



Eletrobras
Cepel



Supercondutividade Aplicações no Setor Elétrico

Alexander Polasek

Laboratório de Supercondutividade

DTE - Departamento de Tecnologias Especiais

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Sistema ELETROBRÁS

- > 50% da energia gerada no Brasil
- ~ 70 % das linhas de transmissão
- empresas de distribuição

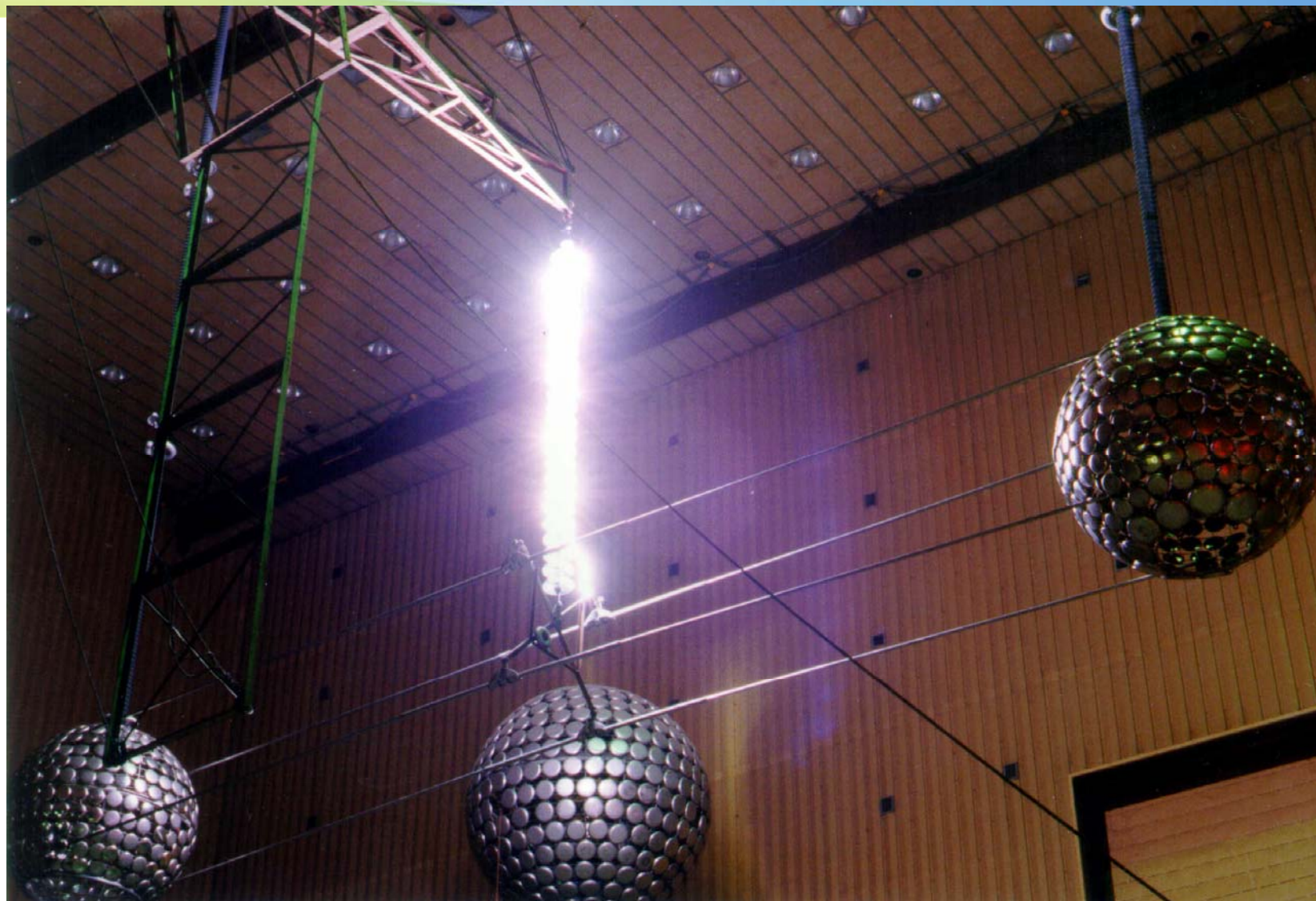


CEPEL



- Maior centro de pesquisas de energia elétrica da América Latina
- Fundado em 1974
- ~ 410 pesquisadores e técnicos
- 30 laboratórios

Laboratórios de Alta Tensão e Alta Potência: Maiores do Hemisfério Sul e América Latina

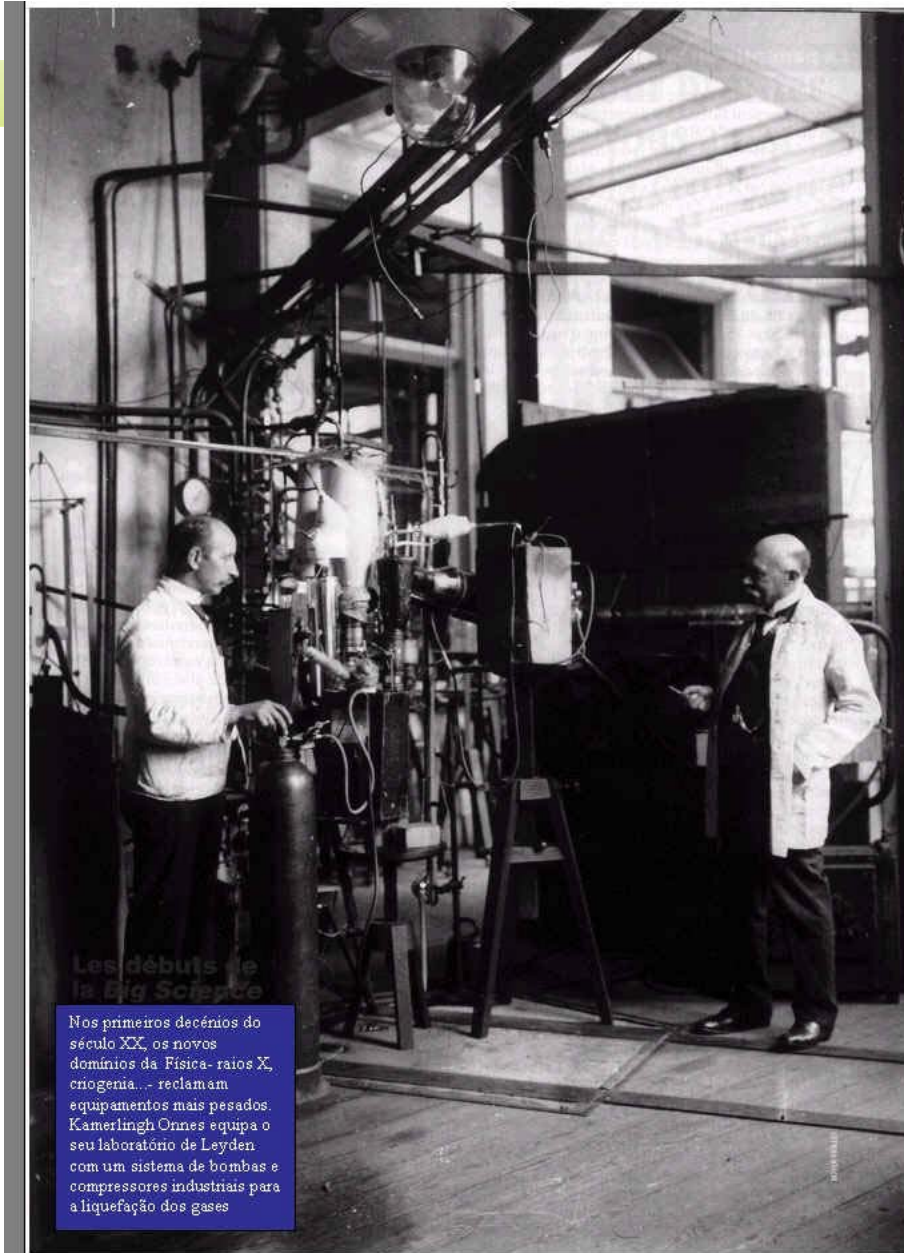


Laboratório de Supercondutividade



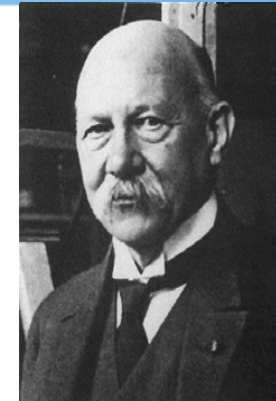
- **O Fenômeno da Supercondutividade**
- **Materiais Supercondutores**
- **Aplicações no Setor Elétrico**

2011 - Centenário da Supercondutividade



Les débuts de
la Big Science

Nos primeiros decênios do século XX, os novos domínios da Física - raios X, criogenia... - reclamam equipamentos mais pesados. Kamerlingh Onnes equipa o seu laboratório de Leyden com um sistema de bombas e compressores industriais para a liquefação dos gases



Heike Kamerlingh-Onnes

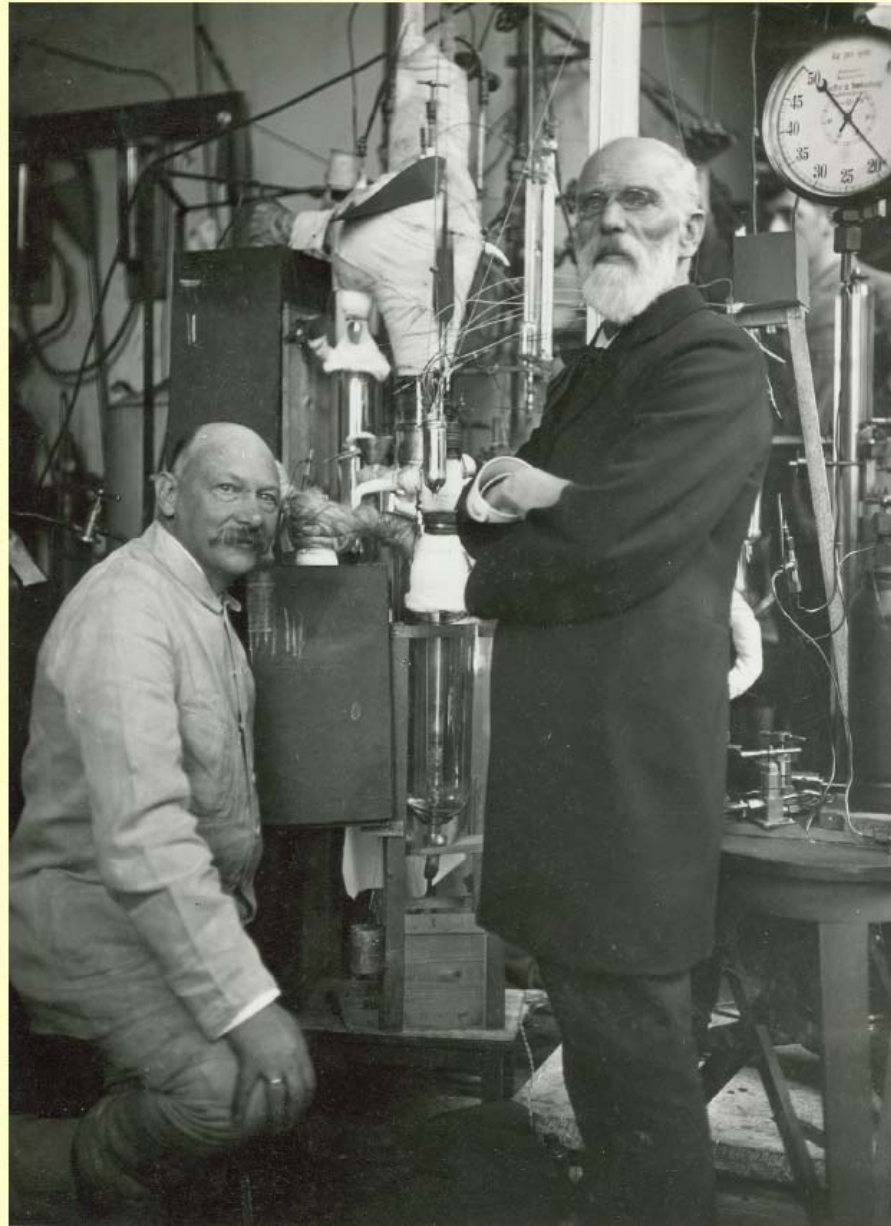
Leiden - Holanda:

1908 – Liquefação do Hélio

1911 – Supercondutividade

1913 – Nobel de Física !

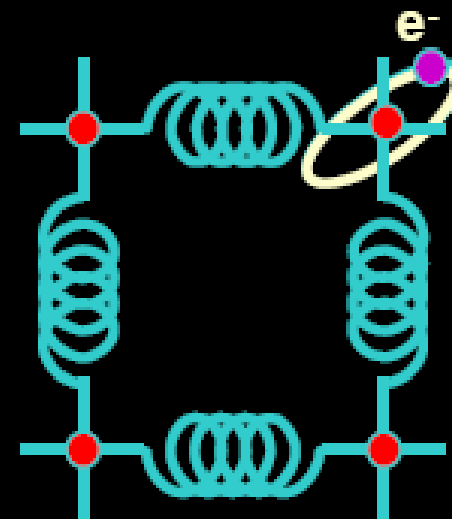
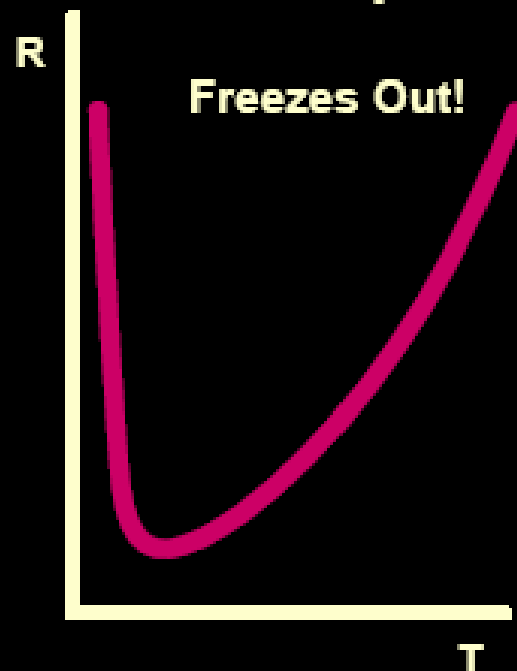
2011 - Centenário da Supercondutividade



Heike Kamerlingh Onnes and Johannes Diderik van der Waals (1913)

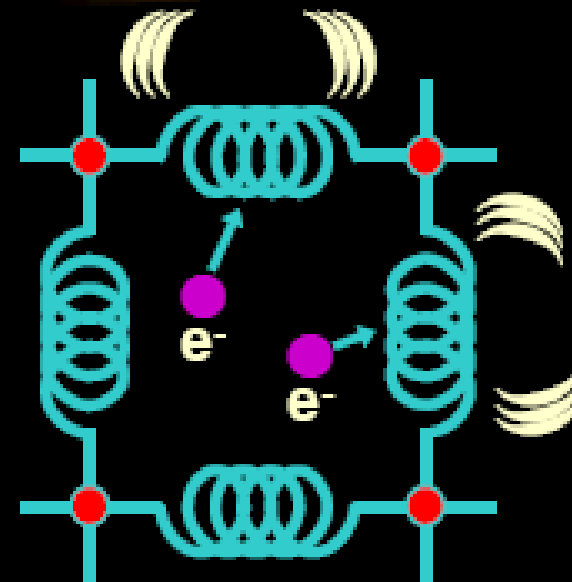
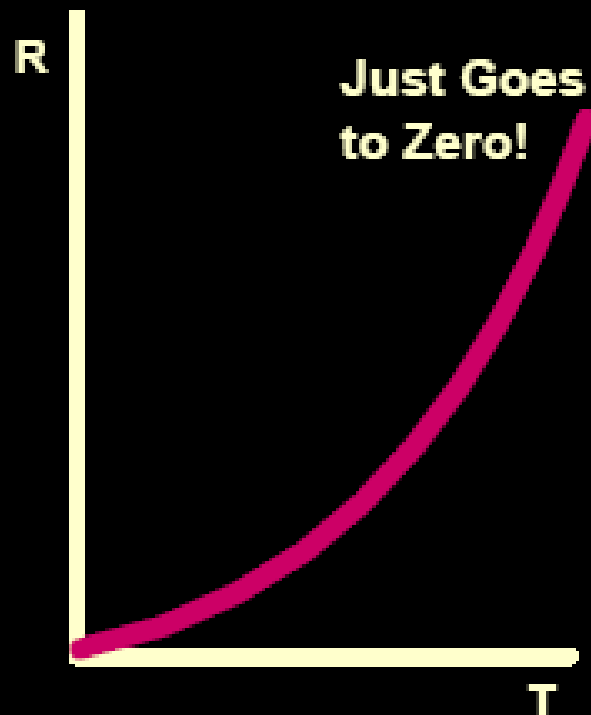
Models of Electrical Conductivity

The Most Popular:

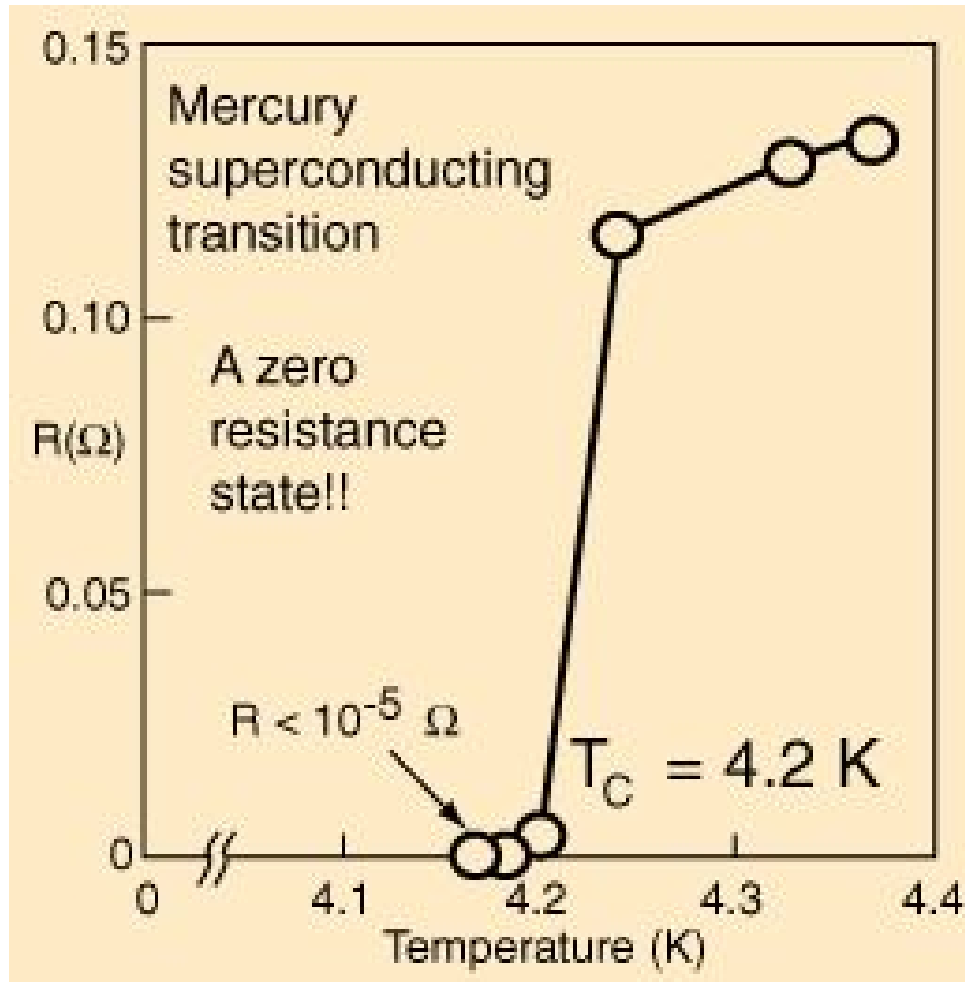


Models of Electrical Conductivity

The First Idea:



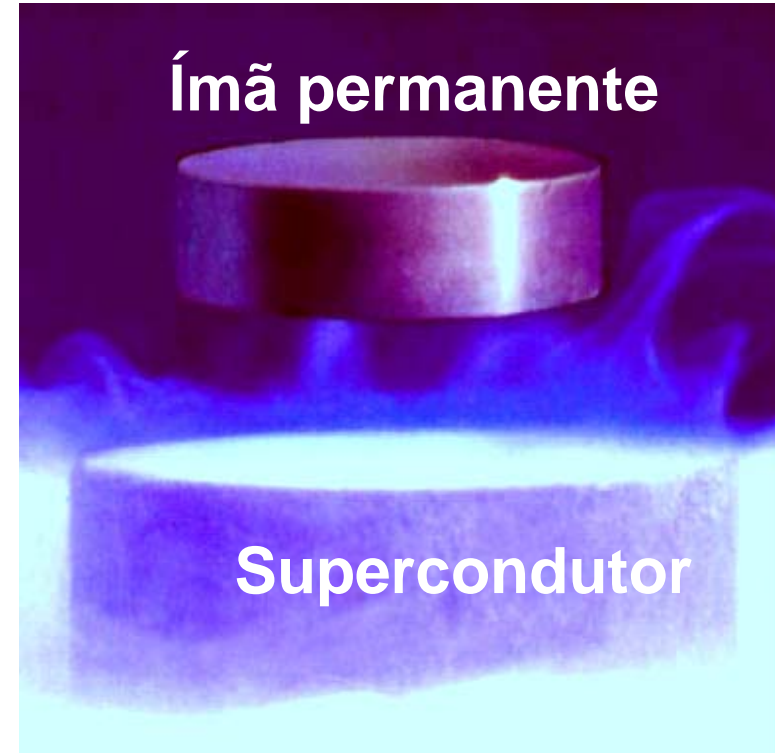
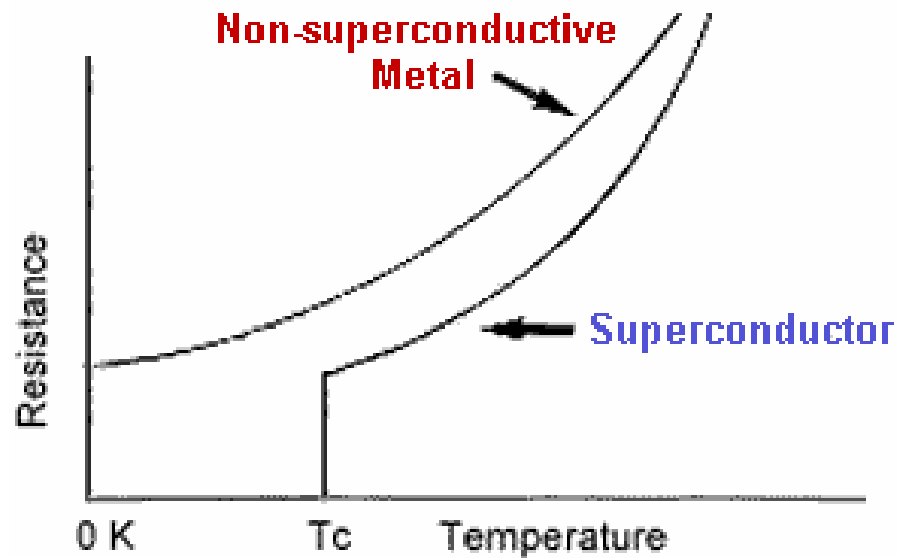
Supercondutividade



... thus the mercury at 4.2 K has entered a new state, which, owing to its particular electrical properties, can be called the state of *superconductivity*...

Heike Kamerlingh-Onnes
Holanda - 1911

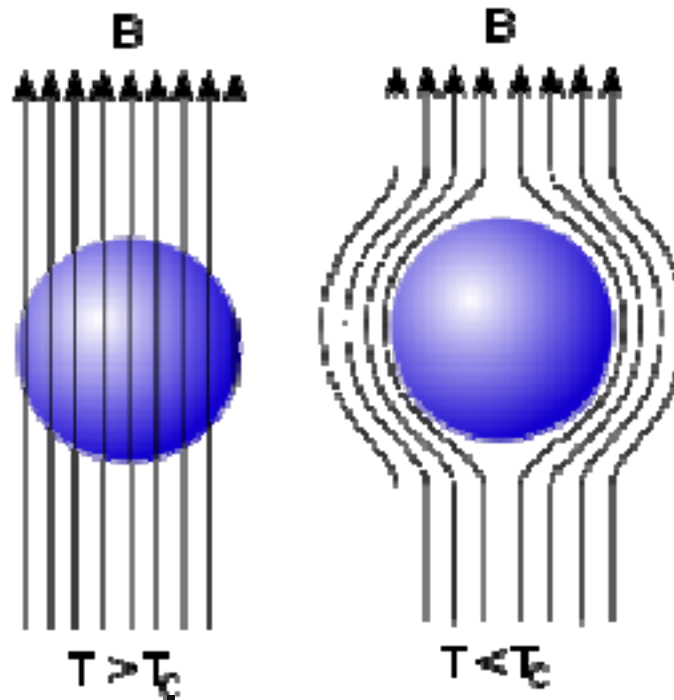
O Fenômeno da Supercondutividade



Resistência elétrica nula
(corrente contínua)

Repulsão de campos
magnéticos
(diamagnetismo perfeito)

Efeito Meissner



1933 – Meissner e Ochsenfeld

O Fenômeno da Supercondutividade



O Fenômeno da Supercondutividade

Afinal, o que são os supercondutores?

São materiais que apresentam:

- **Resistência elétrica nula**
- **Efeito Meissner – repulsão de campos magnéticos ($B = 0$)**

Supercondutor NÃO É Condutor Ideal ($R = 0$)

O Fenômeno da Supercondutividade

- 1911 – descoberta da supercondutividade
- 1930 em diante – ligas e compostos supercondutores
- 1933 – Efeito Meissner
- 1935 – Teoria de London
- 1950 – Teoria de Ginzburg-Landau
- 1953 – Abrikosov – rede de vórtices supercondutores (Tipo II)
- 1957 - Teoria BCS:
 - Pares de Cooper

<http://www.superconductors.org/oxtheory.htm>

Fenômeno Quântico Macroscópico

- 1961 – Primeiros Magnetos Supercondutores
- 1962 – efeito Josephson
- 1986 – Supercondutividade de Alta Temperatura Crítica

Prêmios Nobel em Supercondutividade



- **1913**
 - **Kammerling-Onnes**
Investigations on the properties of matter at low temperatures . . .
- **1972**
 - **Bardeen, Cooper and Schrieffer**
Theory of superconductivity (BCS theory)
- **1973**
 - **Josephson**
"theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier"
- **1987**
 - **Bednorz and Müller**
Discovery of HTS
- **2003**
 - **Abrikosov, Legget and Ginzburg**
Pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids

Teoria BCS - Pares de Cooper

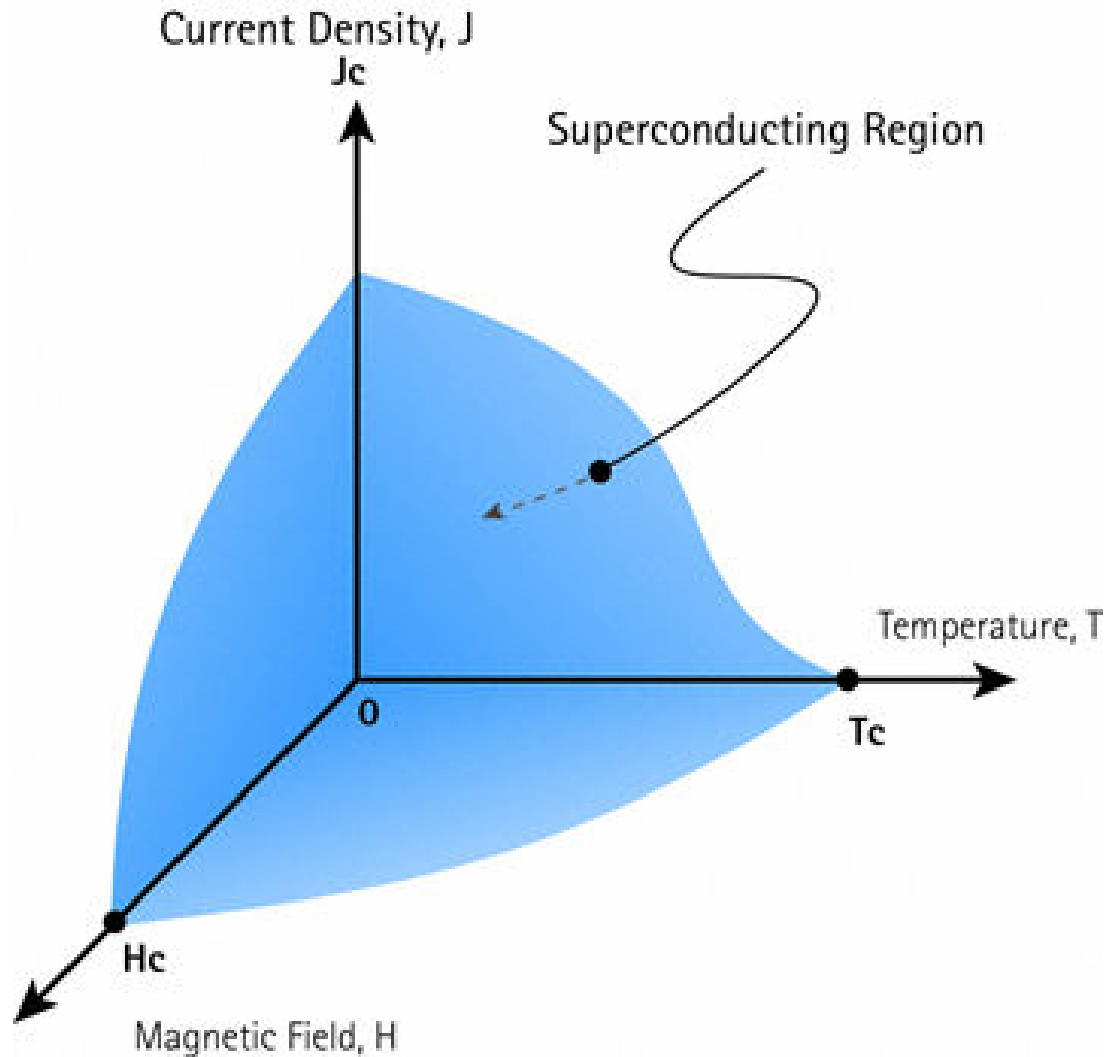


Lattice of superconducting material



Lattice of superconducting material

Quando o Material Torna-se Supercondutor?



Se:

- $J \geq J_c$
- $B \geq B_c$
- $T \geq T_c$

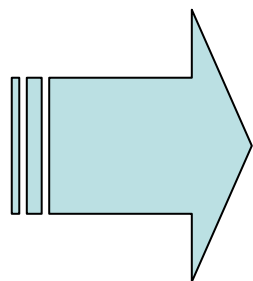
Transição do estado supercondutor para o estado normal

Supercondutores do Tipo I

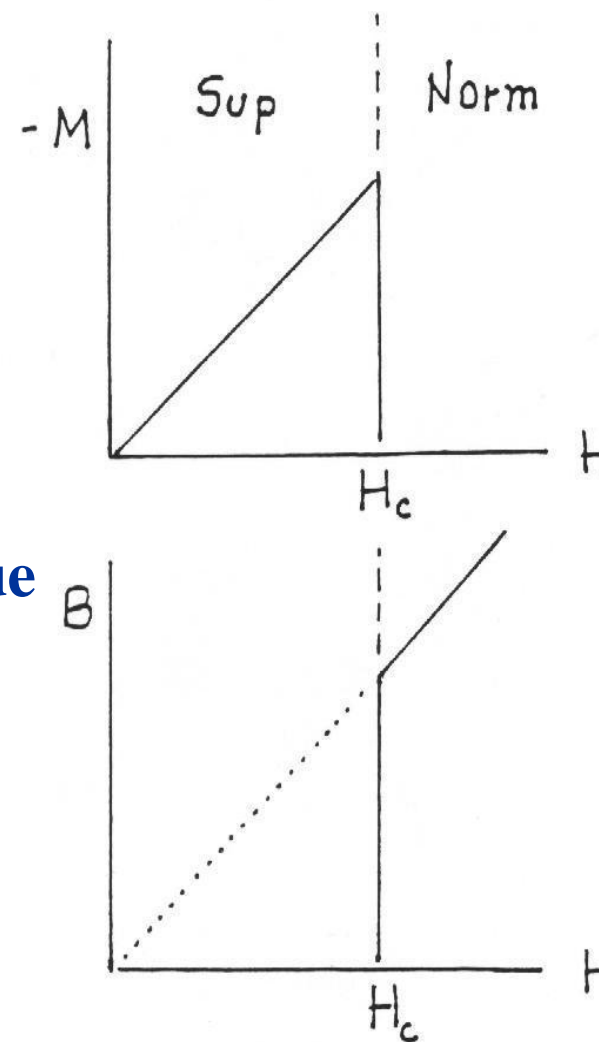
Estado Meissner (diamagnetismo ideal) e Normal

i) Para $H < H_c$ Exclusão Total do fluxo magnético

ii) Campos críticos: $\sim 500 \text{ G} = 0,05 \text{ T}$



Surgem correntes superficiais que anulam a indução magnética B no interior do supercondutor



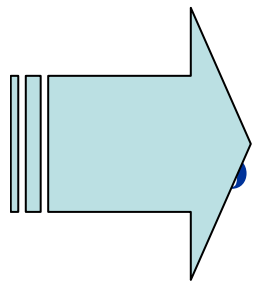
Supercondutores do Tipo II

Dois campos críticos

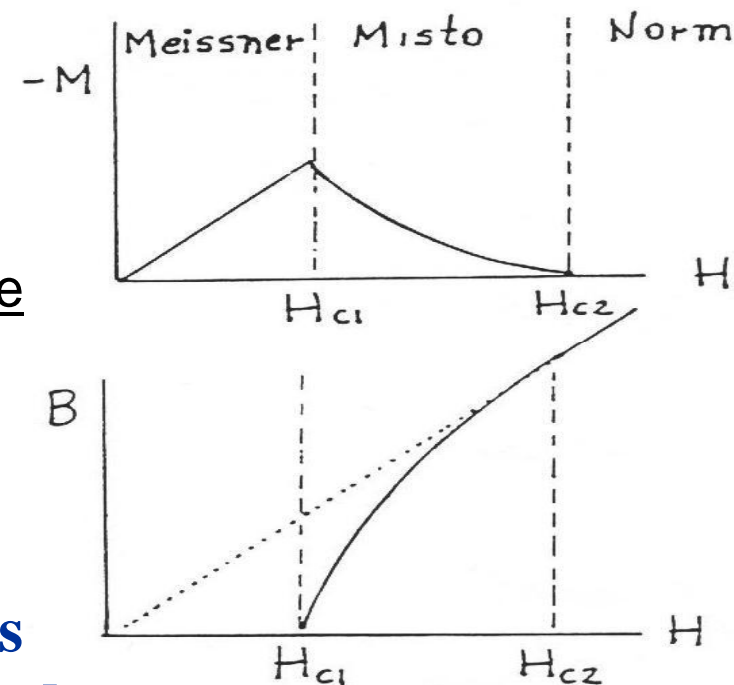
H_{c1} e H_{c2}

- i) $H < H_{c1}$ não penetra fluxo magnético
- ii) $H_{c1} < H < H_{c2}$ penetração parcial
- iii) $H \geq H_{c2}$ destruição da supercondutividade

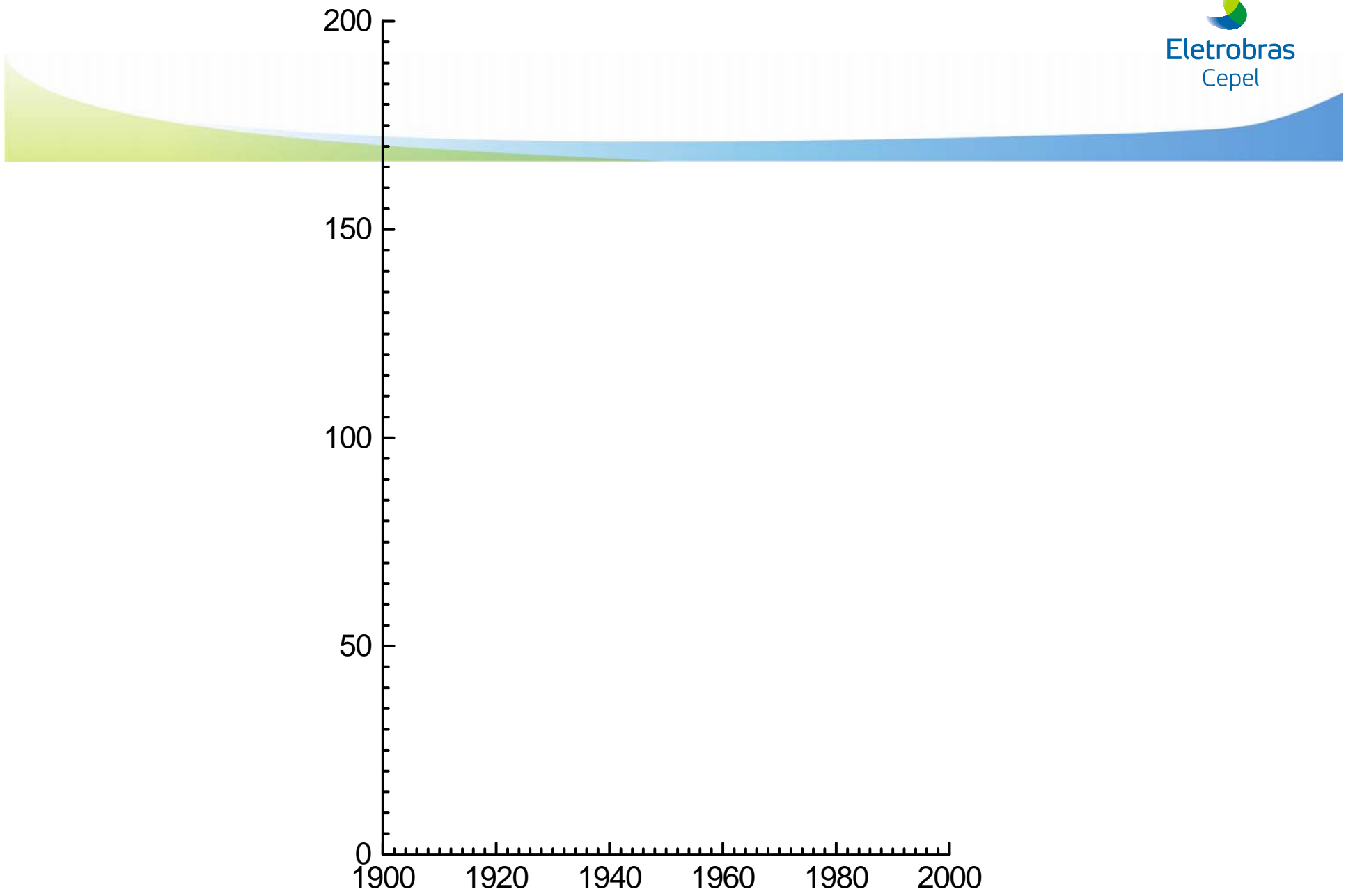
H_{c2} pode chegar a mais de 100 T !



**Além das Correntes superficiais
o sistema se auto arranja num estado
de vórtices.**



APLICAÇÕES !



Supercondutores de Alta Tc

- 1973 – recorde de $T_c = 23 \text{ K}$ – Nb_3Ge

A teoria previa T_c máxima = 30-40 K

- 1986 – $T_c > 30 \text{ K}$ no La-Ba-Cu-O !
- 1987 – $T_c = 92 \text{ K}$ no Y-Ba-Cu-O !

Nitrogênio líquido = 77 K (-196 °C)

Muito mais barato que o hélio líquido.

Supercondutores de Alta Temperatura Crítica



IBM - Suíça

J. Georg Bednorz, left, and K. Alex Müller after learning they had won the Nobel Prize in physics. Associated Press

2 Get Nobel for Unlocking Superconductor Secret

- **Bednorz e Müller - Prêmio Nobel de 1987**

Supercondutores para Aplicações

Principais Supercondutores de Baixa T_c :

- **NbTi** – domina o mercado de materiais supercondutores - maleável

$$T_c = 9 \text{ K}$$

$$B_{c2} = 11 \text{ T}$$

- **Nb₃Sn** – principal supercondutor para altos campos magnéticos; frágil

$$T_c = 16 \text{ K}$$

$$B_{c2} = 23-29 \text{ T}$$

- **Nb₃Al** – altos campos; tolera deformação

$$T_c = 16-18 \text{ K}$$

$$B_{c2} = 24-29 \text{ T}$$

High Temperature Superconducting Compounds

Family	Specific Compound	T _c (K)
Yttrium-Barium-Copper-Oxide (YBCO)	$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-δ}$ (Y-123)	91
Bismuth-Strontium-Calcium-Copper-Oxide (BSCCO)	$(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_1Cu_2O_{8+δ}$ (Bi-2212)	85
	$(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+δ}$ (Bi-2223)	110
Thallium-Barium-Calcium-Copper-Oxide (TBCCO)	$Tl_1Ba_2Ca_2Cu_3O_9$ (Tl-1223)	122
	$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Tl-1223)	125
Mercury-Barium-Calcium-Copper-Oxide	$Hg_1Ba_2Ca_1Cu_2O_{6+δ}$ (Hg-1212)	128
	$Hg_1Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+δ}$ (Hg-1223)	164

BSCCO - 1st Generation Wire
YBCO - 2nd Generation Wire

Novos Supercondutores de Alta Tc

- 2001 – Akimitsu descobre supercondutividade no MgB_2 !!!

$$T_c = 39 \text{ K}$$

MgB_2 – Meio termo entre Alta e Baixa Tc

- 2008 – “Pnictides” – Supercondutores à base Ferro – Arsênico!!!
 $T_c > 50 \text{ K}$ sem Cu-O !

Cobre x Supercondutor

$J \sim 0,5 \text{ kA} / \text{cm}^2$



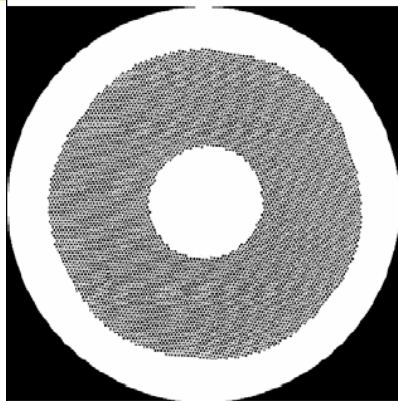
$J \sim 20 \text{ kA} / \text{cm}^2$



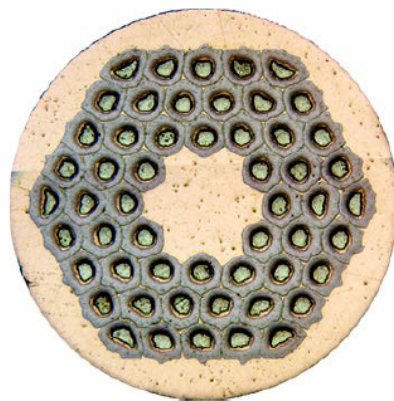
Alta densidade de
corrente

$J = \text{Corrente} / \text{Área}$
Transversal

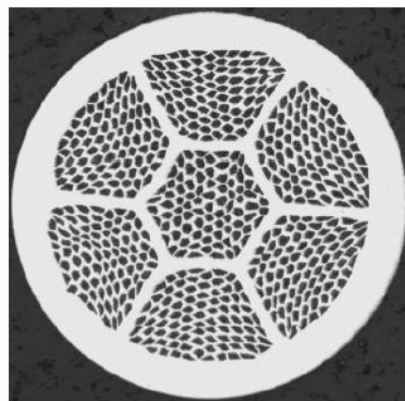
Fios Supercondutores



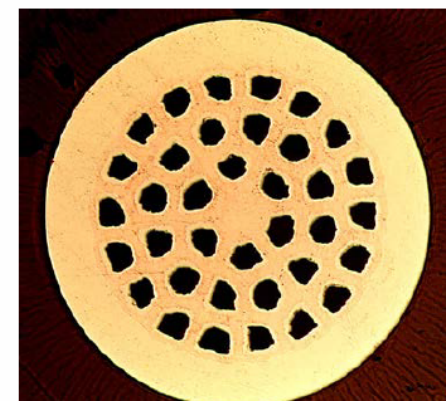
Nb-47Ti



Internal Sn Nb₃Sn



Bi-2212



MgB₂



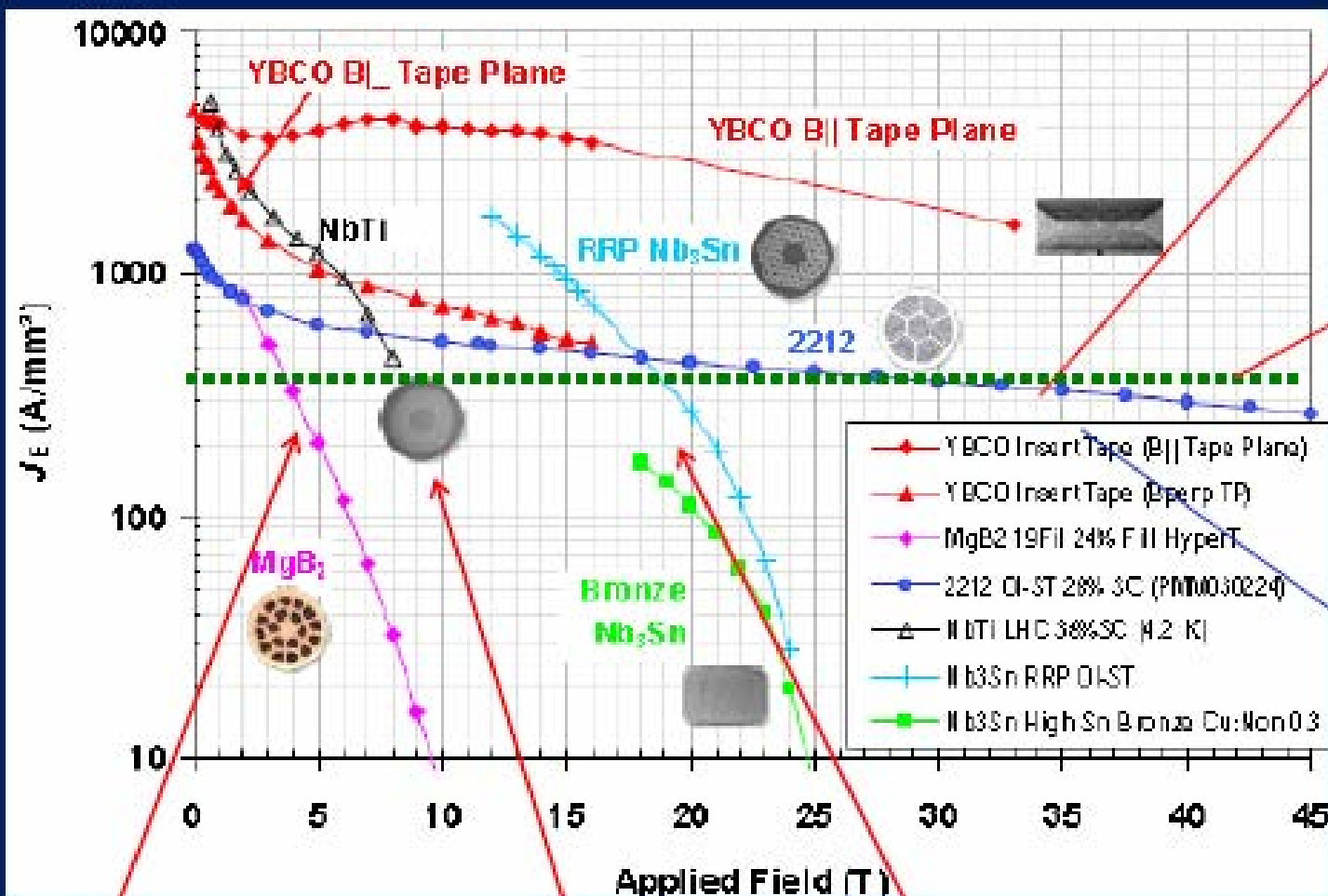
Bi-2223



REBaCuO coated conductor

Superconductors for magnets

H. ten Kate, 2011



Y123 in a magnet, not in // field !

Minimum practical current density

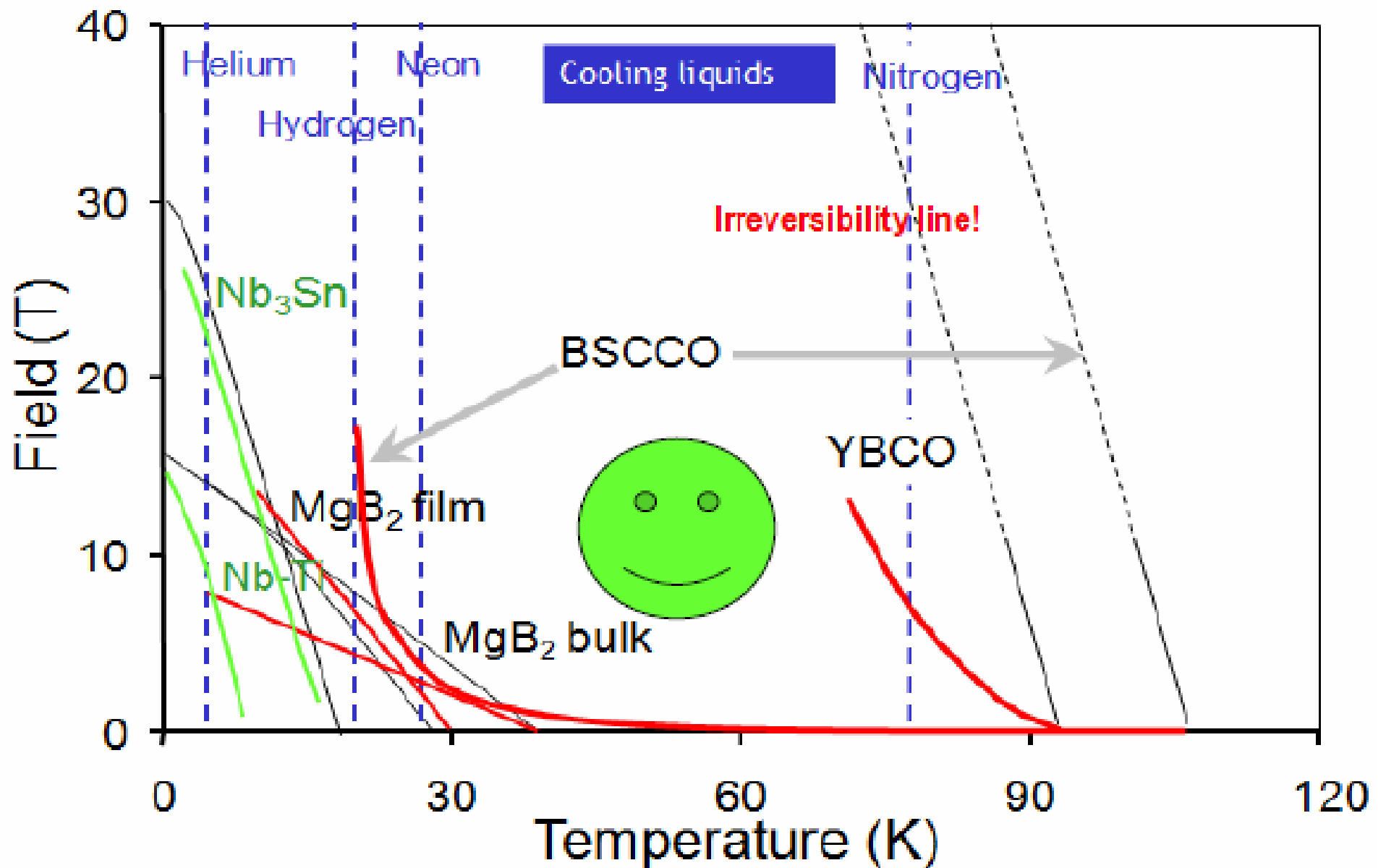
B2211 may do better than Y123 when anisotropy is considered

MgB₂ not for high field magnets but niche market 1-5T, 4-20K

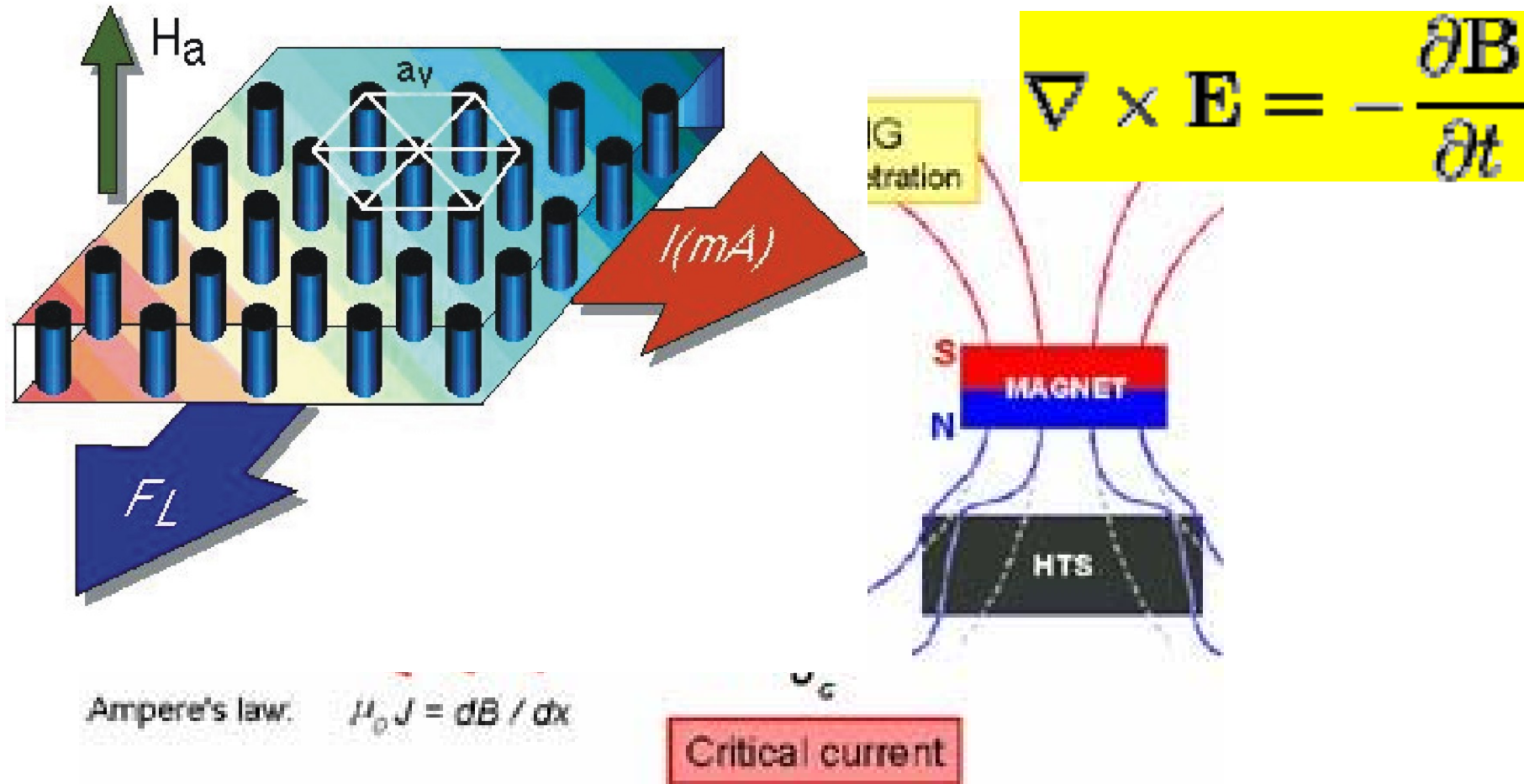
NbTi for high field up to 9 T and 4 K and 11T at 1.8 K

Nb₃Sn for any magnets of 9-20T

B2212 or Y123 for DC magnets of 17-40T provided cost comes down



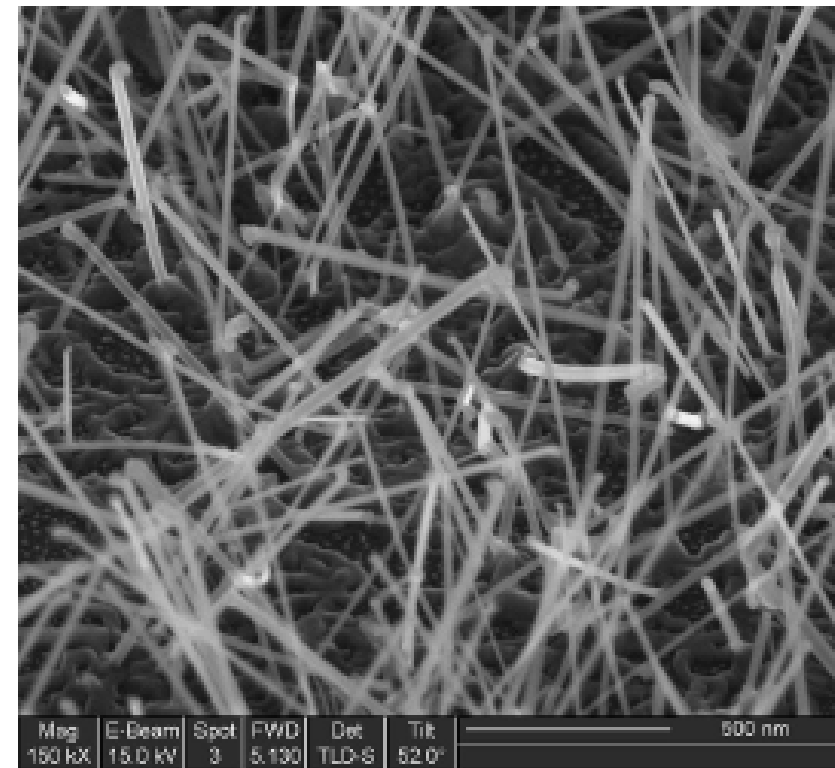
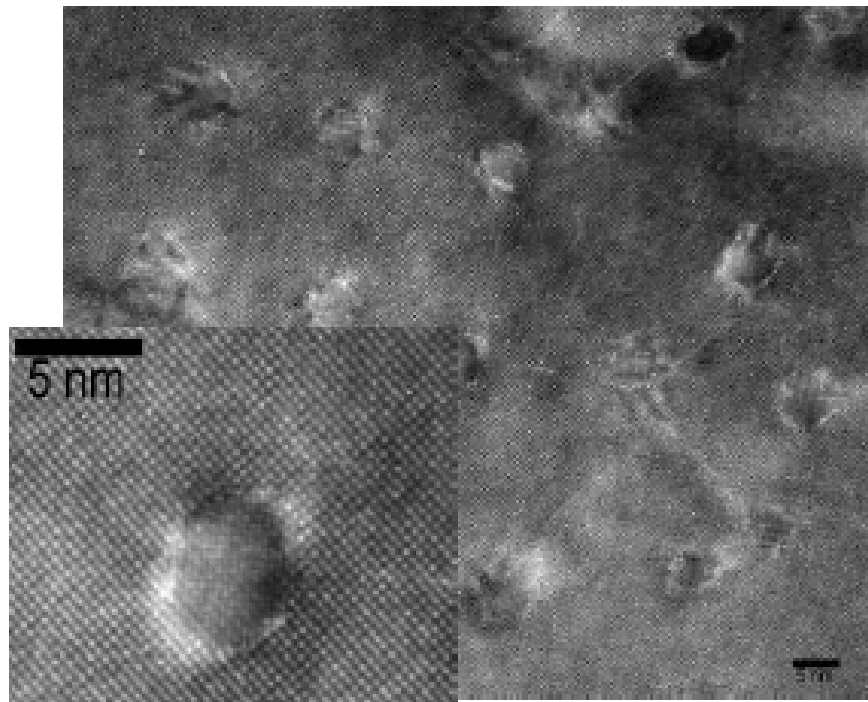
Supercondutores do Tipo II



Supercondutores do Tipo II

NANOTECNOLOGIA

ANCORAMENTO DE VÓRTICES – DEFEITOS NANOMÉTRICOS

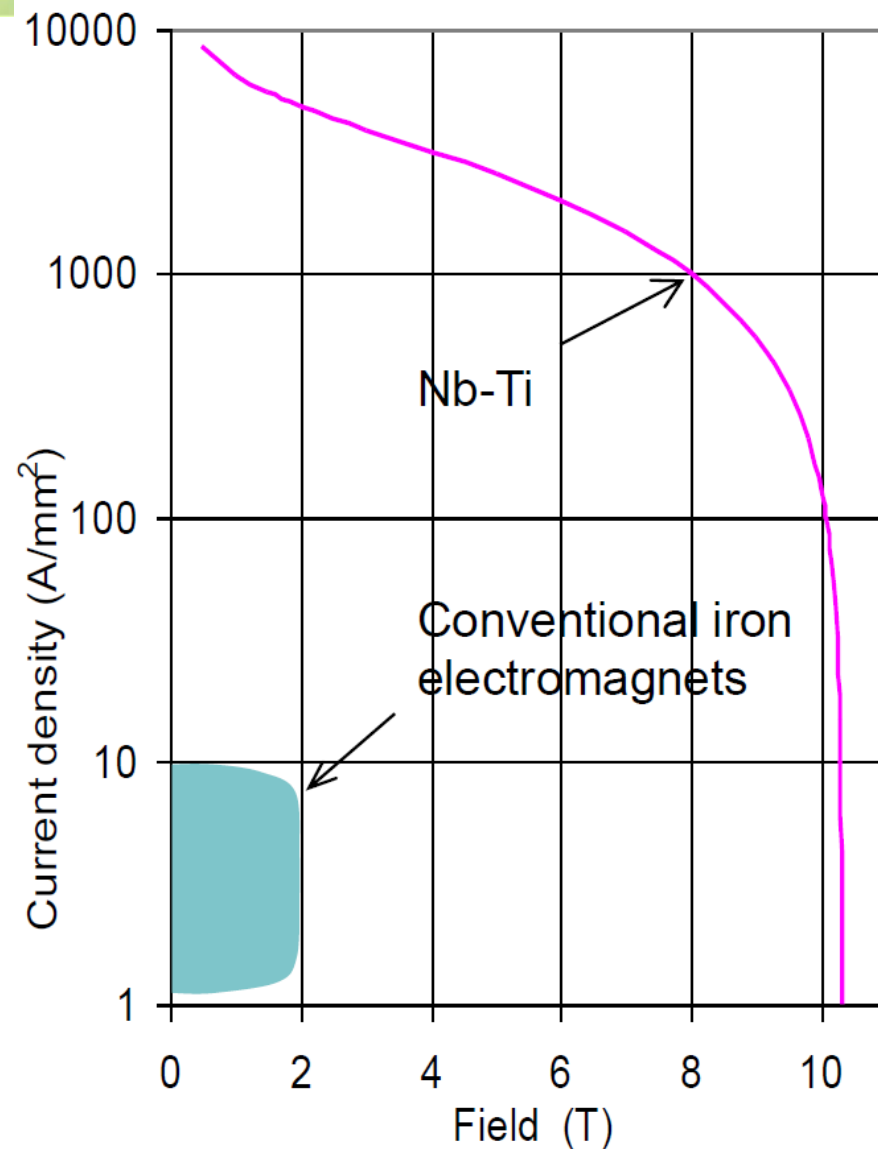


Selvamanickam et al, 2011

Aplicações da Supercondutividade

- **Aplicações no Setor Elétrico de Potência**
- **Aplicações em Eletrônica (sensores Thz, filtros, computação, etc.)**
- **SQUIDS** – sensores magnéticos ultra-sensíveis ($10^{-18} \text{ T} = 10^{-14} \text{ G}$)
- **Computadores ultra-rápidos – Centenas de GHz's !**
- **MAGLEV** - Trem de levitação magnética
- **Magnetos de altos campos para:**
 - Ressonância Magnética
 - Aceleradores de Partículas
 - Fusão Nuclear – **ITER (França) e KSTAR (Coréia do Sul)**
- **E várias outras aplicações ...**

Magnetos Supercondutores



H. ten Kate, 2011

Nb-Ti The Workhorse superconductor

- The dominant commercial superconductor
- The primary application is MRI



**A RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NÃO SERIA
VIÁVEL SEM OS SUPERCONDUTORES**

Ressonância Magnética

NMR technique used to develop a visual image of the organs and tissues on the inside of the body.

- **Altos Campos Magnéticos:**
 - **Maior relação sinal/ruído**
 - **Imagens mais rápidas**
 - **Maior resolução**
 - **Maior Contraste**

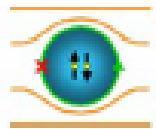


Courtesy D. Gubser, Naval Research Laboratory



CSC

Council on Superconductivity



Largest Application of Superconductivity (so far)

$B_{\text{dip}} \cong 8.3 \text{ T}$

$R_{\text{dip}} \cong 3 \text{ km}$

$L_{\text{dip}} \cong 15 \text{ m} \times 1232$

$L_{\text{tunnel}} = 27 \text{ km}$

1,500 tons of high quality SC cables

15,000 MJ of magnetic energy

1800 Power Converters

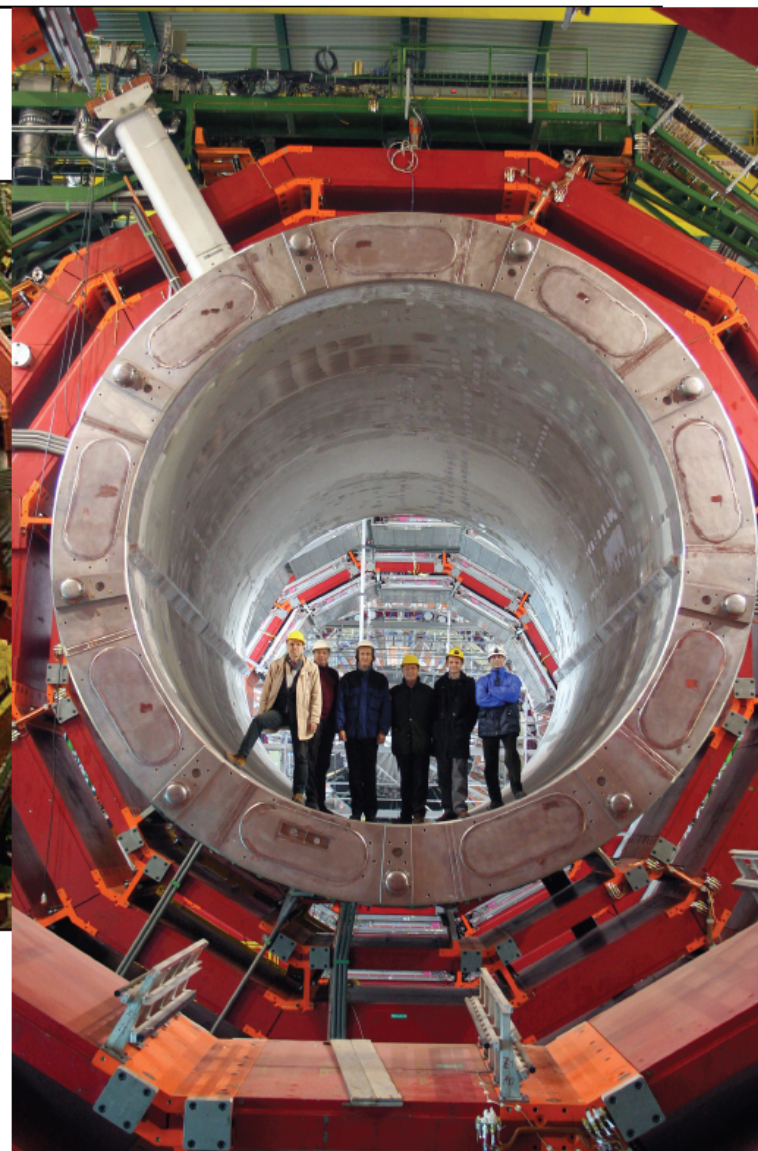
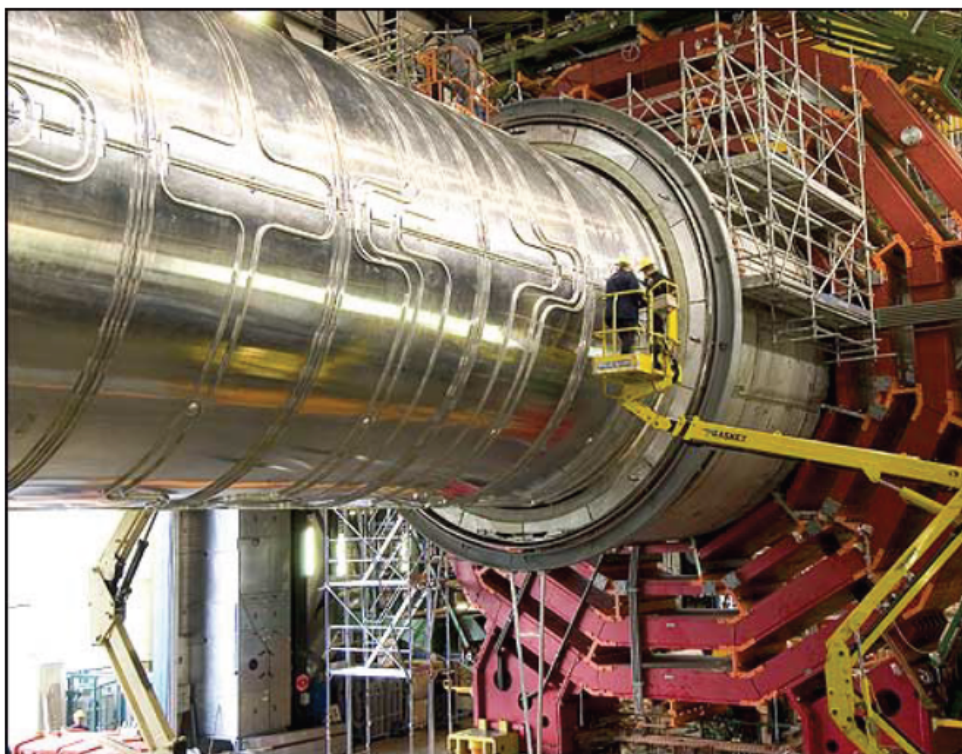
1800 HTS Leads
11 kW@1.9 K

LHC

14 TeV pp collider, a complex with more than 9000 superconducting magnets
by far the largest superconducting system in operation

Completion of CMS Solenoid

IS

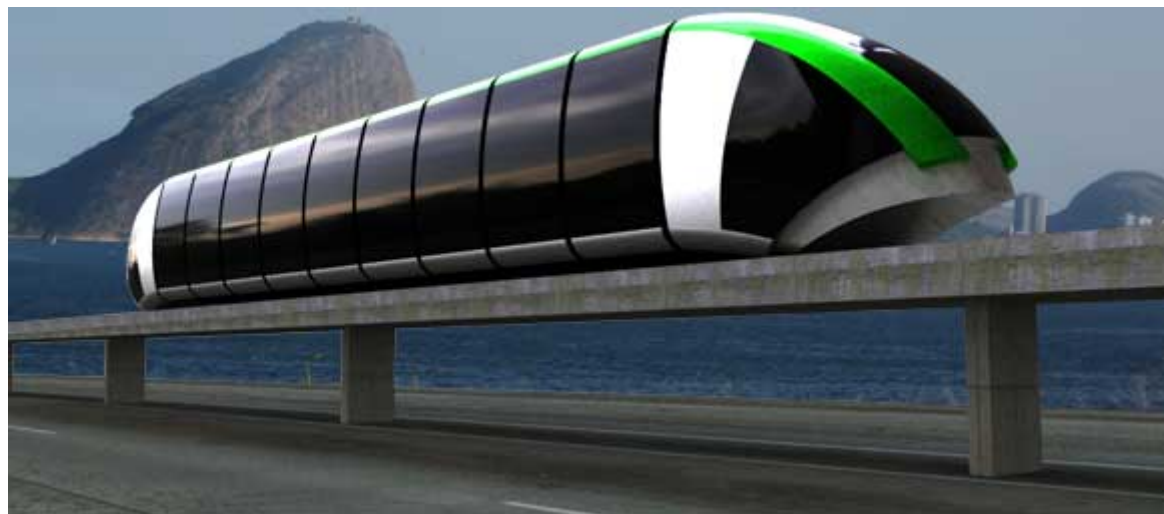


Um Solenóide Supercondutor do LHC

$I = 20 \text{ kA} !!!$

SCC'11 tsv

Maglev - Magnetic Levitation

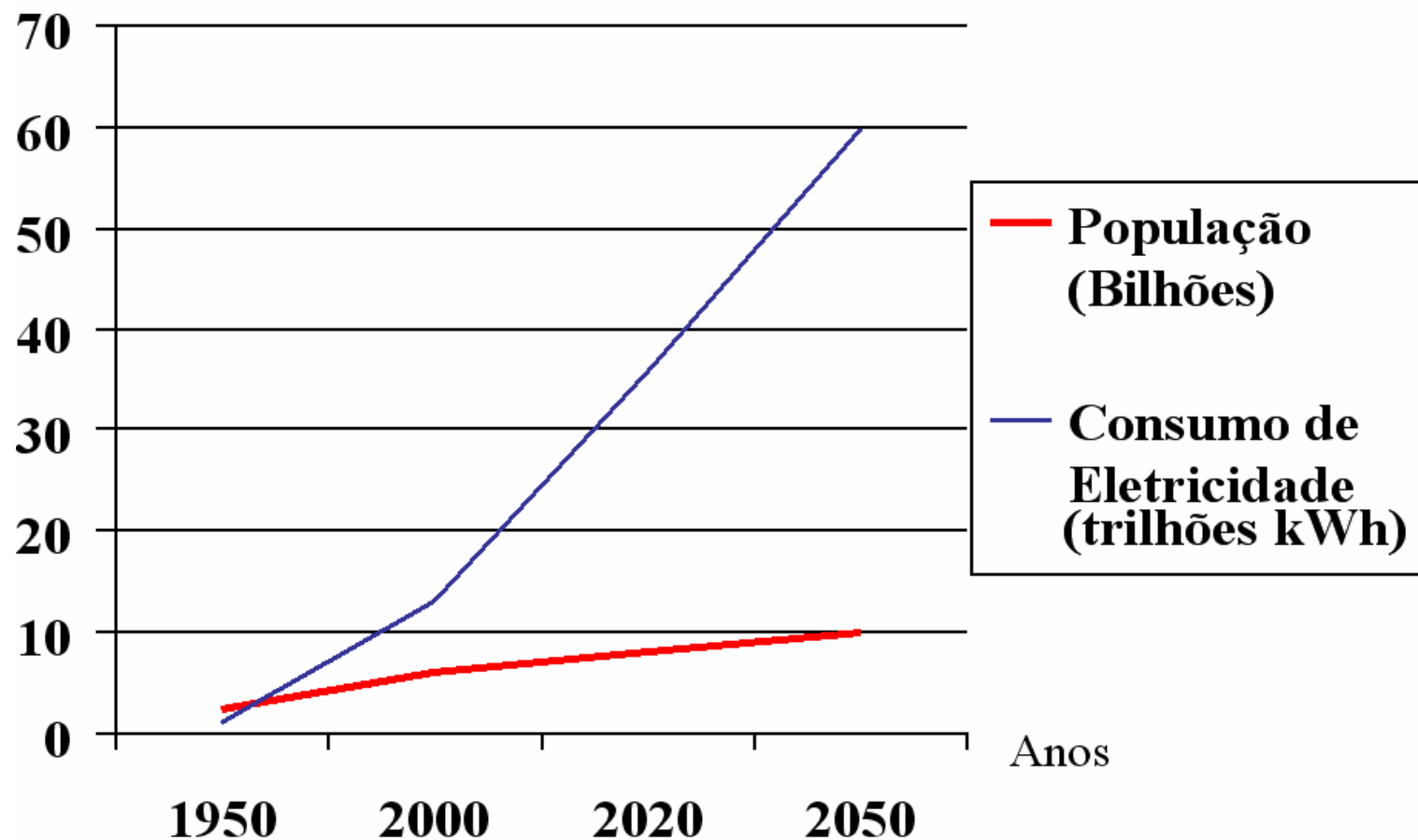


Maglev – Cobra

LASUP – Laboratório de Aplicações de Supercondutores

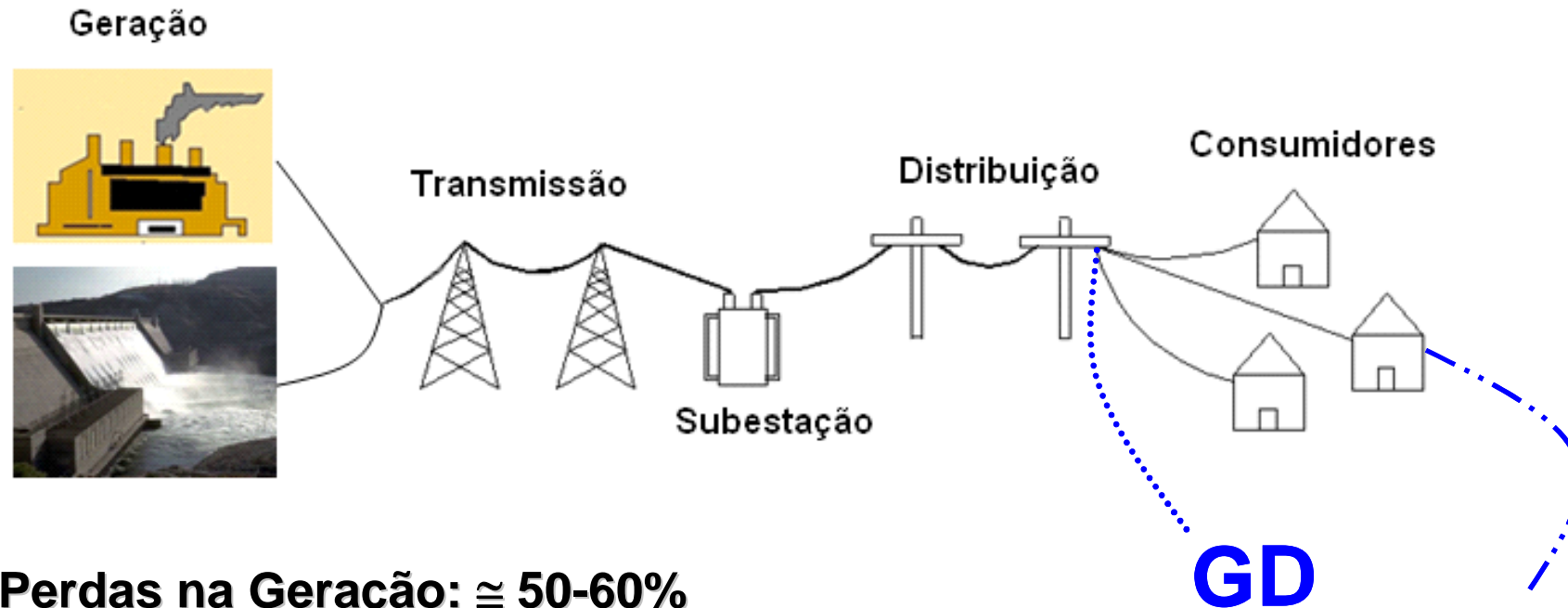
Departamento de Eng. Elétrica – COPPE - UFRJ

E o Setor Elétrico ?



Fonte: *Electricity Technology Roadmap: 1999 Summary and Synthesis*, (1999).

Energia Elétrica



- **Perdas na Geração: \cong 50-60%**

Na geração hidráulica as perdas são muito menores

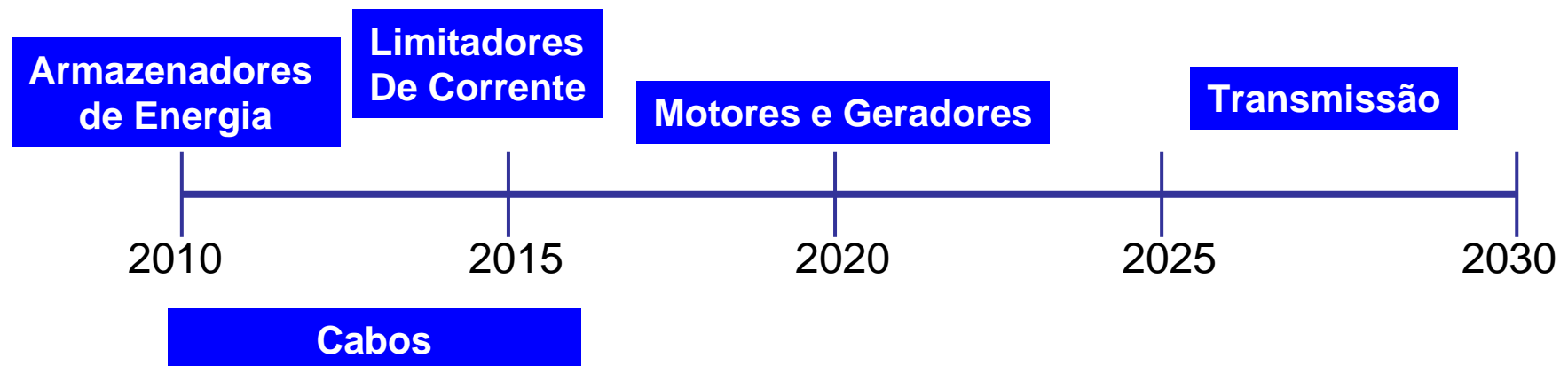
- **Perdas na Transmissão: \cong 10-16%**
- **Perdas na Distribuição: \cong 10-20%**

Fontes: EPE/MME, ELETROBRAS



Aplicações no Setor Elétrico

- **Vantagens :**
- maior eficiência energética
- redução de tamanho e do peso dos equipamentos
- qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia
- tecnologias inovadoras



Stephen A. Gourlay - 2007

IEEE Council on Superconductivity

Cabos Supercondutores

- **Tornando-se viáveis economicamente**
- **Alta capacidade de transporte de corrente**
- Eficiência (economia e redução das emissões de CO₂)
- Operam com nitrogênio líquido (77 K)
- redução da tensão de operação para uma dada potência
- menos Subestações
- **Benefícios para áreas densamente povoadas**
- praticamente sem geração de calor
- **Desafios**
 - cabos longos - reduzir perdas CA

Superconducting AC Cables

State-of-the-Art

Columbus



Ultera
13.2 kV, 3 kA, 200 m
Triaxial™ Design
BSCCO 2223
Energized 2006
High reliability

Figure:
Ultera

LIPA



Nexans
138 kV, 2.4 kA,
600 m
Single coaxial design
BSCCO 2223
Energized 2008

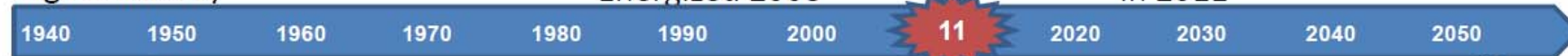
Figure:
Nexans

Gochang



Figure: LS Cable

LS Cable
22.9 kV, 50 MVA, 100 m
BSCCO 2223
Energized 2007
500 m field test with YBCO
in 2011

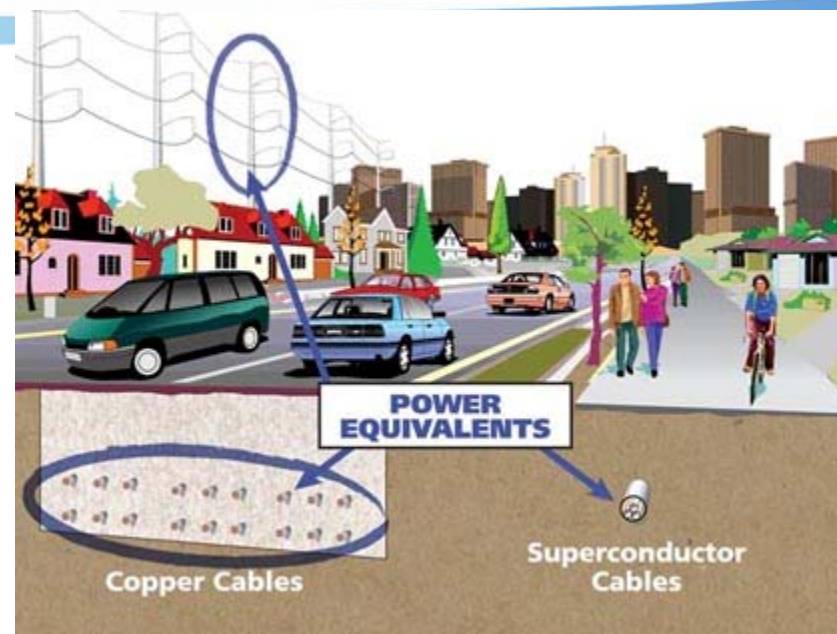


Cabos Supercondutores Alta Ampacidade



Testing 90 degree tri-axial cable bend in HTS cable test facility at ORNL (2005)

Design current is 3 kA ac



Supercable

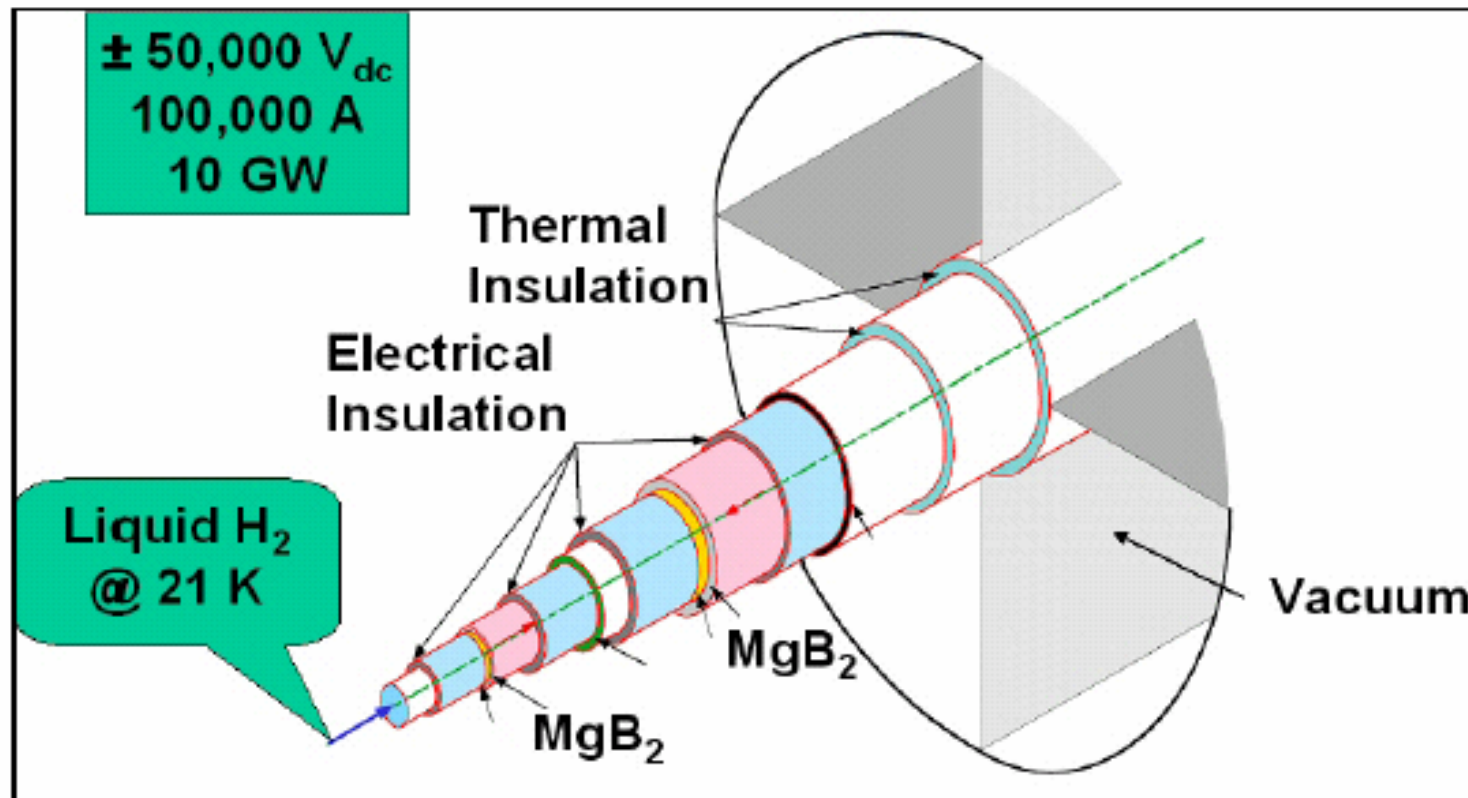
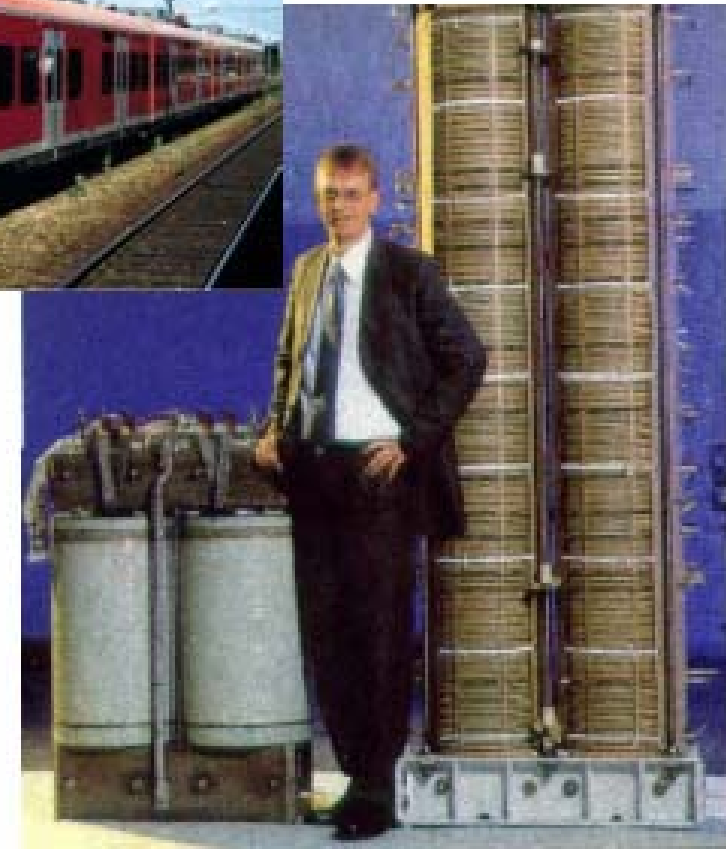


Figure 4: A Potential Design for the SuperCable (Source: EPRI)

Energia Elétrica + Energia Química (Hidrogênio)

Transformadores Supercondutores

- Redução nas perdas totais - 30%
- Redução em peso – 45%
- maior capacidade de operação em sobrecarga
- Não empregam óleo isolante:
 - nitrogênio líquido age como isolante
 - menor impacto ambiental
 - menor risco de incêndio



SIEMENS, ALEMANHA

State-of-the-art of superconducting transformers

Karlsruhe Institute of Technology



Copyright: KIT

60 kVA Demonstrator
1kV/0.6 kV
Primary copper
Secondary YBCO tapes
Successful test in 2010
Recovery under nominal load

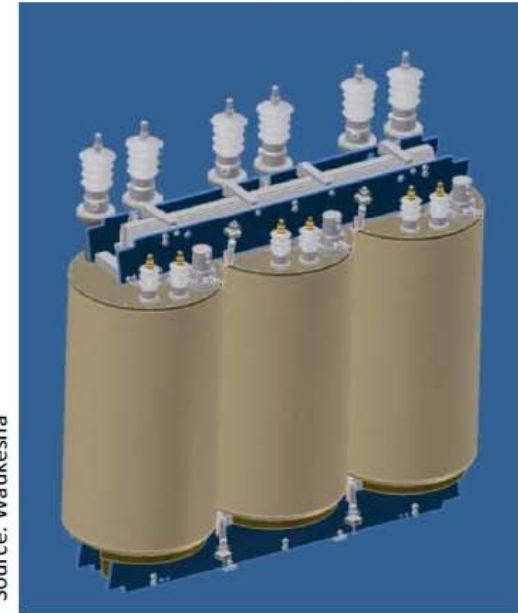
Nagoya University



Courtesy: N. Hayakawa

2 MVA Demonstrator
22kV/6.6 kV
Primary Bi 2223 tapes
Secondary YBCO tapes
Successful test in 2009

Waukesha/SuperPower



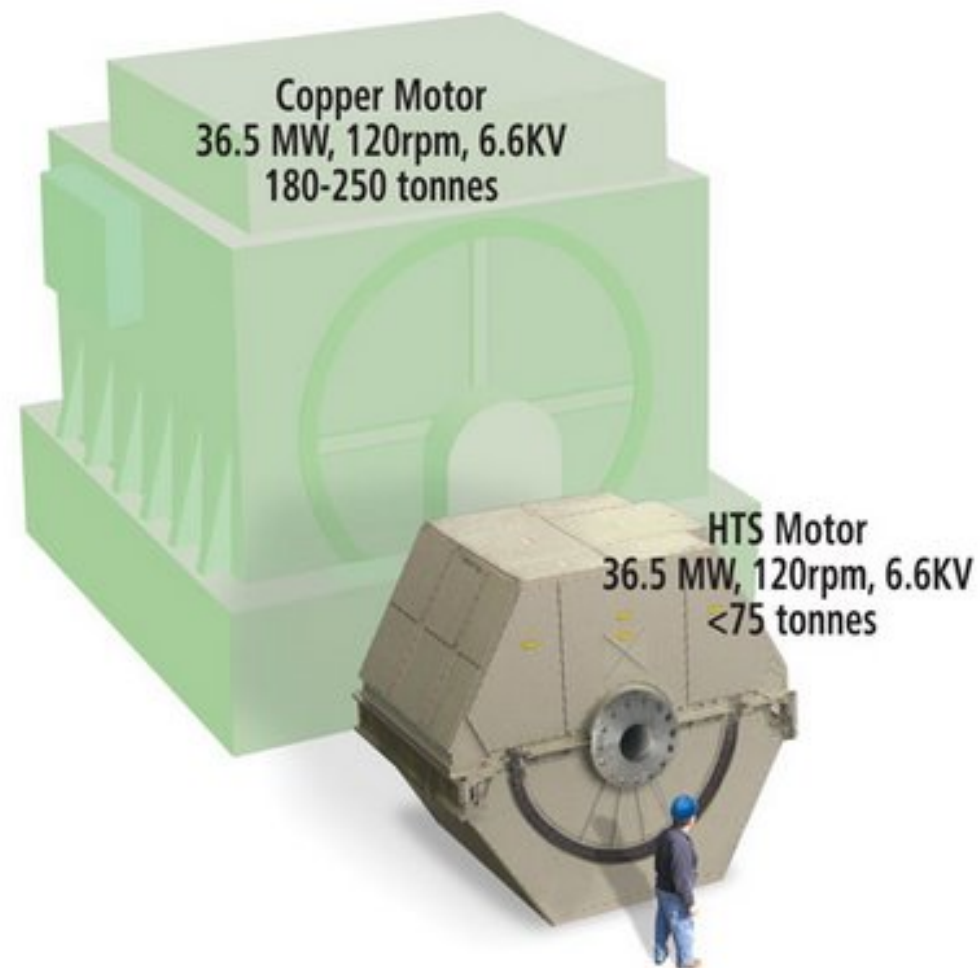
Source: Waukesha

28 MVA Prototype
69 kV
Primary and secondary with
YBCO tapes
Test planned in 2012



Motores Supercondutores

- Motores para propulsão de navios:
 - Marinha Americana:
 - 36 MW (já testado)



Geradores Supercondutores

- geradores supercondutores para turbinas eólicas

projeto dinamarquês: 5 - 10 MW

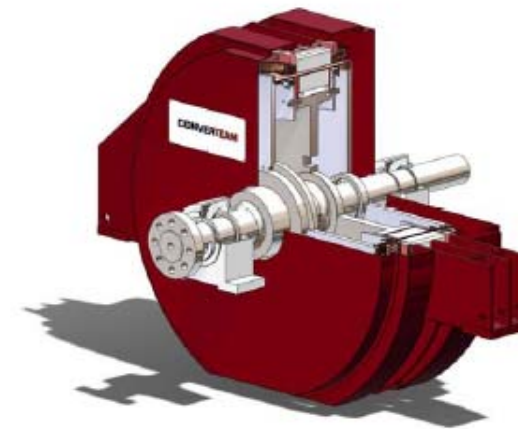
- estator de cobre
- rotor supercondutor



- gerador para usina hidroelétrica – Alemanha:

-1.7MW - 5.25kV - 214rpm

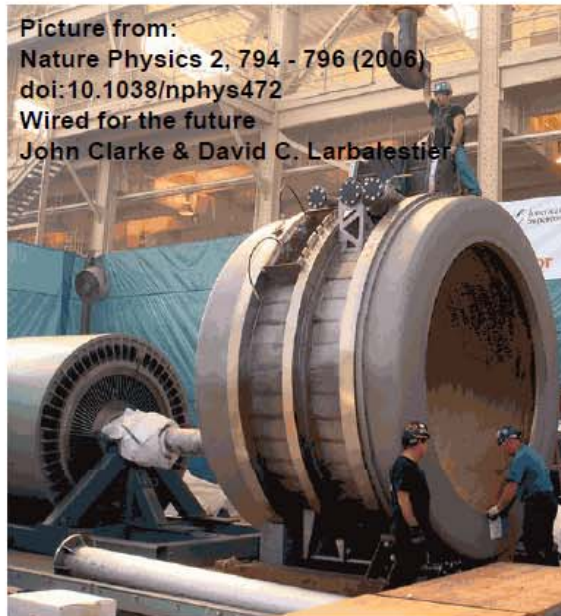
- estator de cobre
- rotor supercondutor
- retrofit de geradores existentes



Superconducting Rotating Machines

State-of-the-Art

Ship Propulsion



AMSC
36.5 MVA, 6 kV
120 rpm
8 poles, 75 tons
Efficiency > 97 %
Dimensions: 3,4 m x 4,6 m x 4,1 m

EU „Hydroenie“ Hydrogenerator



Convertteam
1.790 MW, 5.25 kV
214 rpm, 77.3 kNm
28 poles, 32.7 tons
4.7 m x 5.2 m x 3.5 m
Installation in 2011

Ship Propulsion

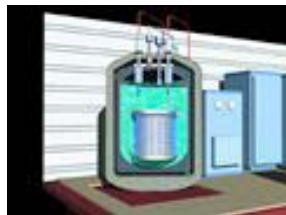
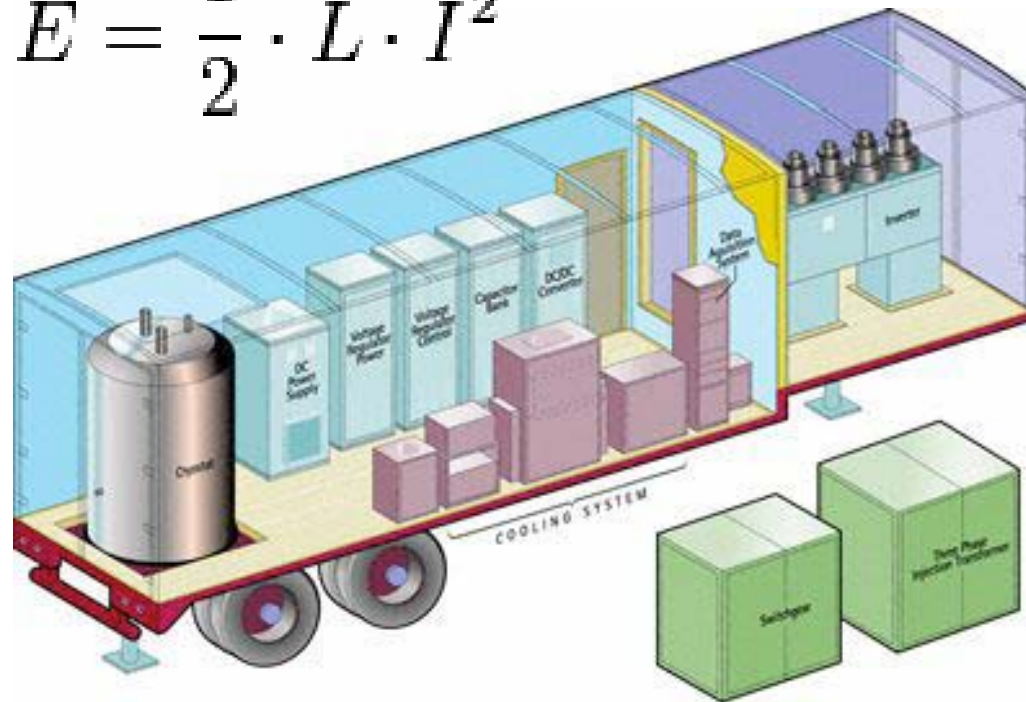


Siemens
4 MW, 3.1 kV
120 rpm, 320 kNm
37 tons
50 km HTS
Test in 2010

1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050

SMES

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$



Qualidade e Confiabilidade

Tensão: 400 V a 20 kV

Potência: 1.3 MVA

Tempo de atuação:
milissegundos

Eficiência > 97 %

Magneto de NbTi

Energia Armazenada: 3 MJ

Tempo de Recarga: < 90 s

American Superconductor - EUA

State-of-the-art of HTS superconducting magnetic energy storage

Chubu, Japan
Bridging voltage dips

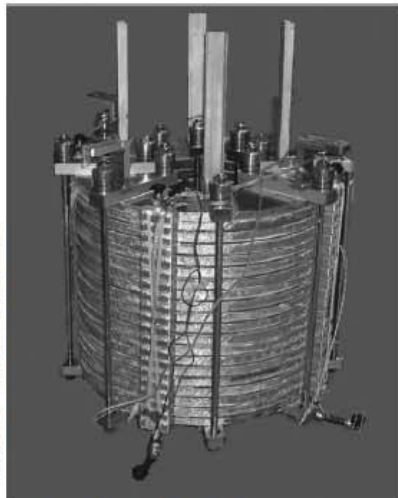


Figure: Chubu Electric

1 MJ , 1 MW
Bi 2212 tape
500 A,
5 K conduction cooled
Voltage: 2.5 kV

KERI, Korea
Power quality

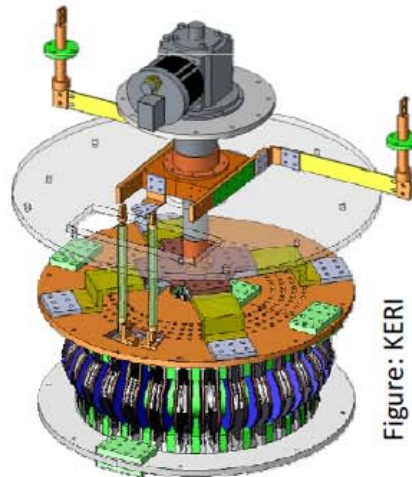


Figure: KERI

2.5 MJ
YBCO tape, 22 km
550 A
20 K conduction cooled
 B_{maxII} 6.24 T
Test in 2011

CNRS, France
Military application



Figure: CNRS

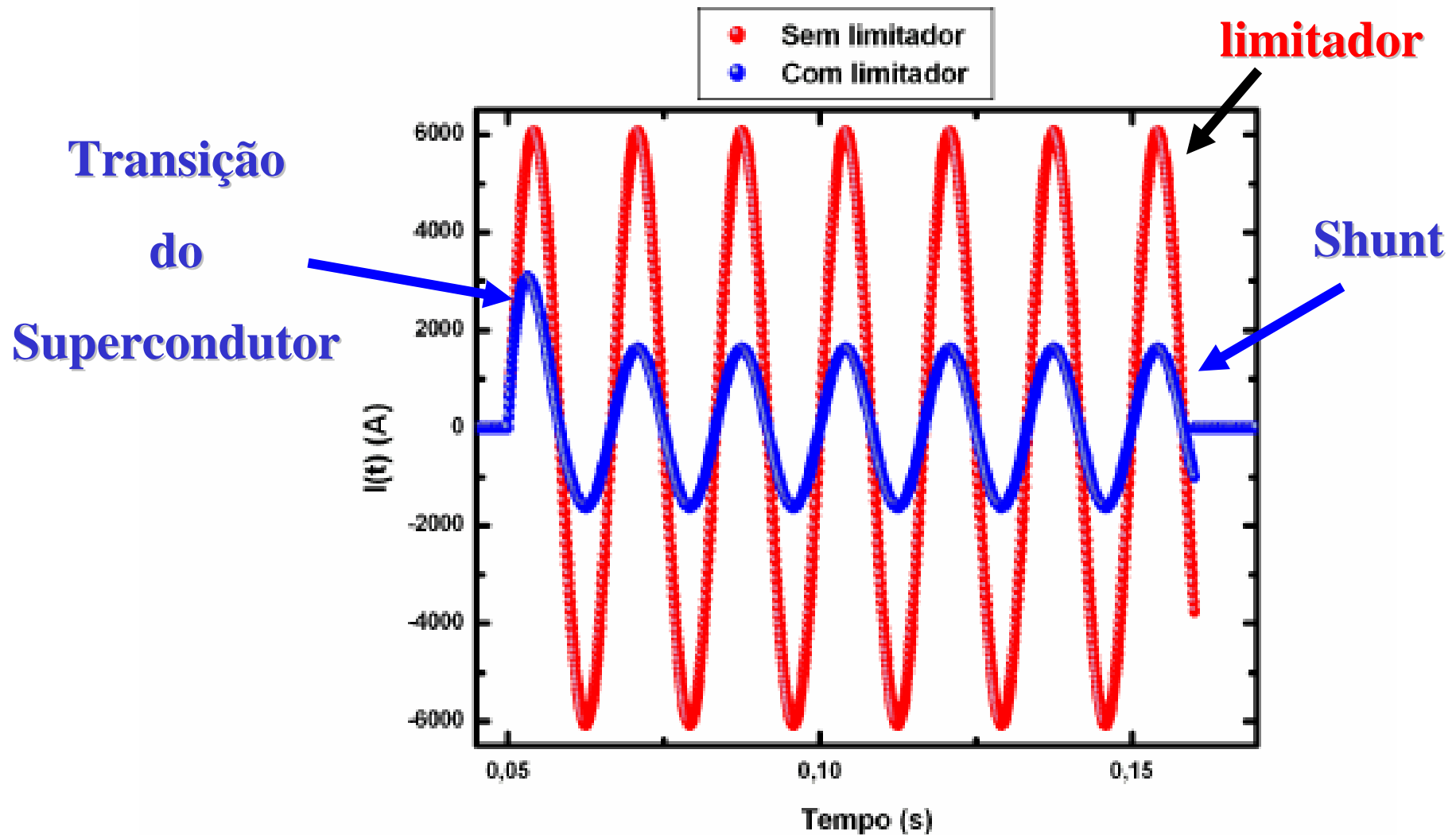
814 kJ
Bi 2212 tape
315 A
20 K conduction cooled
Diameter : 300/814 mm
Height: 222 mm

CURTO – CIRCUITO !!!



LIMITAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO

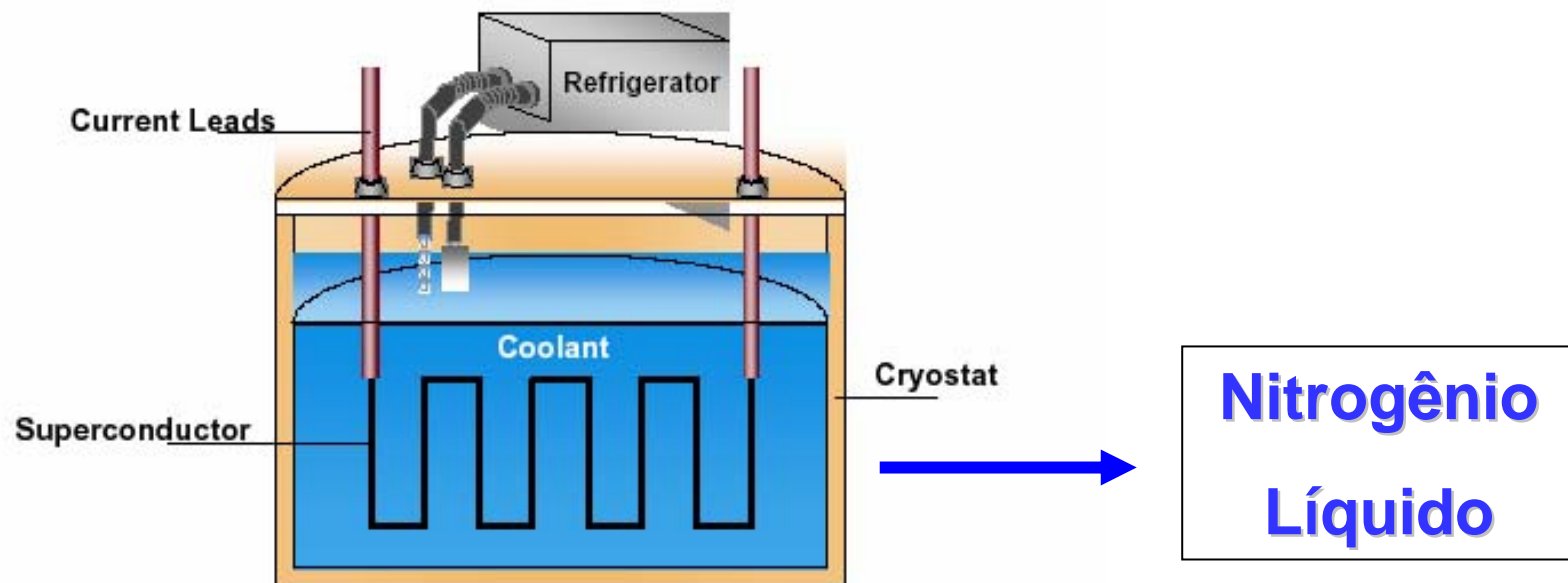
Ensaio CEPEL / Simulação - 1º Ensaio



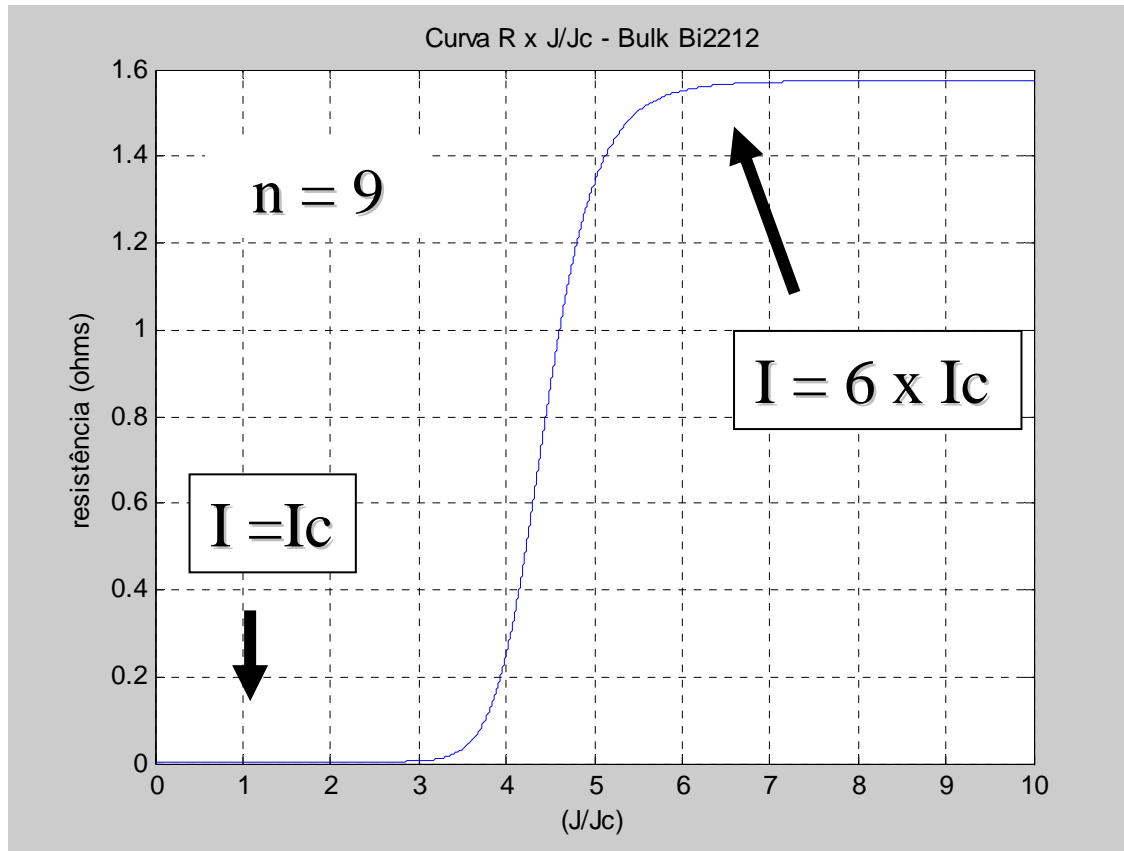
LIMITADORES DE CORRENTE SUPERCONDUTORES

LIMITADOR DO TIPO RESISTIVO

$I \gg I_c \rightarrow$ Transição supercondutor / resistivo



CEPEL – SIMULAÇÃO R x I



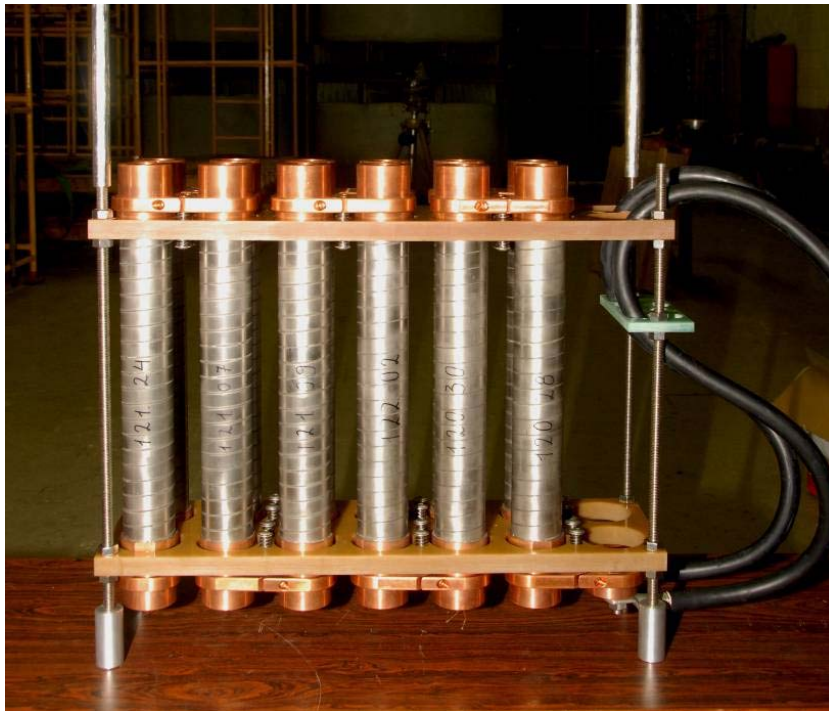
$$R = \frac{E_c l}{I_c} \left(\frac{|I|}{I_c} \right)^{n-1}$$

$$n = 9 - 30$$

n – depende do material
supercondutor

Transição supercondutor/resistivo

CEPEL



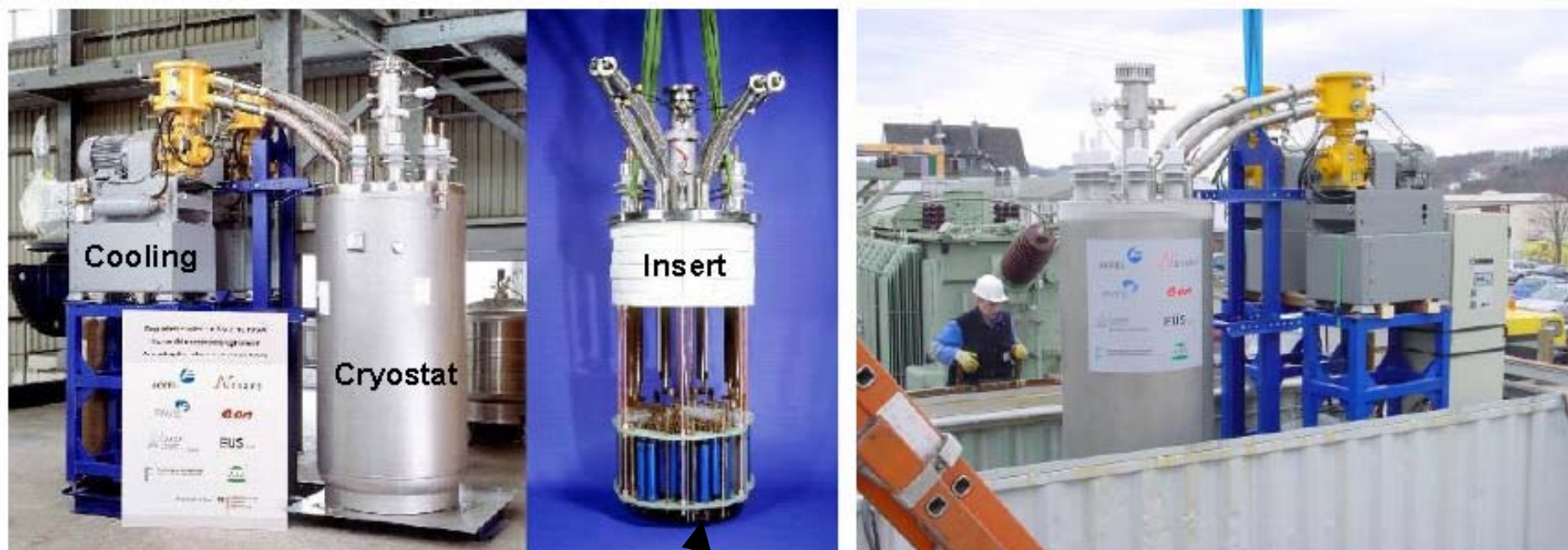
Testes com Limitador de Corrente Supercondutor

CEPEL



Testes com Limitador de Corrente Supercondutor

LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR



Componentes
Limitadores

Conectado à rede
NEXANS / ACCEL
Alemanha

State-of-the-art of superconducting fault current limiters

AMSC/Siemens



Courtesy: Siemens

Resistive Type
115 kV, 1200 A
YBCO tapes
1 phase test in 2011

Innopower



Courtesy: Innopower

DC Biased Iron Core Type
220 kV, 280 MVA
Bi 2223 tapes
Substation
Installation 2011

KEPRI

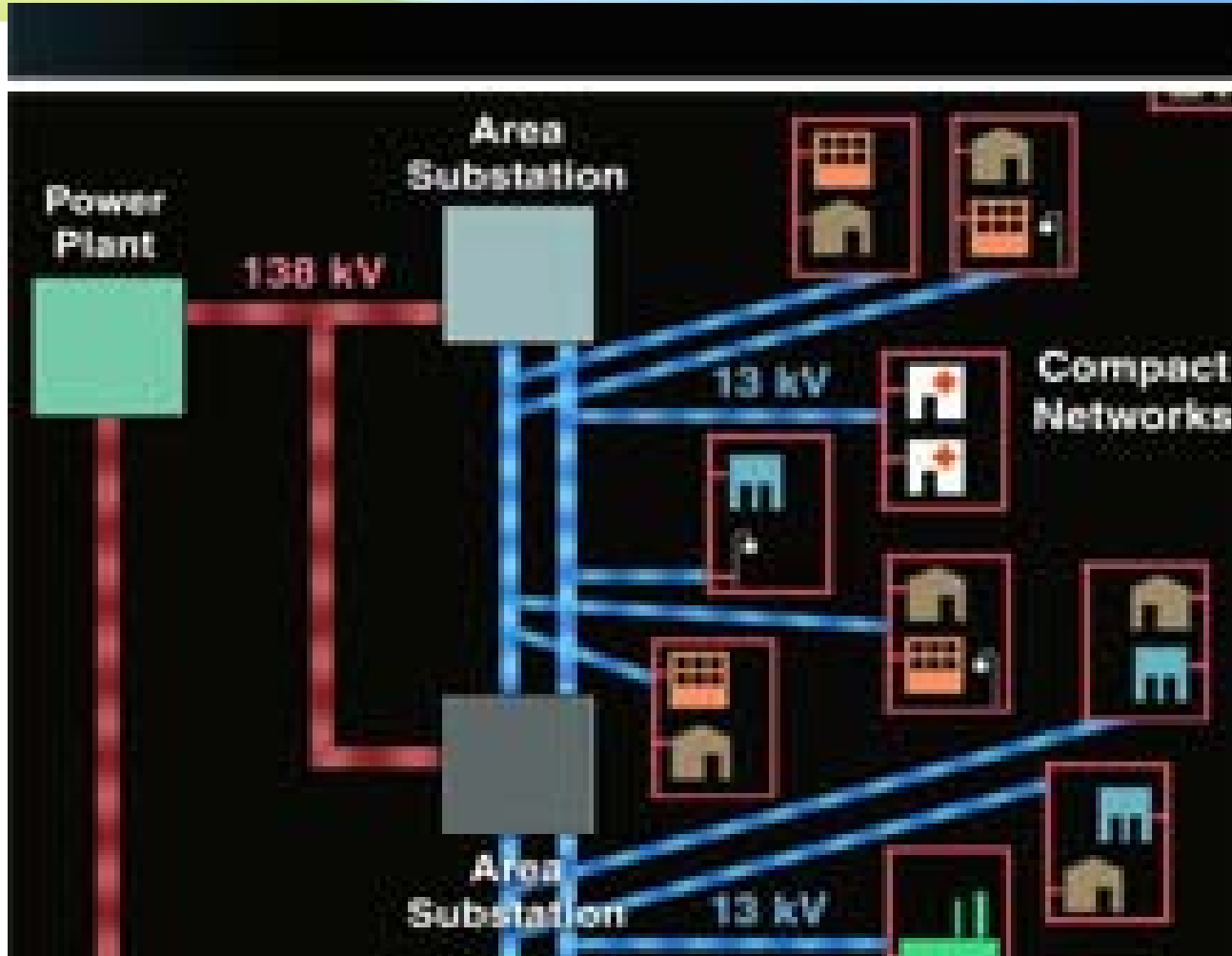


Courtesy: KEPRI

Hybrid type
22.9 kV, 3.0 kA
YBCO tapes
Factory tested in 2011



Projeto HYDRA



Rede Elétrica de Manhattan

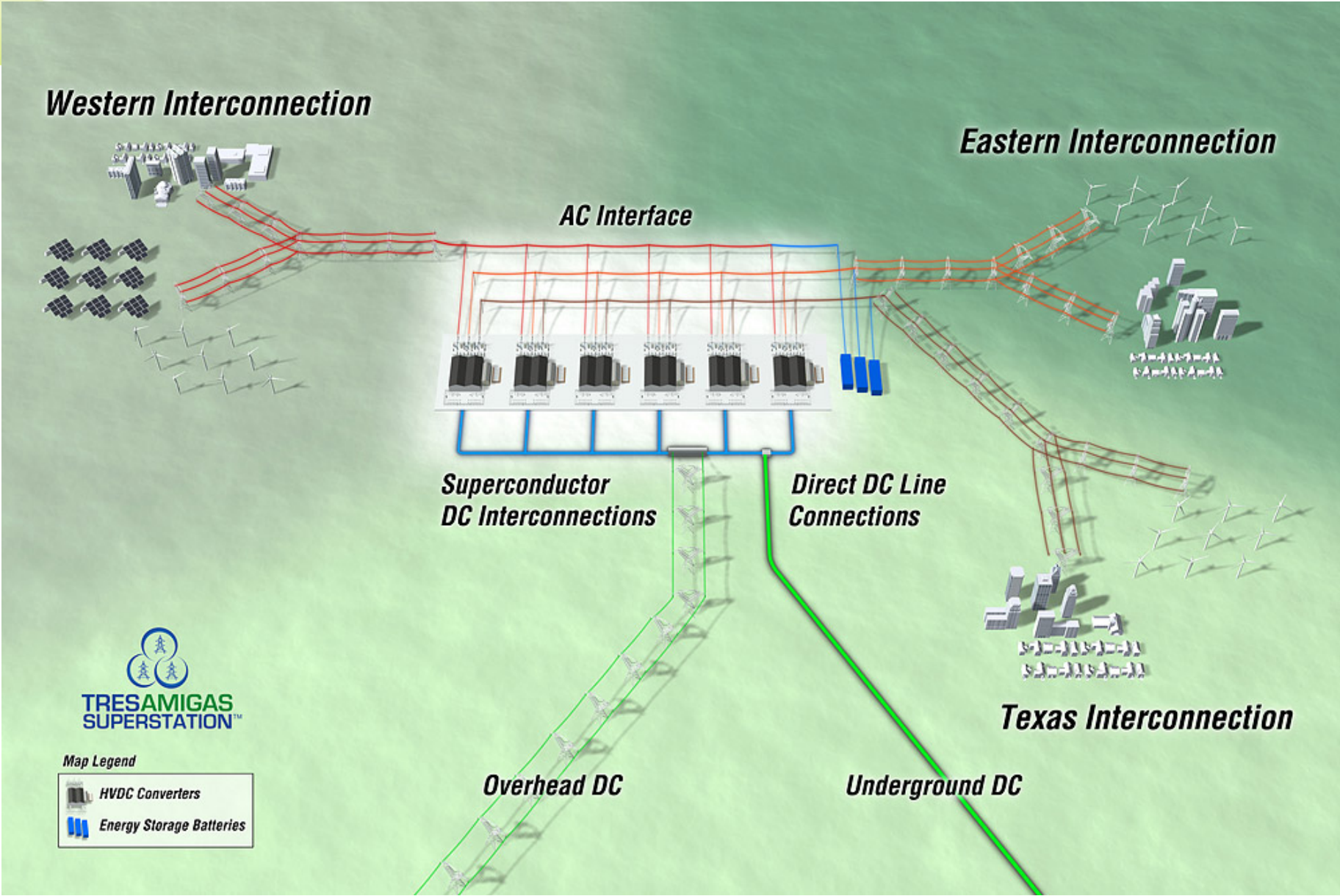
Can we see superconducting systems?

A superconducting substation commissioned in China in 2011



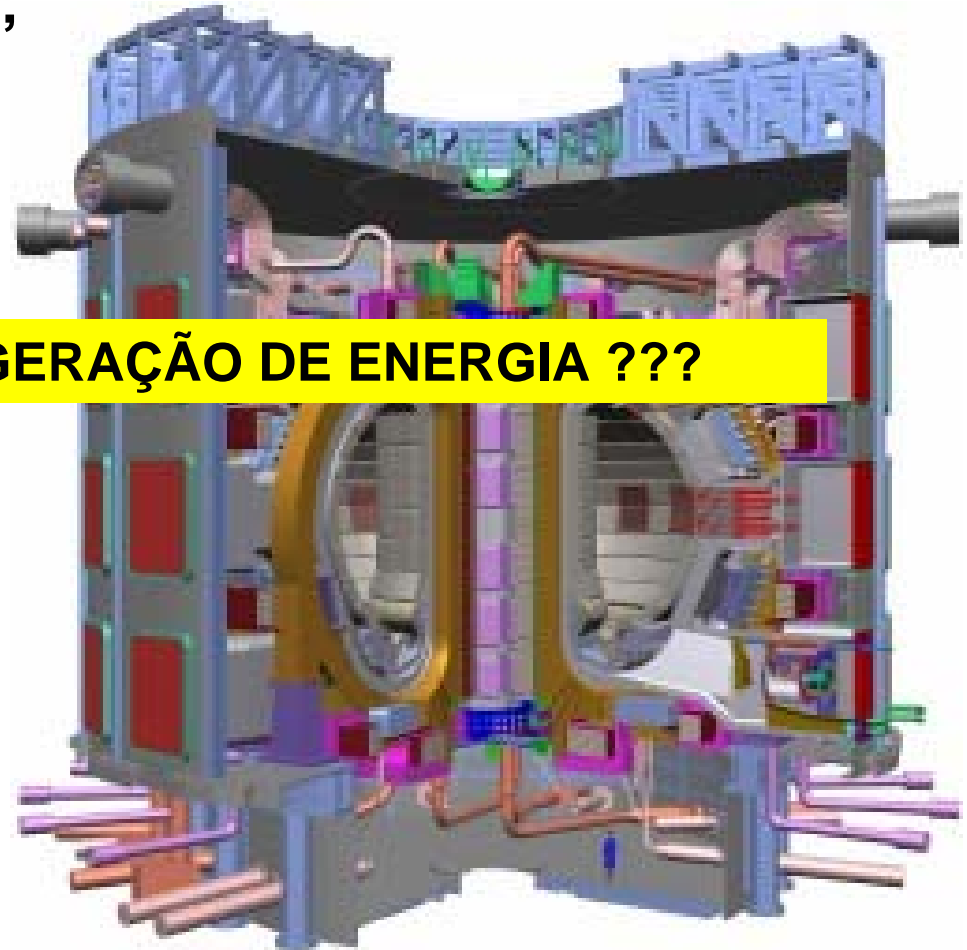
Courtesy: IEEE CAS

TRES AMIGAS SUPERSTATION



Fusão Nuclear

- **Projeto ITER - “o caminho”**
- Protótipo 500 MW
- **plasma a 100 milhões °C**
- **SOLUÇÃO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ???**
- **bobinas supercondutoras**
- **Um pequena estrela!**
- **ENERGIA NUCLEAR LIMPA!**
- Operação : 2026



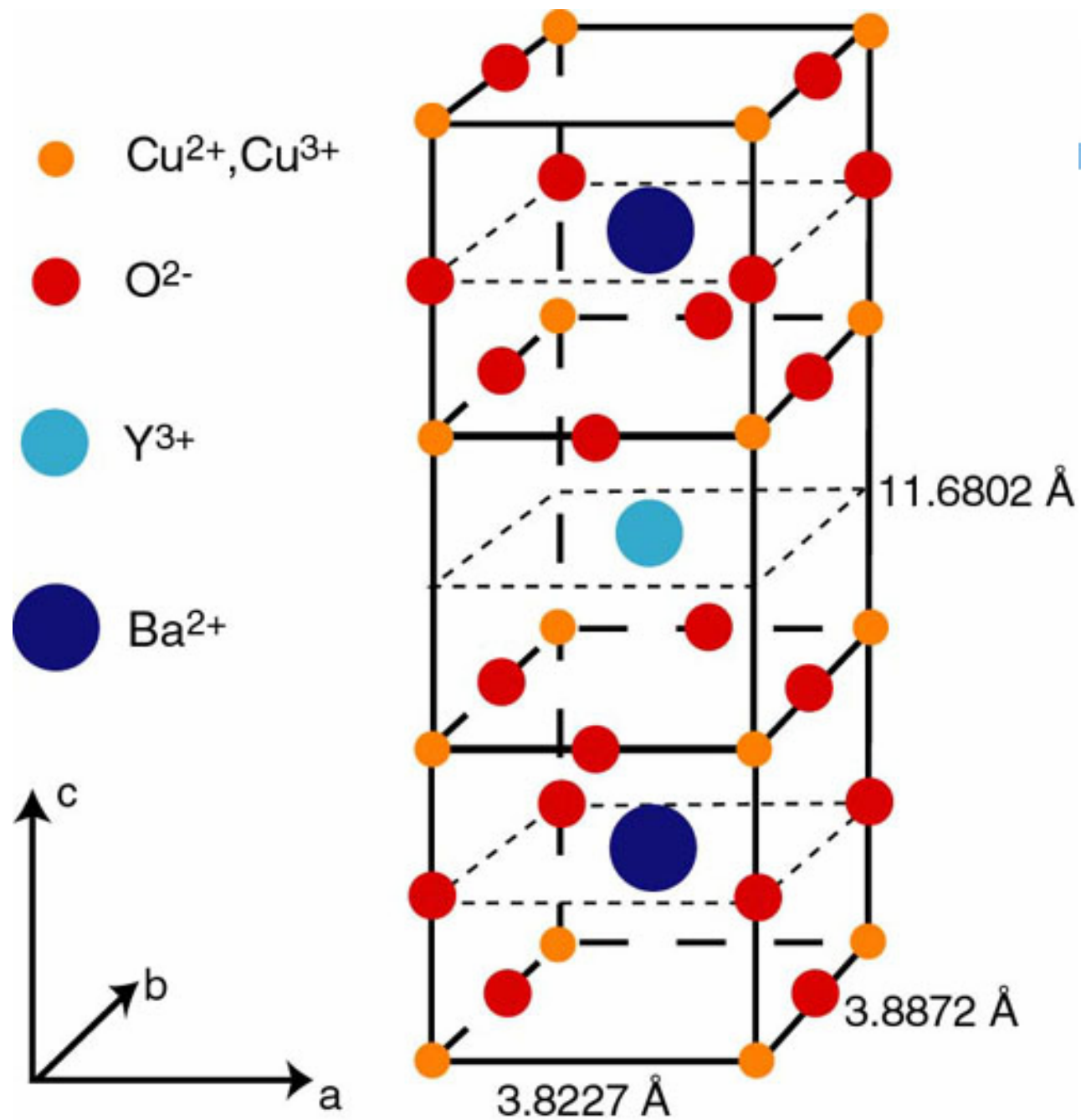
Conclusões

- Equipamentos e dispositivos supercondutores podem atender à crescente demanda por eficiência, estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico
- Surgem os primeiros equipamentos comerciais
- Aplicação em larga escala dependem de:
 - supercondutores com alto desempenho / baixo custo:
Eng. De Materiais, Química, Física, etc.
 - desenvolvimento de equipamentos: **Eng. Elétrica e Eletrônica**
 - desenvolvimento dos sistemas de refrigeração:
Eng. Mecânica, Física, etc.

OBRIGADO !

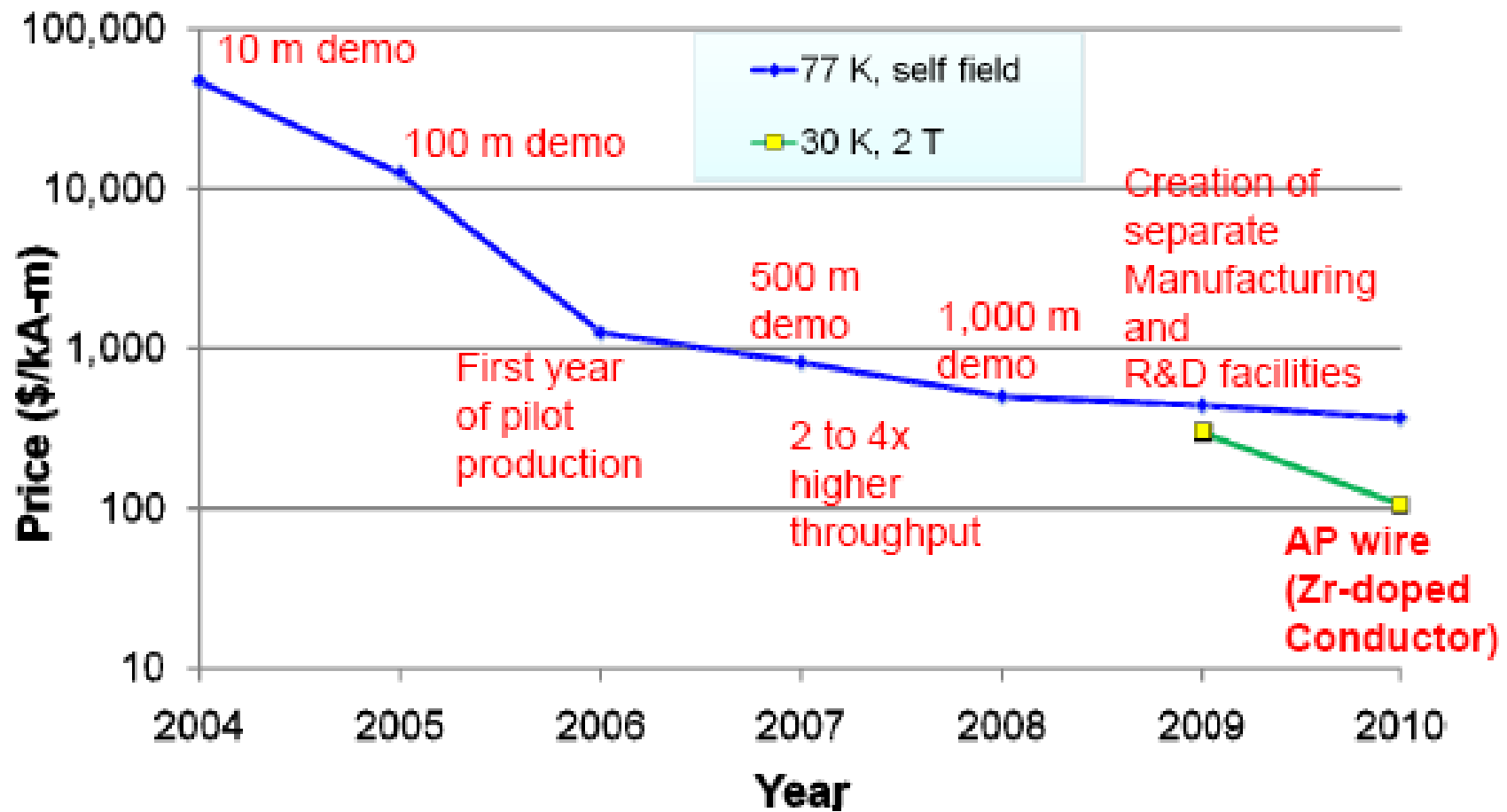
Alexander Polasek

polasek@cepel.br



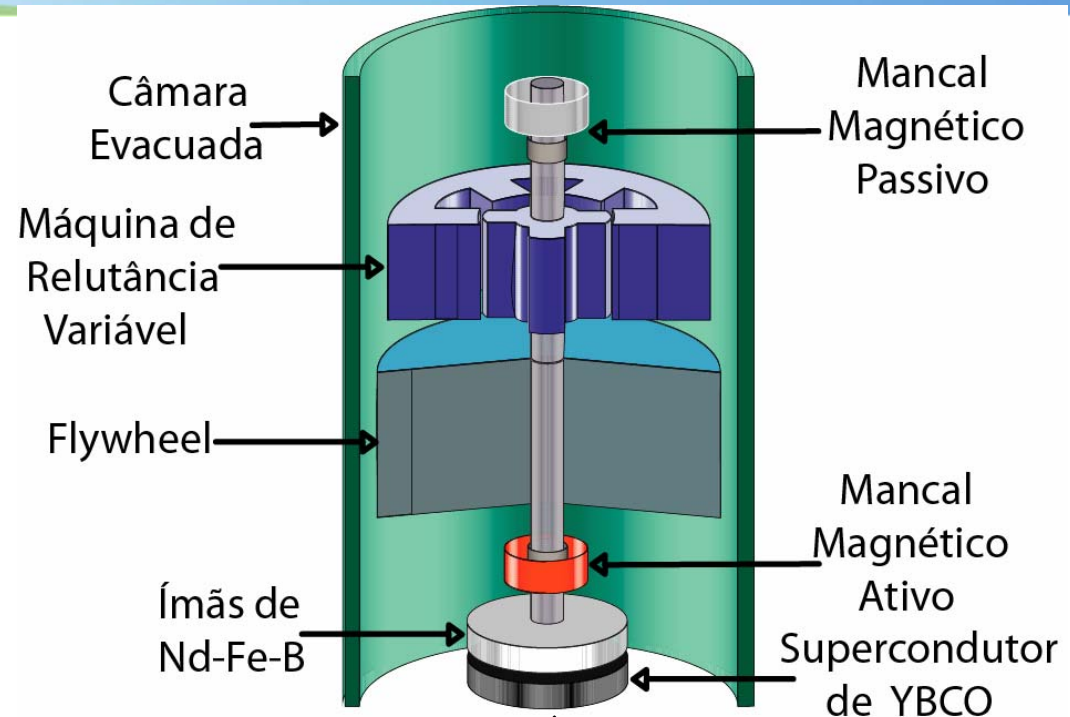
YBCO:
 $\text{YBaCu}_3\text{O}_{7-x}$

Rapidly decreasing price of coated conductors through technology advancements



Advanced conductors with improved pinning is now driving wire price down

Flywheel



$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2$$



Mancal Magnético Supercondutor