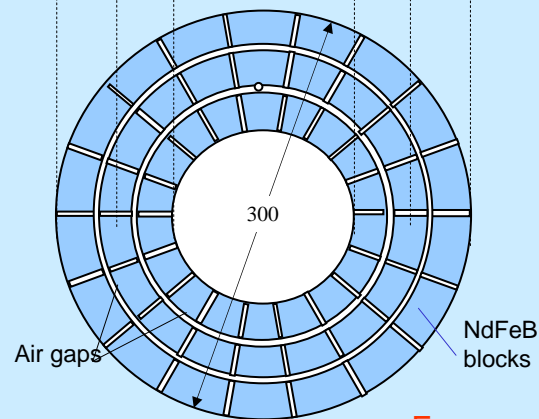
Distribuição da densidade de força ao longo da chumaceira horizontal

$$\frac{F}{A} \approx \frac{3}{4} \left(\frac{B_s^2}{2\mu_o} \right) \left(\frac{D}{r} \right)$$

• Chumaceira vertical ou de impulso

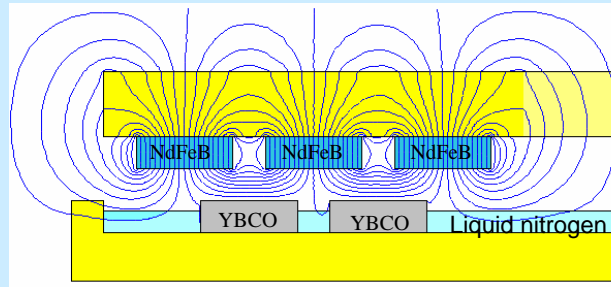


a) Lower part (HTS)



b) Upper part (PM)

Esquema da chumaceira vertical



Fluxo na chumaceira vertical



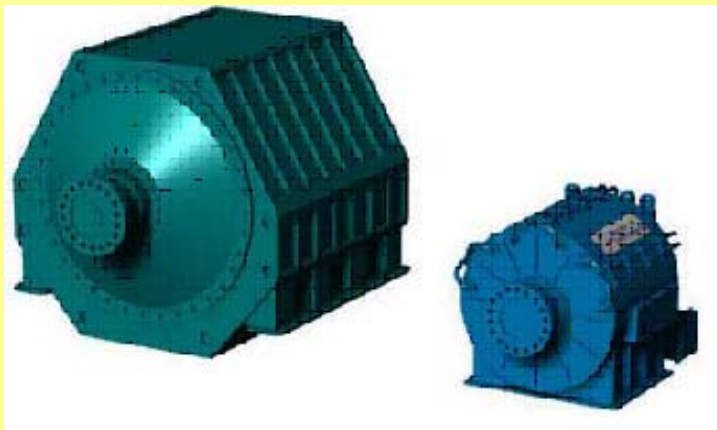
Chumaceira vertical comercial



Levitador

- O aspecto mais importante no emprego de materiais supercondutores em máquinas eléctricas é:
 - Redução das suas dimensões;
 - Redução do peso;
 - Aumento da sua eficiência.
- Os motores que empreguem supercondutores podem ter apenas 30% do tamanho de um motor convencional com a mesma potência.

Potência/volume = 1



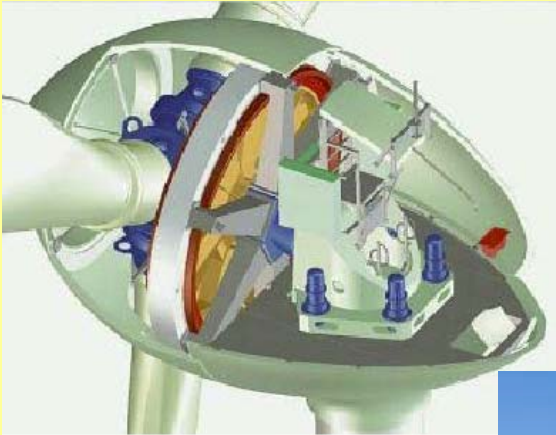
a) Máquina clássica

b) Máquina supercondutora

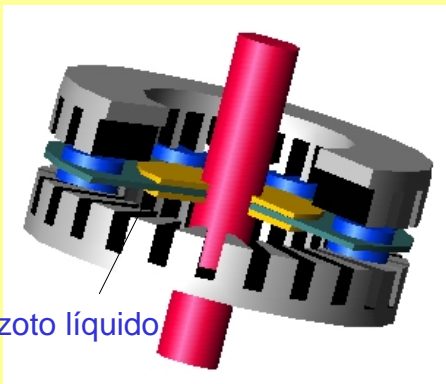
É estimado que os motores supercondutores estejam no mercado em 2010

Potência/volume = 0.5 to 0.3

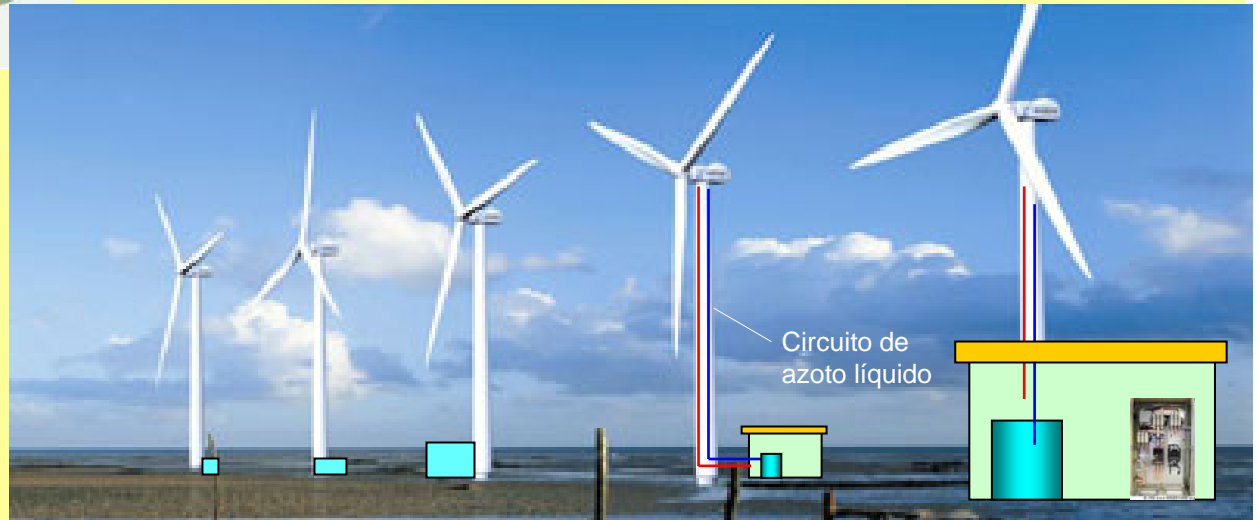
Parques eólicos



Gerador síncrono supercondutor em disco

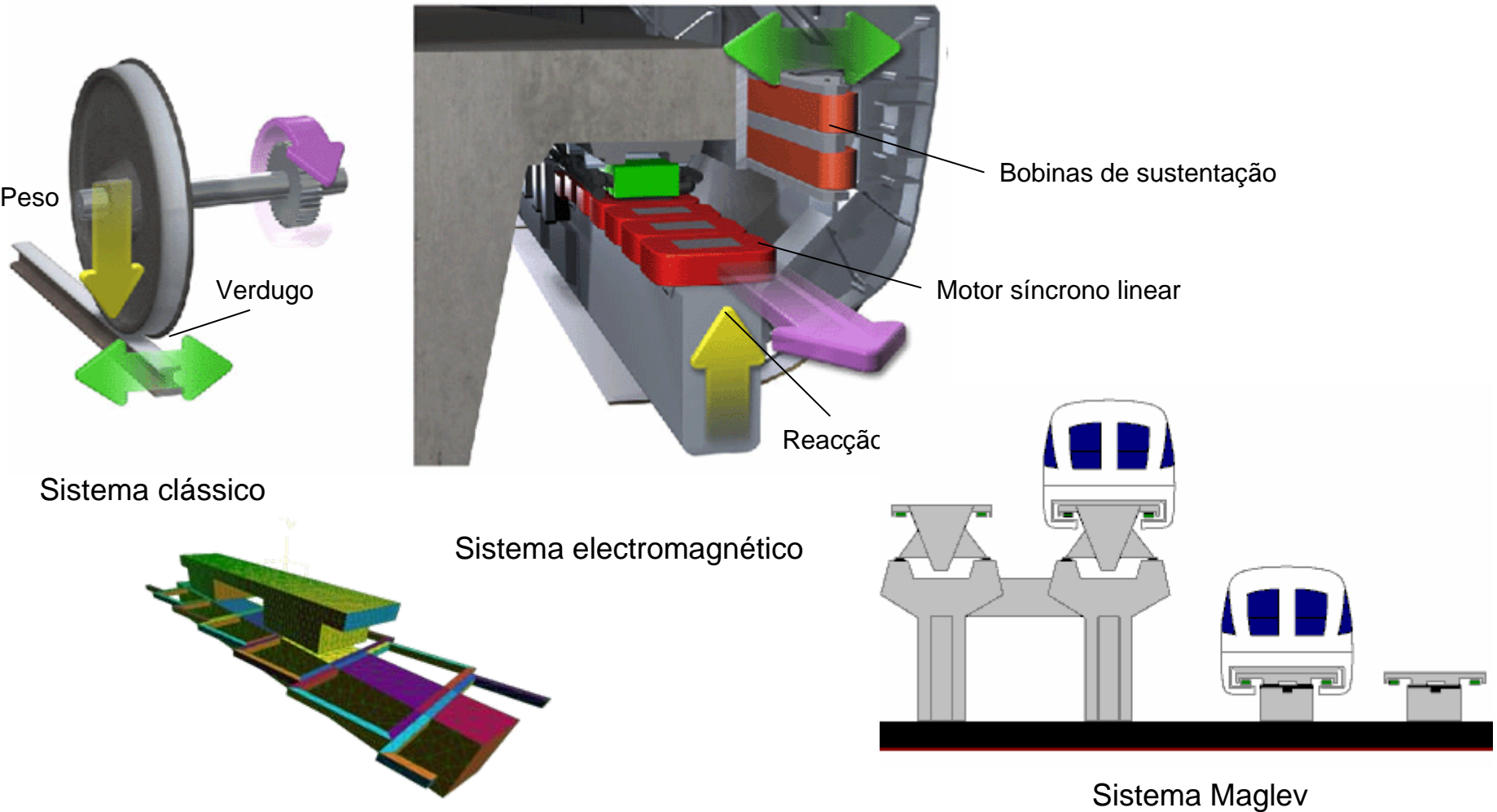


Azoto líquido

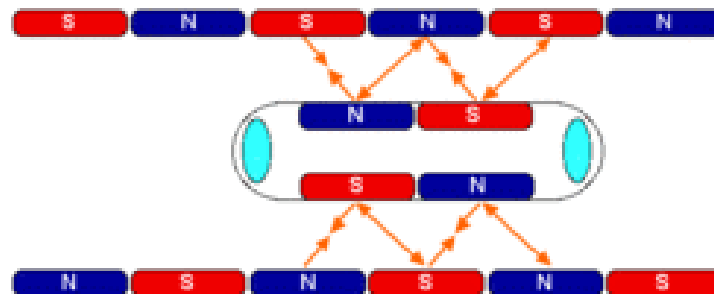
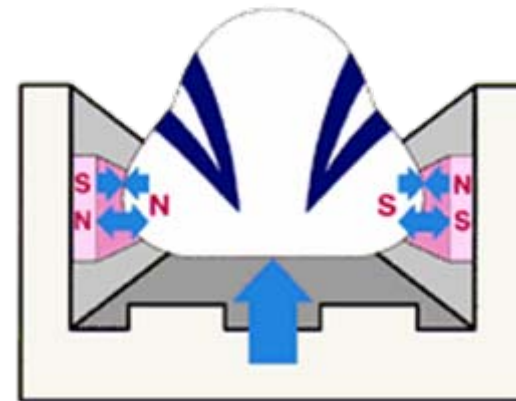
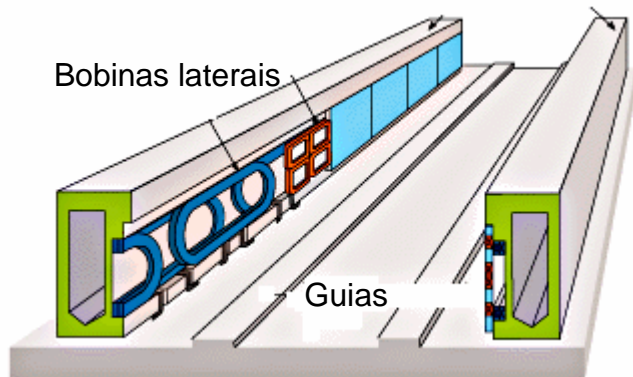


Parque eólico com geradores síncronos supercondutores

Levitação magnética em transportes (Maglev)



Levitação magnética em transportes (Maglev)



- 10 mm do solo
- 600 passageiros
- 443 km/h (TGV
257 km/h)
- 30 km – 7 min

□ Maglev - Exemplos



Maglev americano



Protótipo do Maglev germano chinês

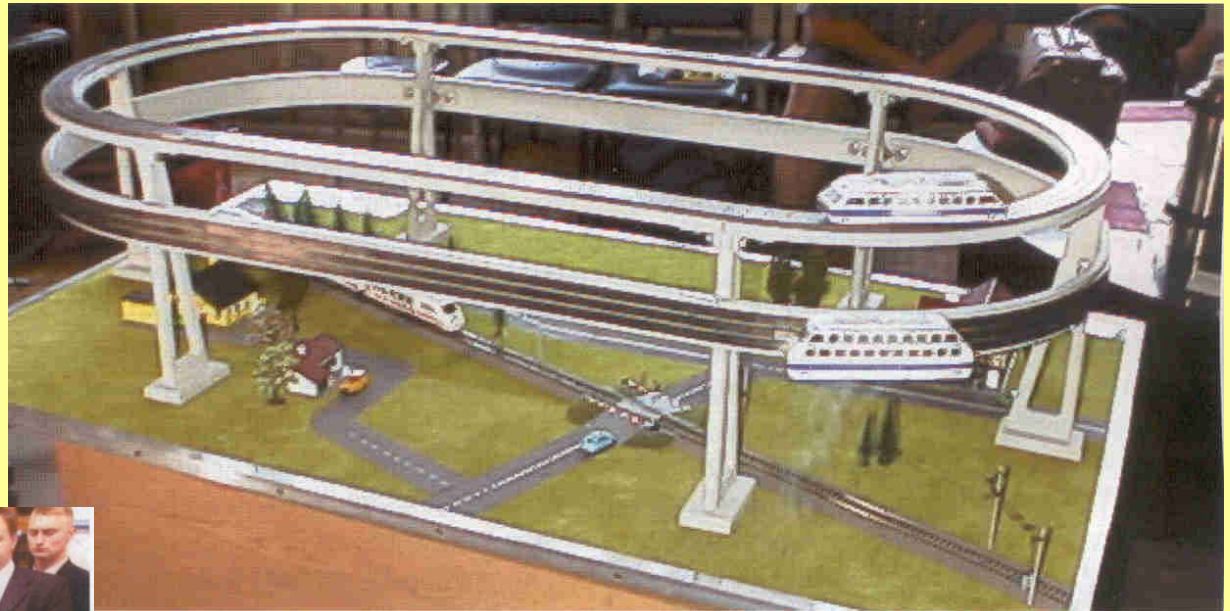
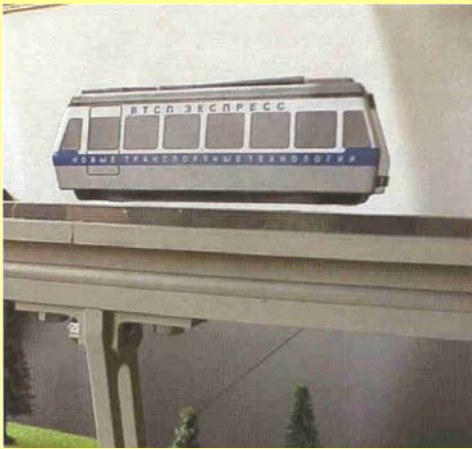


Maglev Chinês



Estação do Maglev Chinês

Maglev



Projecto NATO SfS do Maglev Russo



Obrigado pela atenção



Clique em cima da foto e aguarde para visualizar o filme