

MNPEF

Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



INSTITUTO FEDERAL
AMAZONAS

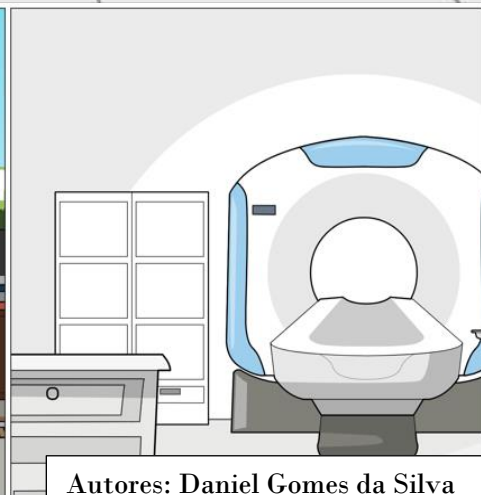
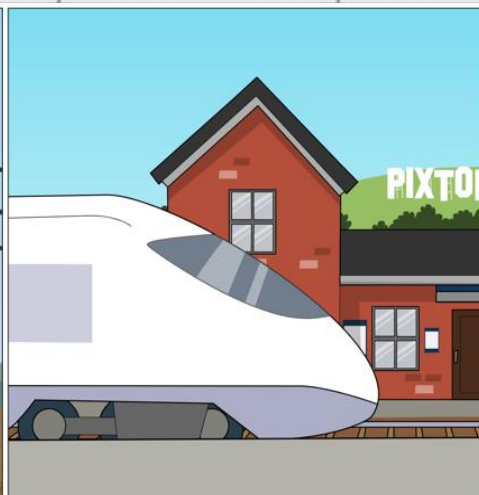


UFAM



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Aprendendo sobre a Supercondutividade com o Nando



Autores: Daniel Gomes da Silva
Márcio Gomes da Silva

PRODUTO EDUCACIONAL: Aprendendo sobre a Supercondutividade com o Nando.

Daniel Gomes da Silva
Márcio Gomes Da Silva

Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Centro

S586a Silva, Daniel Gomes da.
Aprendendo sobre a supercondutividade com o Nando / Daniel Gomes da Silva,
Márcio Gomes da Silva. – Manaus, 2022.
53 f. : il. color.

Produto Educacional proveniente da Dissertação - Abordagem do fenômeno da
supercondutividade na educação básica. (Mestrado Nacional Profissional em
Ensino de Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Amazonas, *Campus* Manaus Centro; Universidade Federal do Amazonas, 2022.
ISBN 978-65-88247-79-2

1. Ensino de física. 2. Supercondutividade. 3. História em quadrinho. I. Silva,
Márcio Gomes da. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Amazonas III. Universidade Federal do Amazonas. IV. Título.

CDD 530

APRESENTAÇÃO

Este Produto Educacional é parte integrante de uma pesquisa científica apresentada na Dissertação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, polo 4 – IFAM/UFAM. Os autores são o discente Daniel Gomes da Silva e o docente Dr, Márcio Gomes da Silva.

Optamos por uma história em quadrinhos com o intuito de facilitar o aprendizado do Fenômeno da Supercondutividade para os alunos da educação básica, seja no Ensino Fundamental, seja no Ensino Médio. Ademais, este trabalho foi balizado pelos pressupostos da Transposição Didática, de Ives Chevallard, da Aprendizagem Significativa, de David Ausubel e Joseph Novak, e do Conceito de Mapas Mentais, de Johnson Laird, principalmente.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nossa História em Quadrinho consiste em acompanhar a aprendizagem de dois alunos do ensino médio, Fernando (Nando) e seu amigo Rafael (Rafa) em relação ao Fenômeno da Supercondutividade. Neste enredo, veremos o esforço dos professores de Física (teóricos e experimentais) para motivar, os protagonistas e a turma, a partir de fatos históricos, de aplicações práticas e de mapas mentais.

Este conteúdo foi distribuído em 5 (cinco) capítulos. O 1º (primeiro) capítulo diz respeito aos principais fatos históricos que contribuíram para a descoberta da supercondutividade além de, a partir de exemplos de aplicações, motivar o aluno. O 2º (segundo) capítulo visa descrever as principais propriedades dos supercondutores, dentre as quais destacamos a resistividade zero e o efeito Meissner-Ochsenfeld. No 3º (terceiro) capítulo apresentamos as principais teorias que explicam o fenômeno da supercondutividade. O 4º (quarto) capítulo é dedicado a abordagem dos supercondutores do tipo I e do tipo II. O 5º (quinto) capítulo aprofundamos sobre a Criogenia, em especial a liquefação do Nitrogênio. Finalizamos nossa história em quadrinhos com o 6º (sexto) capítulo ao demonstrar algumas aplicações de supercondutores em grande escala e pequena escala.

Frisa-se que este Produto Educacional pode servir de apoio atinente ao conteúdo de Física Moderna e Contemporânea, no tocante ao tema da Supercondutividade.

Ótima leitura a todos,
Daniel Gomes da Silva
Márcio Gomes da Silva,
Manaus – AM, 2022

Sumário

CAPÍTULO 1: Descoberta da Supercondutividade.....	1
CAPÍTULO 2: Propriedades do Estado Supercondutor.....	8
CAPÍTULO 3: Teorias da Supercondutividade.....	16
CAPÍTULO 4: Tipos de Supercondutores.....	25
CAPÍTULO 5: Criogenia e a Supercondutividade.....	33
CAPÍTULO 6: Principais Aplicações Tecnológicas	40
REFERÊNCIAS.....	47

CAPÍTULO 1: Descoberta da Supercondutividade

Ela apresenta-se aos discentes.

Oi gente!

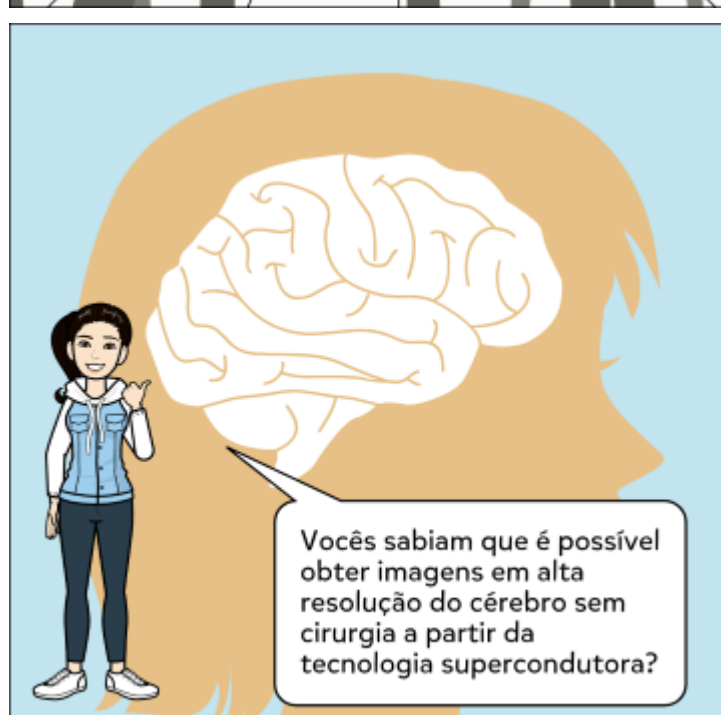
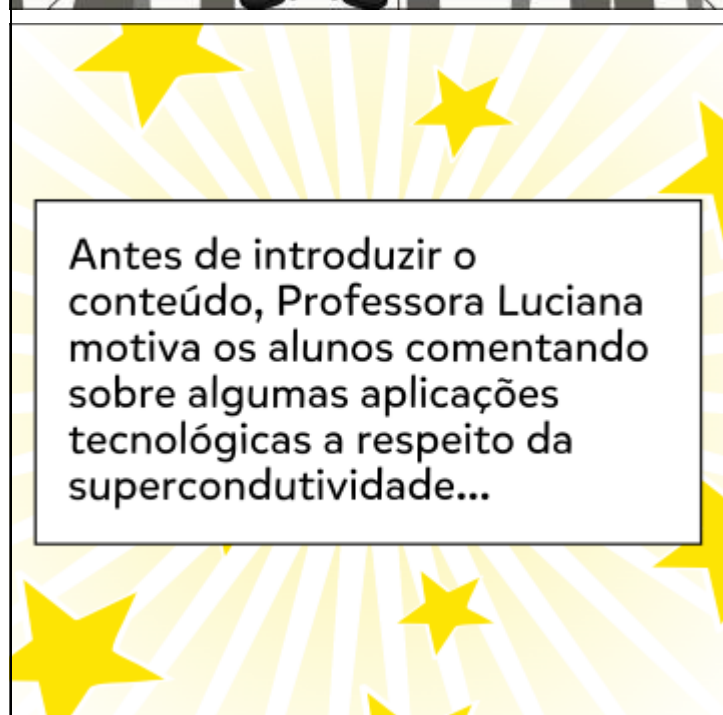
Vamos estudar o fenômeno da Supercondutividade..

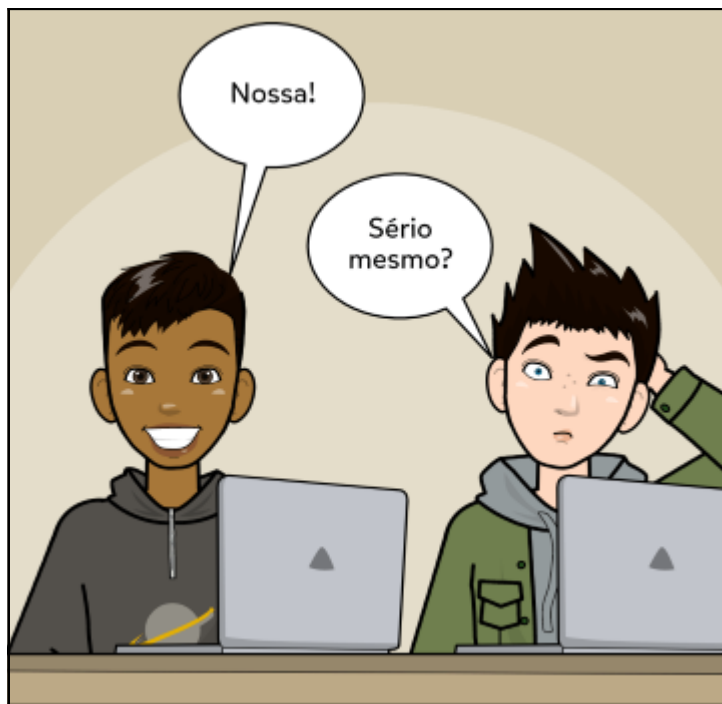
... a partir de uma abordagem histórica, teórica e posteriormente prática.

Luciana, professora de Física teórica, chega à sala.

Neste momento, professora Maud Souza entra na sala de aula...

A parte teórica sobre o conteúdo será apresentada por mim...





Nando lembra das aulas de Mecânica e fica animado para responder...



Os alunos ficam curiosos...



Seguindo a partir dos conhecimentos prévios dos alunos....



A partir desse conhecimento prévio, Professora. Luciana continua...



Professora Luciana responde:



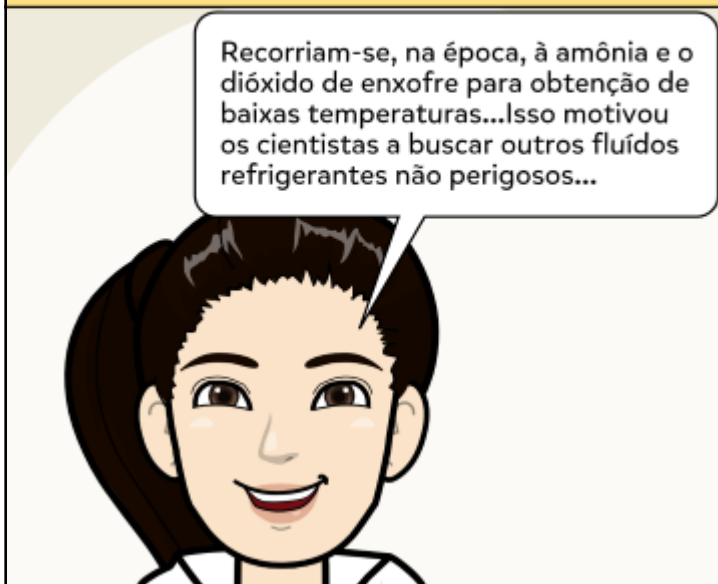
Os alunos ficam surpresos com essas aplicações tecnológicas da supercondutividade...



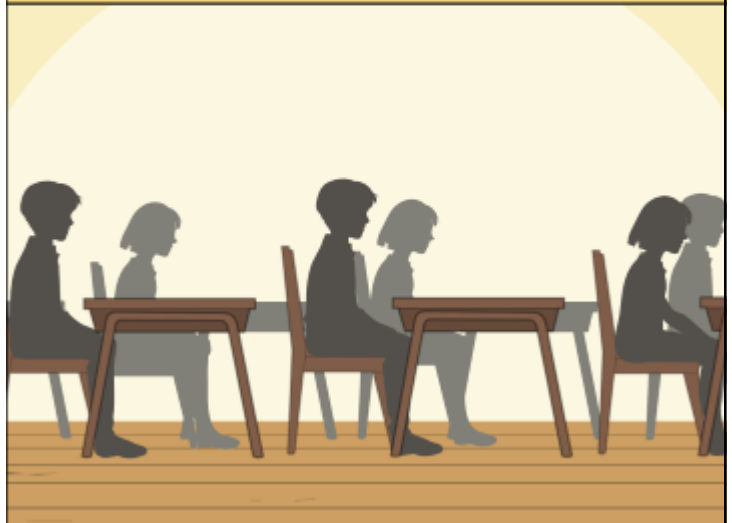
Logo, precisamos conhecer primeiramente a Ciência das Baixas Temperatura ou Criogenia. A palavra Criogenia (Crios = Frio; Genia = criação) diz respeito a ciência experimental especializada nas técnicas, processo e equipamentos para a obtenção de baixas temperaturas.



Os fluídos refrigerantes são substâncias utilizadas para obter temperaturas muito baixas. Mas utilizavam-se substâncias perigosas nos primórdios da Criogenia...



Com esse clima de curiosidade, professora Luciana começa a aula explicando que o fenômeno da Supercondutividade só foi possível após o desenvolvimento da Criogenia ou Física das Baixas Temperaturas...



... Na segunda metade do século XIX e início do XX, a comunidade científica almejava conhecer as propriedades da matéria em temperaturas criogênicas...



Nessa corrida para obtenção das baixas temperaturas próximas ao zero absoluto ($T=0\text{ K}$), a Universidade de Leiden destacou-se das demais...



Este é o laboratório Criogênico da Universidade de Leiden, Holanda... Pioneira na liquefação do Oxigênio, Nitrogênio e posteriormente o Hélio.



Estes são os cientistas que liquefizeram eficientemente o Hélio e com isso alcançaram temperatura mais próxima a zero Kelvin. Eles são: Heike K. Onnes (1853-1926) e seu assistente Jacob Clay (1882-1955).



Dominada a tecnologia da liquefação do Hélio, Heike K. Onnes, almejava descobrir como a matéria se comportava...



Os cientistas acreditavam, teoricamente, que a resistência elétrica diminui proporcionalmente com a diminuição da temperatura...

Ele começou a analisando os metais e suas propriedades elétricas. Fonte: (Reif-Acherman, 2011).



"O mercúrio foi um dos metais selecionados por ser mais fácil de obtê-lo com elevado grau de pureza." (Souza, 2011, p. 09).

Heike pegou uma amostra de mercúrio e o resfriou à temperatura abaixo de -296°C (4K). Com isso, ele percebeu que...

A resistência elétrica do Mercúrio se iguala, repentinamente, a ZERO abaixo de certo valor de temperatura T.

Dr. Onnes descobre a SUPERCONDUTIVIDADE. A este limiar de temperatura T, Dr. Onnes utiliza um termo específico da Física das Baixas Temperaturas:

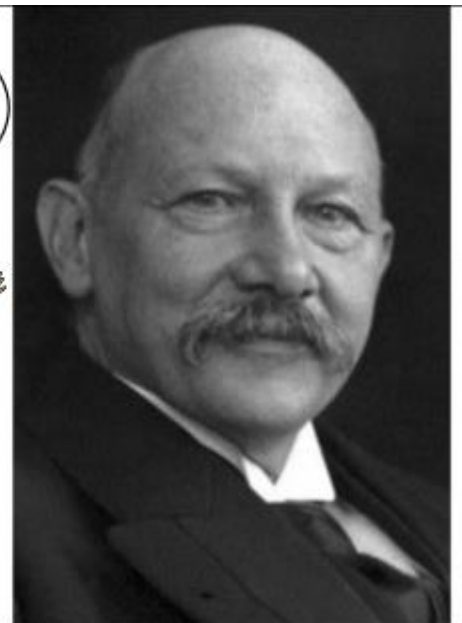
A este valor limiar de temperatura ao qual o Mercúrio adquire resistência elétrica igual a zero, é conhecida na área criogênica por "temperatura crítica = T_c ".

Neste momento, Professora Luciana fala da importância da descoberta da Supercondutividade.

Dada a importância da descoberta do Fenômeno da Supercondutividade ...

Dr. Heike K. Onnes recebeu o prêmio Nobel em Física no ano de 1913.

Este é Dr. Heike K. Onnes:





Ao final da aula os alunos Nando e Rafa comentam:



Nando ficou intrigado com o fato dos supercondutores apresentarem resistência elétrica zero a temperaturas extremamente baixas e pensou:



CAPÍTULO 2: Propriedades do Estado Supercondutor

Verificando os conhecimentos prévios dos alunos...

Antes de falarmos sobre os supercondutores, precisamos lembrar o que são isolantes, condutores e os semicondutores...



Material isolante. Fonte: (dos autores, 2021).

Plástico: isolante elétrico



Metal: condutor elétrico



Os materiais, quanto a passagem de corrente elétrica, podem comportar-se como isolantes ou condutores. Por exemplo, o cabo desta chave de fenda se comporta como isolante elétrico.

Material condutor. Fonte: (dos autores, 2021).

Metal: condutor elétrico

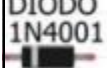
Plástico: isolante elétrico



Os metais são bons condutores de corrente elétrica. Este cabo é formado por uma parte interna com cobre para a passagem de corrente elétrica.

Semicondutores. Fonte: (dos autores, 2021).

DIODO 1N4001



CIRCUITO INTEGRADO



TRANSISTOR



LED Red (633nm)



LED2



DISPLAY



Os semicondutores, ora se comportam como isolante, ora como condutores. Estes são alguns componentes semicondutores.

A partir de agora aprofundaremos no conceito de Supercondutividade ...

...
Agora vamos aprofundar nosso entendimento sobre os Supercondutores !



Ela começa afirmando:

Os metais possuem a propriedade de diminuir sua resistividade elétrica a medida que sua temperatura diminui.

Teoricamente falando, a resistividade de um metal perfeitamente puro vai a zero quando a temperatura aproxima-se do zero absoluto.

Na prática, verifica-se que há uma certa resistividade residual devido as impurezas que os metais possuem ...

... além de imperfeições em sua estrutura cristalina e dessa forma resultam em um impedimento para a obtenção de resistividade zero nesses materiais.

Por outro lado, há materiais que apresentam um comportamento singular em relação aos metais.

Eles descrevem uma diminuição na resistividade a medida que são resfriados, mas quando sua temperatura diminui a valores próximos ao zero Kelvin (K), verificamos uma resistividade nula.

Nessa condição, o material chega ao conhecido ESTADO SUPERCONDUTOR.



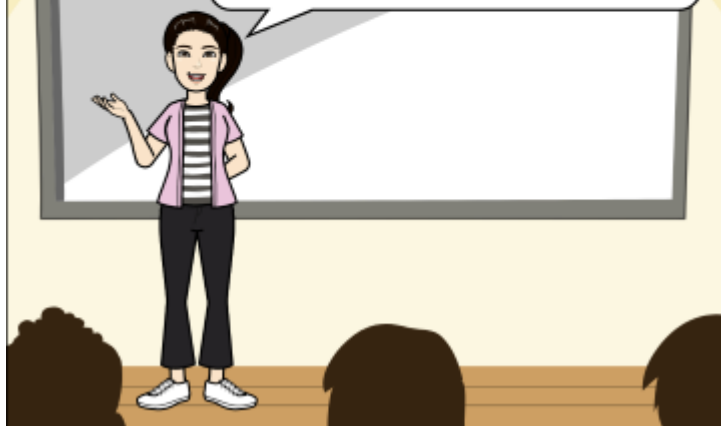
A resistividade nula é uma propriedade do estado supercondutor em que sua resistência elétrica é igual a zero quando esse material é submetido a uma determinada temperatura crítica (T_c) muito baixa.



A temperatura crítica também é chamada de Temperatura de Transição. Ela consiste na temperatura que todo material possui.



Vale ressaltar que a supercondutividade não é um fenômeno raro, pois boa parte dos materiais conhecidos como condutores, na temperatura ambiente, apresentam, abaixo de T_c , a resistividade nula.



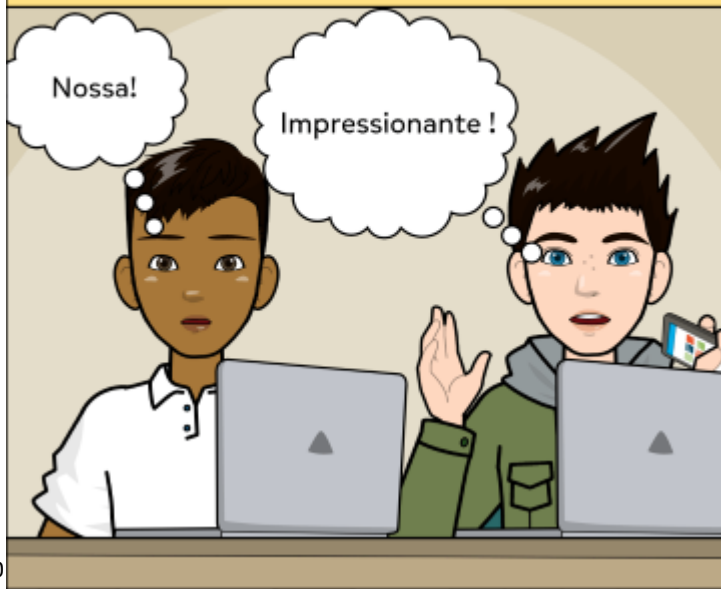
São exemplo de metais que apresentam propriedades supercondutoras: chumbo (Pb), Mercúrio (Hg), Alumínio (Al) e Titânio (Ti), principalmente. Entretanto, nem todo metal apresenta características supercondutora como o cobre (Cu) e o ouro (Au).



Com a afirmação de que os condutores de eletricidade, cobre e ouro, não apresentam o estado supercondutor a baixas temperaturas, os alunos ficam intrigados...

Nossa!

Impressionante!



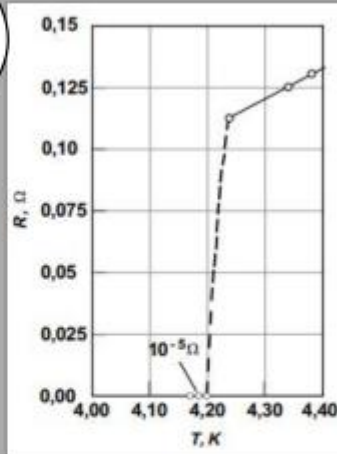
... Fantástico! O cobre por exemplo, presente na maioria dos cabos que conduzem corrente elétrica, mas não apresentam o estado supercondutor a baixas temperaturas !!!!

Como a Física é impressionante... !!

Professora Luciana prossegue com a explicação:

Vou mostrar um gráfico que descreve o comportamento da resistência elétrica do mercúrio em função temperatura obtida a partir dos estudos de Heike K. Onnes em 1911.

Este gráfico descreve a Resistência Elétrica vs Temperatura.



Fonte: (Souza 2012, p. 10).

Neste momento, a professora busca a participação ativas dos alunos ...

Alguma pergunta meus queridos alunos?

Neste momento, Fernando faz a seguinte pergunta:

Professora, a resistividade nula é a única propriedade que os materiais supercondutores apresentam?

Deixa eu pensar...

Em seguida, professora Luciana responde:

Essa **NÃO** é a única propriedade que os materiais supercondutores apresentam, como veremos mais adiante !

Além da resistência nula, um material em estado de supercondutividade apresenta também a característica de ser diamagnético perfeito.

A descoberta dessa propriedade é importante, pois a resistência nula não pressupõe diamagnetismo perfeito.

Antes de prosseguir com o conteúdo, Professora Luciana verifica alguns subsunçores: Fonte: (dos autores, 2021).

Material Diamagnético:
cabo de Cobre

Os materiais quanto a interação com o campo magnético são classificados como: ferromagnéticos, diamagnéticos e paramagnéticos.

Material ferromagnético. Fonte:(dos autores, 2021).

Ímãs de Neodímio

Material ferromagnético

Os materiais ferromagnéticos são atraídos pelo campo magnético enquanto que os diamagnéticos são repelidos.

Materiais paramagnéticos...

Já os paramagnéticos são fracamente atraídos pelos ímãs. São eles: Alumínio, Magnésio, Bário, basicamente.

Voltando ao conteúdo dos supercondutores:

A qualidade de diamagnetismo perfeito nos supercondutores foi batizada por efeito Meissner, em homenagem ao físico alemão Walther Meissner, cuja descoberta foi realizada em 1933.



... , ou seja, a permeabilidade magnética (μ) deve ser menor que a permeabilidade magnética do vácuo (μ_0). Em outras palavras a razão μ/μ_0 deve ser menor que um (1).



Acompanhem minha explicação a partir destas imagens: ...



Considerando a indução magnética B (campo magnético na amostra), definida por: $B = \mu H$, sendo μ a permeabilidade magnética do meio e H a intensidade do campo magnético externo. Um material para ser considerado diamagnético apresenta um valor de μ menor que μ_0 ...

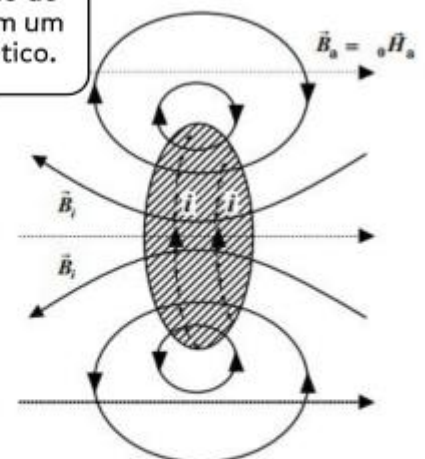


Sendo B = campo magnético dentro da amostra e H o campo magnético externo, exemplo: imã.

Supondo $B=0$, temos como consequência um $\mu=0$, com isso, percebemos que um material supercondutor pode ser considerado como um material diamagnético perfeito.



Meus queridos alunos, vejam a distribuição de fluxo magnético em um material diamagnético.



Fonte: (OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998, p.274).

Agora, vejamos o comportamento de um corpo no que não apresenta densidade de fluxo resultante no seu interior igual a zero quando um campo magnético é aplicado. A esse comportamento chamamos de diamagnetismo perfeito.

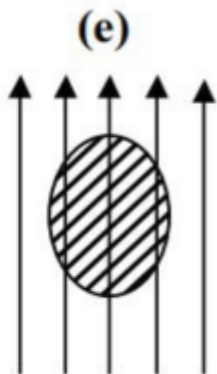


Fonte:(OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998, p.275).

Um condutor está em temperatura ambiente e nele é aplicado um campo magnético com densidade de de fluxo interno praticamente igual ao campo aplicado.



Temperatura ambiente

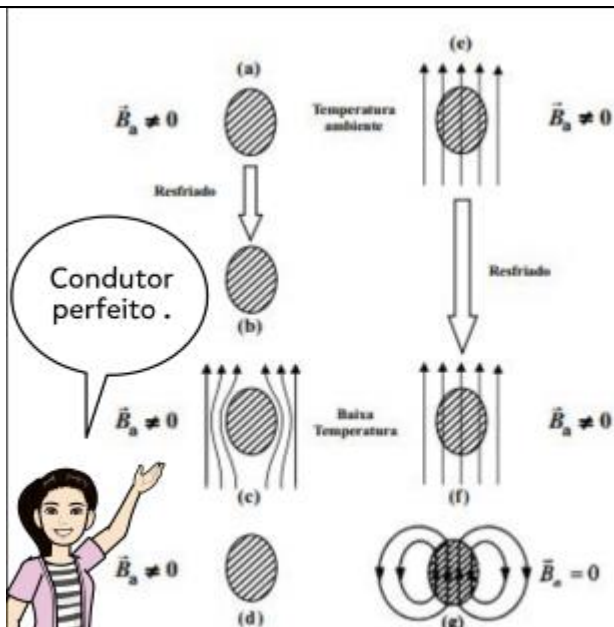


(OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998, p.275).

(OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998, p.275).



Aqui vemos diferentes estados de magnetização com condições externas iguais. Logo, o estado de magnetização em um condutor perfeito não é unicamente determinado por condições externas mas recebe influência da sequência que resultaram nestas condições.

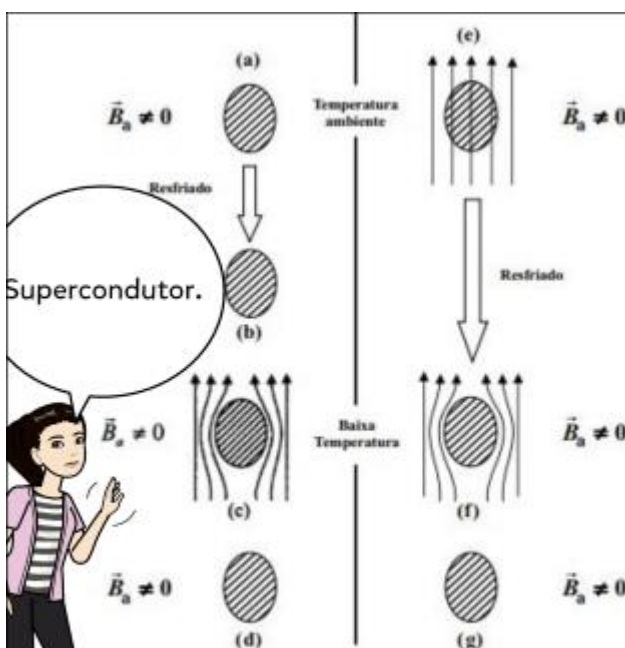


(OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998, p.275).

(OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998, p.275).



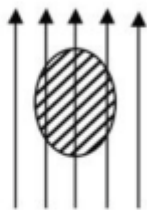
Após o resfriamento, o condutor com mesmas condições de temperatura apresentam comportamento diferentes.



(OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998, p.276)



Temperatura ambiente



Meissner e Ochsenfeld perceberam que em materiais supercondutores, diferentemente do condutor perfeito, o fluxo magnético interno cancelam-se espontaneamente tornando-se diamagnéticos perfeitos.

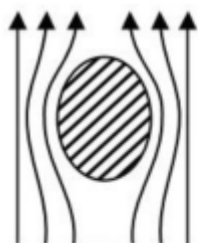
Resfriado



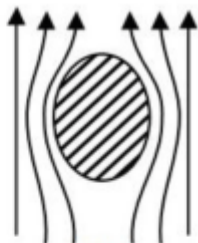
Resfriado



Eles perceberam que os supercondutores possuem, além da resistividade nula, a propriedade de expulsar as linhas de fluxo magnéticas do seu interior. Fenômeno conhecido por Efeito Meissner.



(b)



(f)

Baixa Temperatura



(d)



(e)

"O estado final do supercondutor depende somente dos valores de campo aplicado e temperatura e não da sequência na qual estes valores foram obtidos."(OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998, p.276)

Fora da escola, Nando e Rafa comentam sobre o que aprenderam na aula de Física:

Nando, eu tô gostando muito desse conteúdo de Física. E você?

Eu também Rafa, mas eu tenho uma dúvida...

Será que há uma teoria que explica o fenômeno da Supercondutividade?

Boa pergunta Nando!

CAPÍTULO 3: Teorias da Supercondutividade

Professora Luciana vai comentar sobre as teorias que explicam o fenômeno da supercondutividade.





Nessa Teoria há duas equações que descrevem o campo elétrico e magnético no interior do supercondutor.



A primeira equação de London diz respeito a resistividade nula.



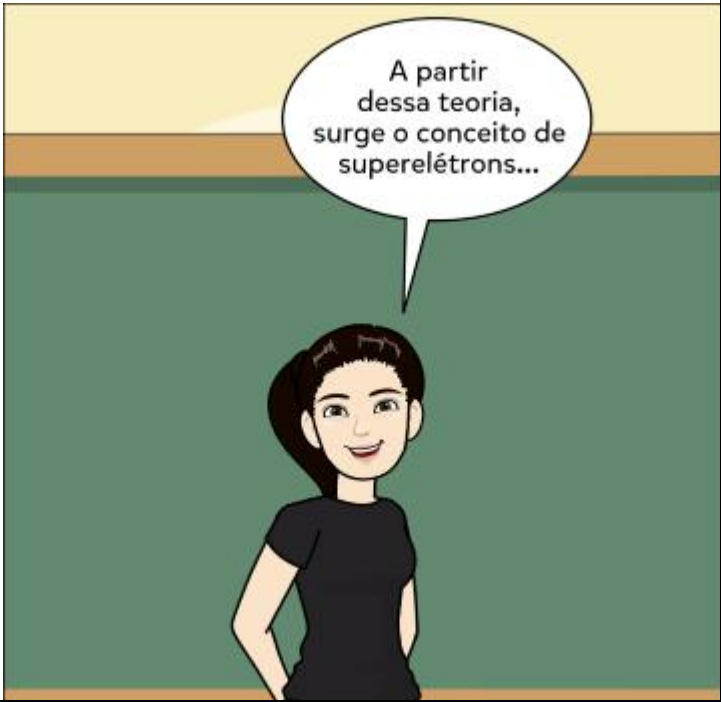
A segunda equação de London visa explicar o efeito Meissner.



Estudaremos esse efeito mais adiante.



A teoria de London é considerada uma teoria clássica acerca do fenômeno da supercondutividade.



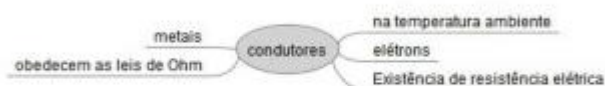
A partir dessa teoria, surge o conceito de superelétrons...

Os superelétrons são responsáveis pela supercondutividade e NÃO são afetados pela resistência elétrica...

Diferentemente dos elétrons normais que obedecem a lei de Ohm e são afetados pela resistência elétrica. Por isso, dissipam energia por Efeito Joule.

Neste momento, Professora Luciana compara as características dos condutores e dos supercondutores a partir de mapas mentais. Fonte: Dos autores (2021).

MAPA MENTAL 1: CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CONDUTORES.



MAPA MENTAL 2: CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SUPERCONDUTORES, COM A TEORIA DE LONDON.



Outra teoria que descreve o fenômeno da supercondutividade é teoria de Ginzburg-Landau .

No ano de 1950, os cientistas russos L. D. Landau e V. L. Ginzburg apresentaram uma teoria com a finalidade de explicar as propriedades termodinâmicas da transição do estado normal para o estado supercondutor.

Essa teoria apresenta um avanço em relação a teoria anterior, por se tratar de uma teoria que leva em consideração fundamentos da mecânica quântica.

A teoria de Ginzburg-Landau parte da premissa de que há uma densidade de superelétrons (N_s) e elétrons normais ($N - N_s$), sendo N a densidade total dos elétrons em um metal.

O comportamento dos superelétrons é descrito como uma função de onda Ψ , cuja interpretação física é dada por: $|\Psi|^2 = N_s$. Não vamos aprofundar no formalismo matemático dessa teoria...

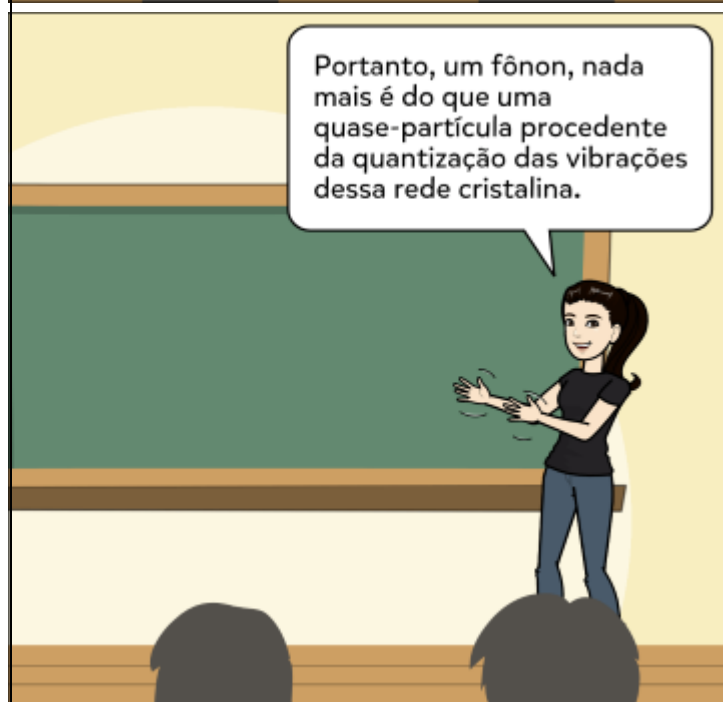
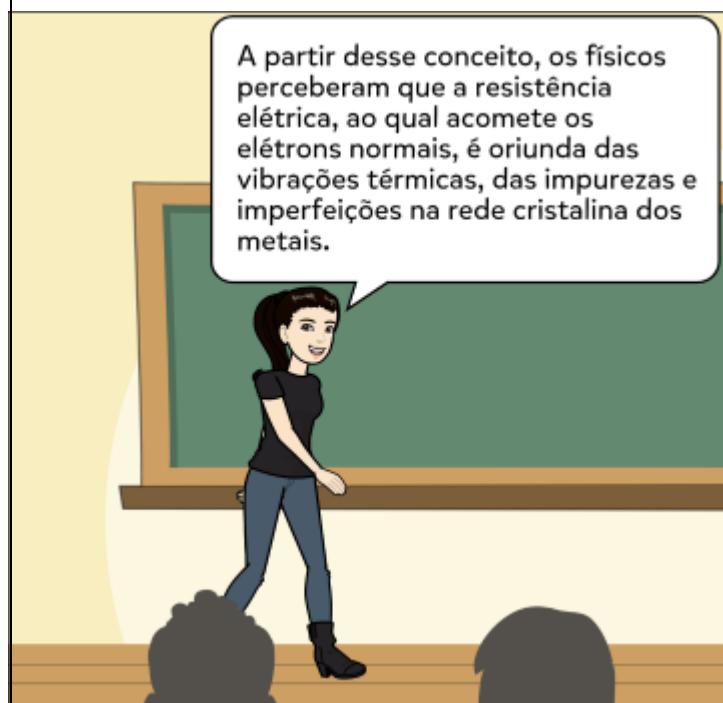
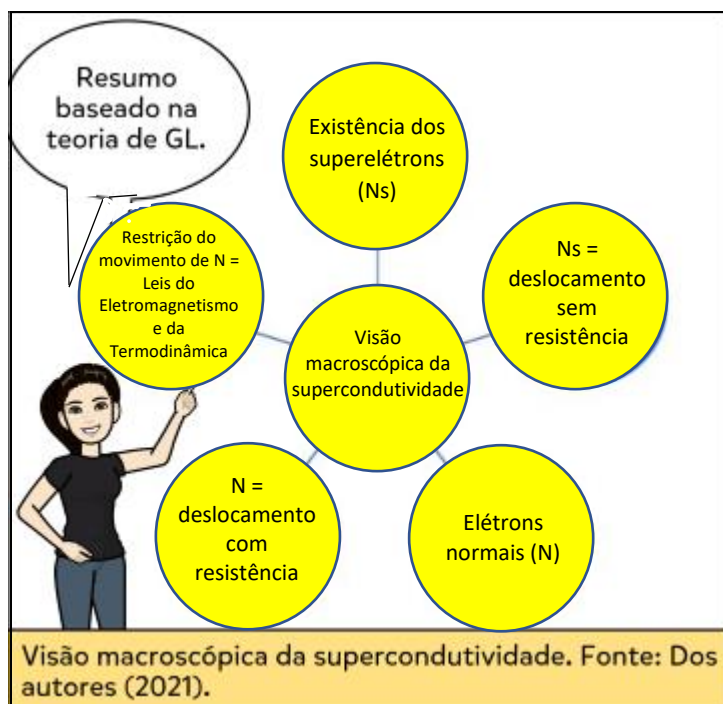
...
mas vamos apresentar algumas previsões extraídas dela:

1º existência de um campo crítico termodinâmico (H_c). Acima dele o metal passa de um estado supercondutor para o estado normal.

Lembrando que devemos considerar que o material já está a uma temperatura abaixo de T_c .

2º Comprimento de penetração (λ_L). Obtido a partir da minimização da energia livre com campo aplicado em relação ao potencial vetor e considerando o parâmetro de ordem Ψ não varia com a posição, logo $\nabla\Psi = 0$.

3º Comprimento de coerência (ξ): "O comprimento de coerência representa o comprimento ao longo do qual o parâmetro de ordem Ψ varia (mede a escala de variação espacial de Ψ). A equação unidimensional que a define é: $\xi^2(T) = \hbar^2 / 2m|\alpha|$ "



Com o aprofundamento dessa ideia, percebeu-se que a interação elétrons-fônon, na verdade, pode resultar na interação atrativa entre dois elétrons dentro da rede cristalina...



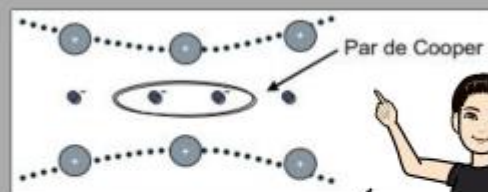
... com o deslocamento da rede cristalina mais um certo atraso temporal, resulta nas condições ideais para a formação de pares de elétrons. Posteriormente,...



... o físico Leon Cooper, demonstrou que, em certas condições, é possível a formação de pares de elétrons no interior de uma rede cristalina. Posteriormente, batizada de pares de Cooper.



Frisa-se que os pares de Cooper são a forma correta de interpretação dos superelétrons, definidos nas duas teorias anteriores.



Vejam o comportamento do par de Cooper na rede cristalina do metal.

Referência: (COSTA; PAVÃO, 2012, p.7)

Esses subsídios são unidos em uma formulação teórica batizada por : Teoria BCS.



O acrônimo BCS se refere as iniciais dos cientistas John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer.



John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer, respectivamente.



Devido a importância desta teoria, eles receberam o Prêmio Nobel de Física em 1972.



Diante do exposto, podemos concluir que ...



1º A luz das ideias da Mecânica Quântica, depreendemos que a supercondutividade é um fenômeno quântico em escala macroscópica;

Por quê? Professora!!

Em linhas gerais: Devido a um estado coletivo, como o Estado Supercondutor descrito pela teoria BCS, usa como base um acoplamento fraco, exibindo comportamentos quânticos que podem ser observados em toda a amostra.



2º A supercondutividade é, na verdade, uma maneira que a natureza tem para organizar as partículas no interior de um material condutor.



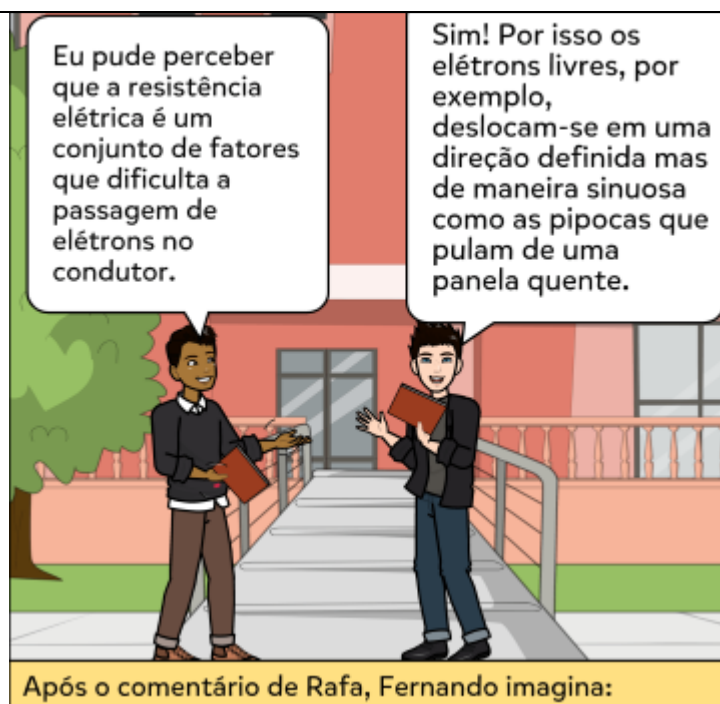
Tchau queridos. A partir da próxima aula teremos a presença da professora Maud Souza.

Tchau professora !!!



Fora da escola, Fernando e Rafael cometam sobre o que aprenderam na aula...







CAPÍTULO 4: Tipos de Supercondutores

Esta parte será apresentada pela professora de Física Experimental, Maud Souza.

A partir de agora, o foco das aulas será direcionado para uma abordagem prática...

Professora Maud chega à sala de aula.

Oi queridos !

Oi professora!

Professora Maud inicia a aula explicando a respeito de uma forma de classificar os supercondutores (SC).

Vamos falar sobre a classificação dos supercondutores do tipo I e II.

Existem outras classificações dos SC? Professora Maud!

Classificações dos SC:

Há a High Temperature Critical (HTS) e a Low Temperature Critical (LTS); Além da classificação dos Supercondutores Convencionais e Não-Convencionais.

Os supercondutores do Tipo I.

Começando com a evolução história da T_c e seus supercondutores correspondentes.

A partir de sua descoberta, a supercondutividade, foi objeto de pesquisa cuja finalidade era de encontrar materiais que apresentassem essa propriedade...

... Naturalmente, os metais foram os primeiros materiais a serem pesquisados, devido ao fato de serem bons condutores de eletricidade em temperatura ambiente.

ANO	T_c (K)	MATERIAL
1929	9,25	Nióbio
1941	16	Nióbio-Nitrogênio
1953	17,5	Vanádio-Silício
1986	23,2	Nióbio-Germânio

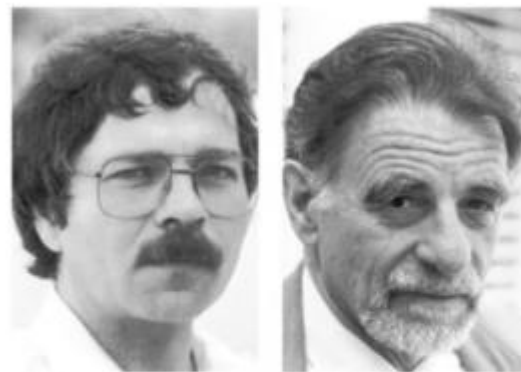
Vejamos a evolução de T_c e seus respectivos materiais supercondutores.

Adaptado de (BRANÍCIO, 2001, p.381)

Nos anos 80, os físicos descobrem que há cerâmicas com propriedades supercondutoras. Surge então a chamada: "supercondutividade em altas temperaturas".

Importante lembrar que para supercondutividade em altas temperaturas a teoria BCS é ineficaz para explicar seu comportamento !!

Os cientistas Alex Muller e Georg Bednorz descobrem a primeira cerâmica supercondutora: $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$, em 1986.



Devido a importância desta descoberta, eles foram laureados com o Prêmio Nobel em Física de 1987.



Fonte: (Unicentro)

Vejam a importância dessa descoberta: A existência da supercondutividade em materiais (cerâmica) que são isolantes elétricos.



Avançando no estudo das cerâmicas supercondutoras, os físicos descobrem o composto $\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.3}$, com T_c de 138K. Outra vitória para ciência.

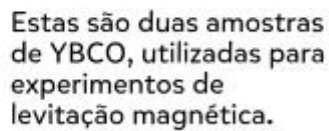


Uma verdadeira revolução na Física ocorreu com a descoberta, 1986, do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ou YBCO, pelos cientistas Paul Chu e Mang-Kang Wu.



A supercondutividade é notada neste material à temperatura de 93K, acima da temperatura de liquefação do nitrogênio, que é de 77K.





Temperatura Crítica (K)

Anos

Evolução da Tc!

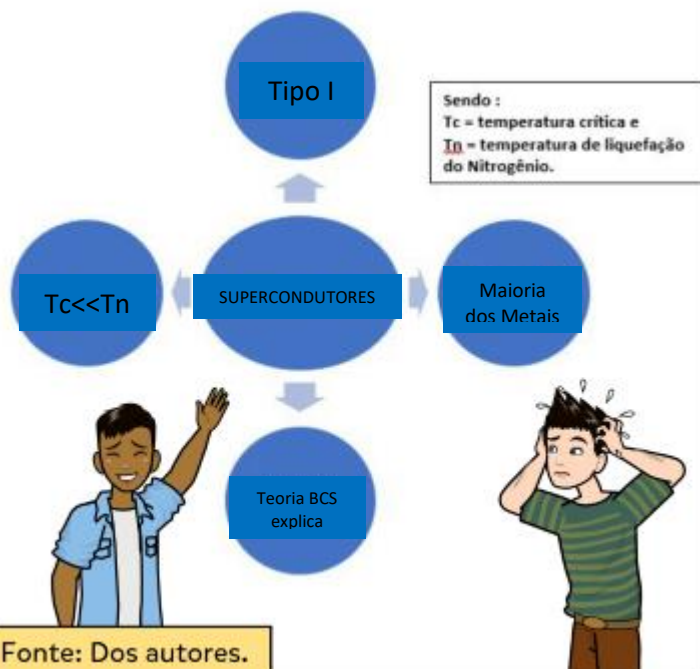
Fonte: (Lepich, 2017).

Apesar do estudo com ligas metálicas ser deixada de lado, a comunidade científica fica animada com a descoberta em 2001 do composto metálico MgB_2 e sua T_c de 39,2K.

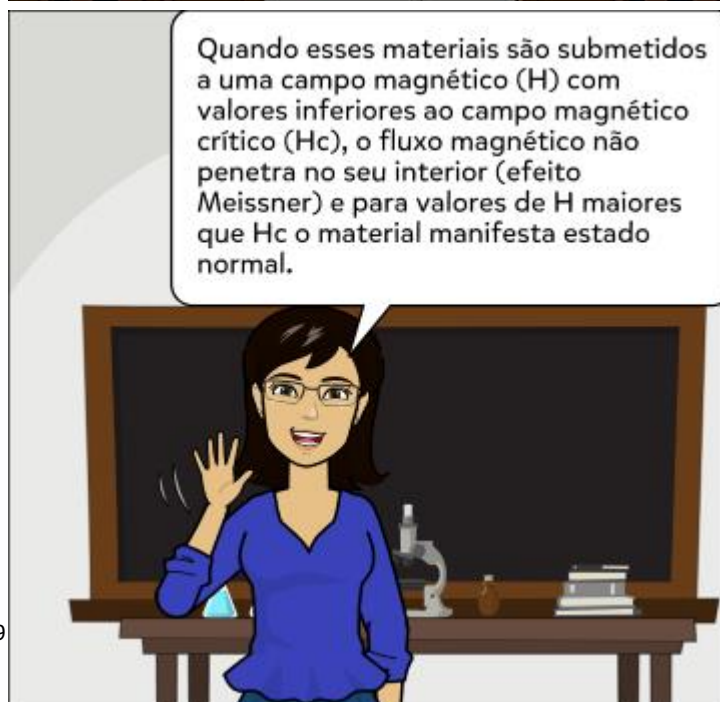
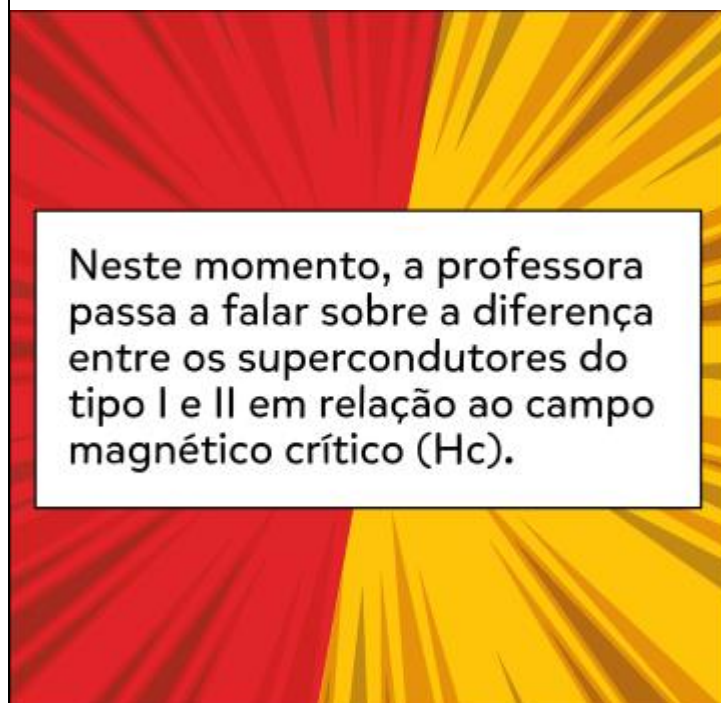
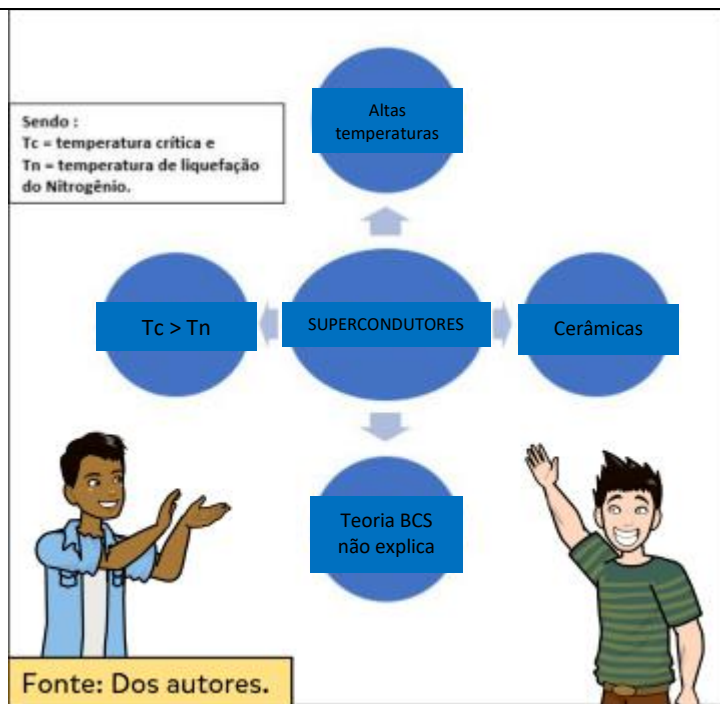
Cada vez mais as pesquisas com supercondutores alcança valores de T_c mais próximos à temperatura ambiente !

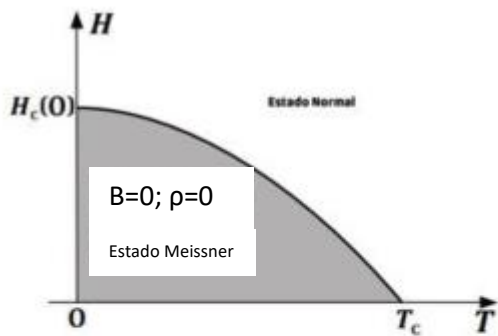
Que
maravilha !!

Rafa, eu consigo resumir o que vimos até aqui com o seguinte mapa mental:



Fonte: Dos autores.





Este gráfico nos mostra o comportamento do campo magnético (H) nos supercondutores do tipo I.

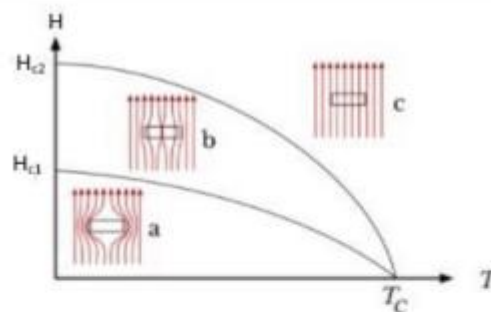
Fonte: (MORI, 2008, p.24).

... De fato, a exceção é a utilização do Diboreto de Magnésio (MgB_2). Muito utilizado na fabricação de fios e fitas supercondutoras.

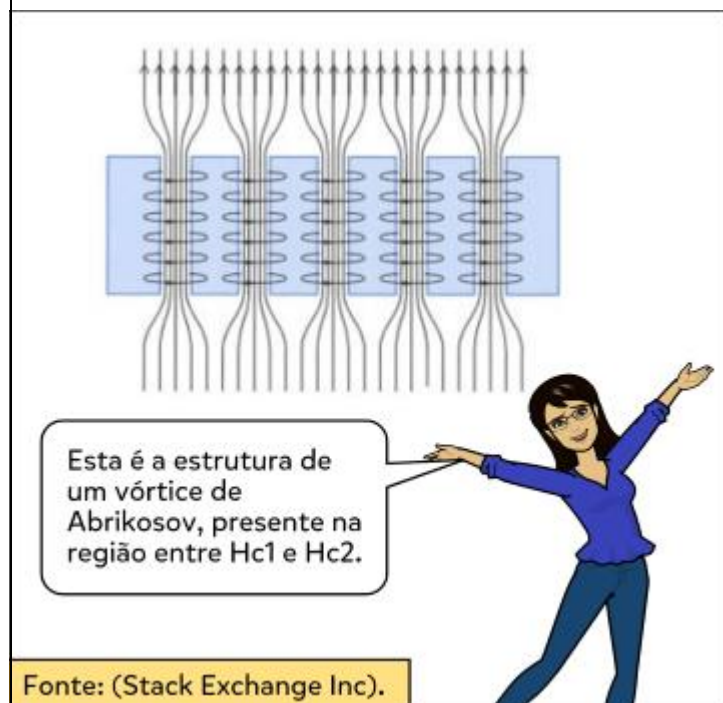
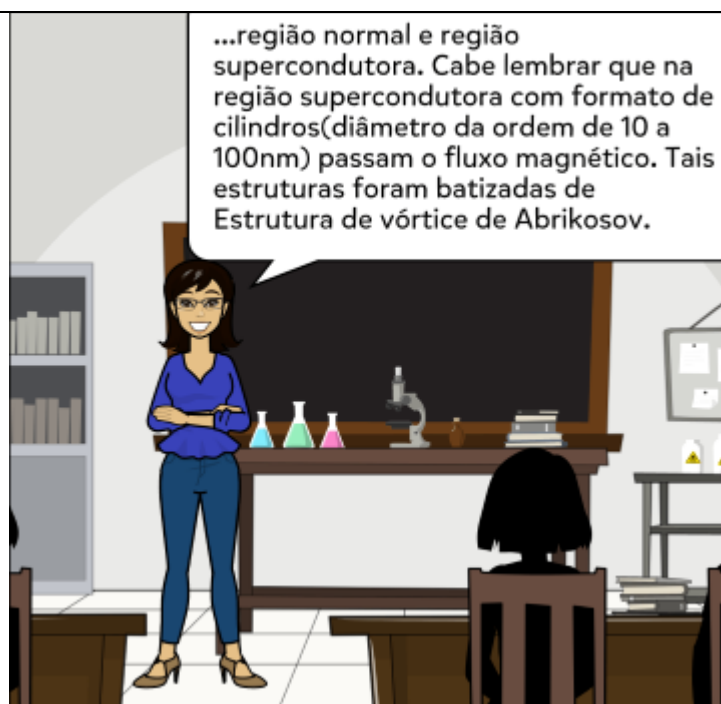
Falando agora dos supercondutores do Tipo II.

Na presença de H , os do tipo II apresentam dois tipos de campos críticos (H_{c1} e H_{c2}). H_{c1} é o campo abaixo da qual ocorre o efeito Meissner...

...Entre H_{c1} e H_{c2} , há uma penetração parcial do fluxo do campo magnético no interior do material, mas ainda há o estado supercondutor. Mas em valores acima de H_{c2} não há supercondutividade.



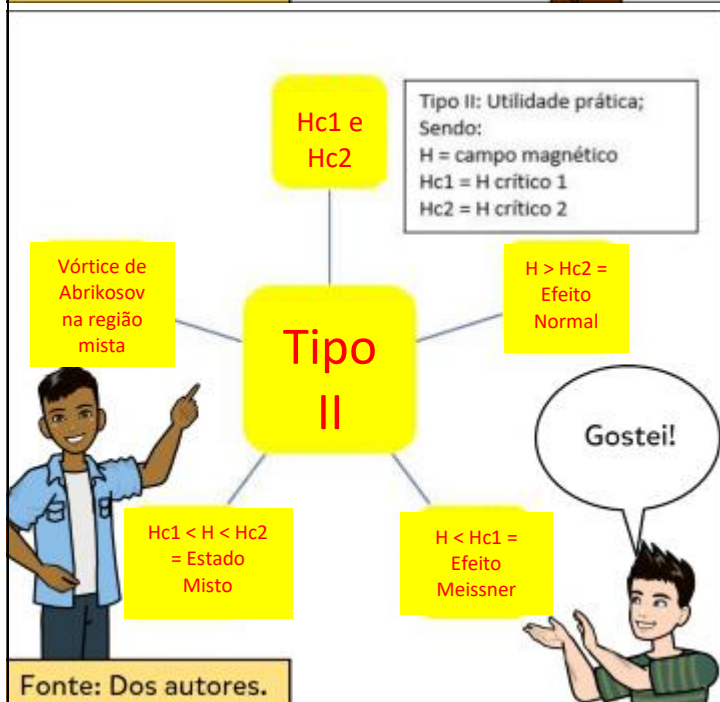
Fonte: (Stringfixer).



Fora da sala de aula, nossos protagonistas comentam:



Fonte: Dos autores.



Fonte: Dos autores.



CAPÍTULO 5: Criogenia e a Supercondutividade

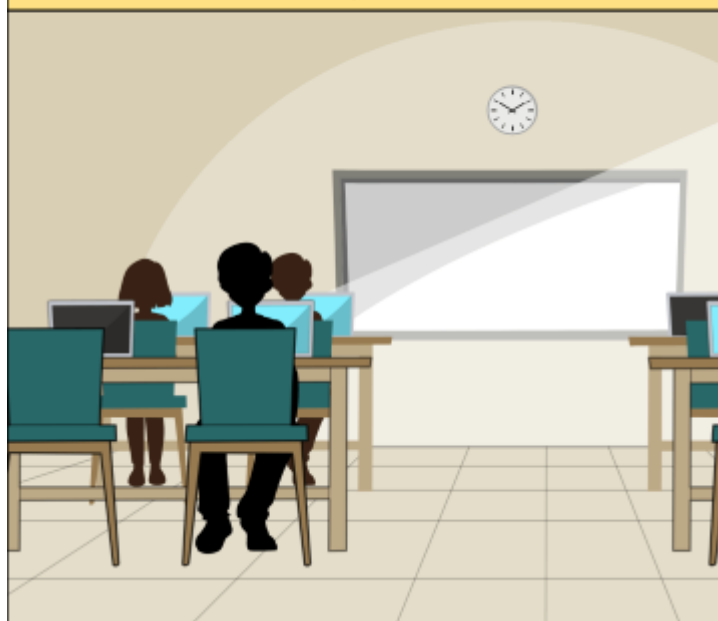
Nesta aula será apresentada uma breve visão sobre a Criogenia e sua implicação na descoberta do fenômeno da Supercondutividade. Posteriormente, os alunos terão a oportunidade de conhecer (visitação) o processo de fabricação do Nitrogênio líquido (NL).



Oi queridos !
Vamos retomar
nosso estudo?

Sim professora !

A etapa 1 da aula: Abordaremos a história da Física das baixas temperaturas e a liquefação do Hélio.



Queridos, o desenvolvimento tecnológico para liquefação do Hélio, no início do século XX, foi o primeiro passo para a descoberta da supercondutividade.

A Supercondutividade só foi possível com o desenvolvimento da Física de baixas temperaturas. Ela conectou uma diversidade de pesquisas de muitos cientistas de vários países, principalmente da Europa do século XIX e início do XX.

Enfatizarmos que a liquefação dos gases nobres, com destaque para o Hélio contribuiu para o progresso em diversidade de áreas como: medicina, eletrônica, geração de energia, comunicações, só para citarmos algumas.

A liquefação bem sucedida do Hélio foi realizada em 10 de junho de 1908, no laboratório criogênico da Universidade de Leiden, Holanda, pelo Dr Heike K. Onnes.

Veja a placa em alusão à primeira liquefação do Hélio:



Fonte: (Wikiwand).

Dr Onnes, reuniu a tecnologia, infraestrutura criogênica e teorias fundamentais que três anos mais tarde culminaram com a descoberta da Supercondutividade.

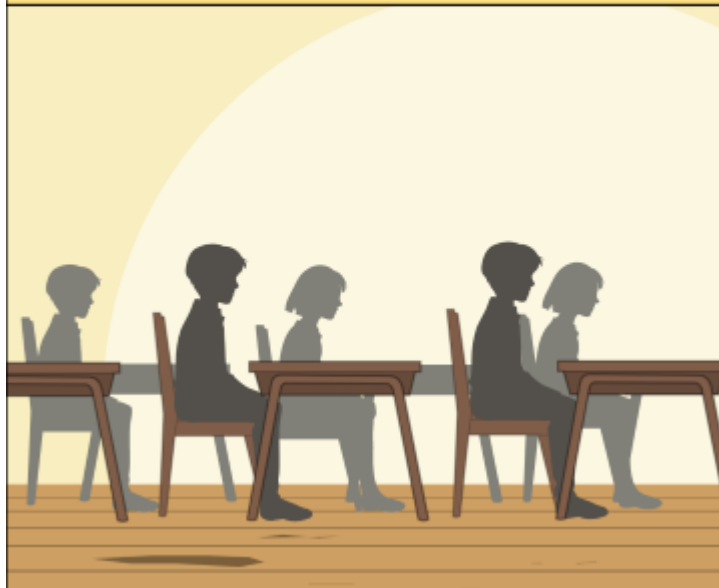
Doutor Onnes visava verificar experimentalmente a teoria dos gases ideais de Van der Waals. Essa foi a motivação que viabilizou o estudo da matéria em temperaturas cada vez mais baixas.

Dr Onnes tinha a sua disposição um dos mais modernos laboratórios criogênicos da época. Nele foi liquefeito primeiramente o Oxigênio (90,15 K), posteriormente o Nitrogênio (77,15 K) até a liquefação bem sucedida do Hélio (2,15 K).

Com a liquefação do Hélio foi possível chegar o mais próximo do zero absoluto (0 K).



Neste momento, a professora informa sobre a visita à empresa especializada na fabricação de gases e líquidos...



Agora vamos conhecer o processo de liquefação do Nitrogênio e pegar um pouco dessa substância para fazermos uma experiência ao término deste conteúdo.



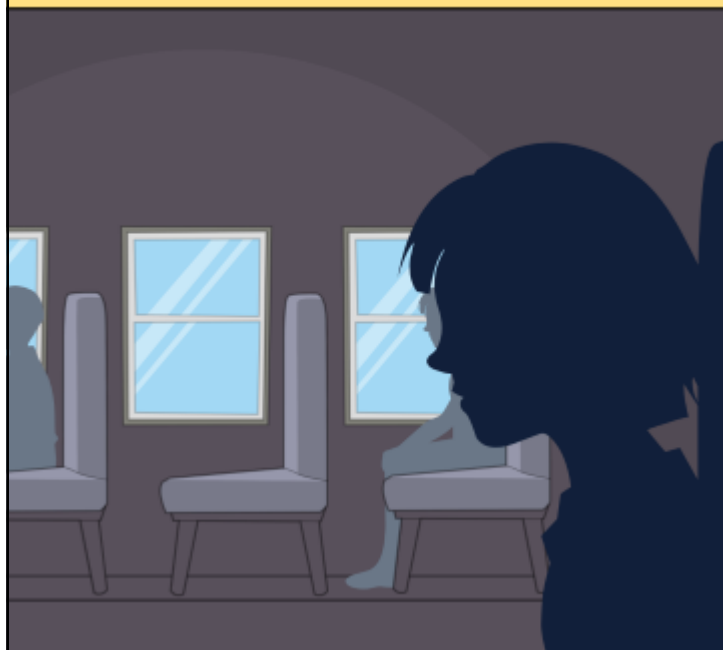
Oba !!!

Legal !!!

A turma se encaminha ao ônibus escolar.



Dentro do ônibus escolar, Nando e Rafa conversam...



Que legal !
Vamos ver na prática
como é a Física das
baixas temperaturas !

É mesmo
Rafa! Mas eu
tenho uma
dúvida!!!





O silêncio toma conta e os dois não falam mais nada até a chegada à empresa.



Prof. Márcio leva a turma para dentro da empresa.





Neste momento, Nando e Rafa lembram da conversa que tiveram no ônibus escolar.



Todo gás, sob compressão, liquefaz-se a uma determinada Temperatura Crítica (T_c).



Cada gás tem uma T_c para o estado líquido. Por exemplo: A T_c do Oxigênio é $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $90,15\text{ K}$, a do Nitrogênio é $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 77 K .



O NL é produzido em uma unidade de separação de ar e fabricado nesta máquina de destilação criogênica.



Todo o acompanhamento das variáveis físicas para a produção do NL é automatizada.



Após a explicação, ele vão à sala de automação do processo produtivo.

Esta sala é responsável pela automação do processo de produção do NL. Aqui temos o controle automático das variáveis físicas: temperatura crítica, volume, pressão.



Esta é um Sistema Supervisório, onde ocorre o monitoramento e controle dos sensores e atuadores localizados ao longo do processo.



Após o processo de produção, temos que distribuir o NL.



O NL segue para: Hospitais, clínicas e indústria alimentícia, principalmente.

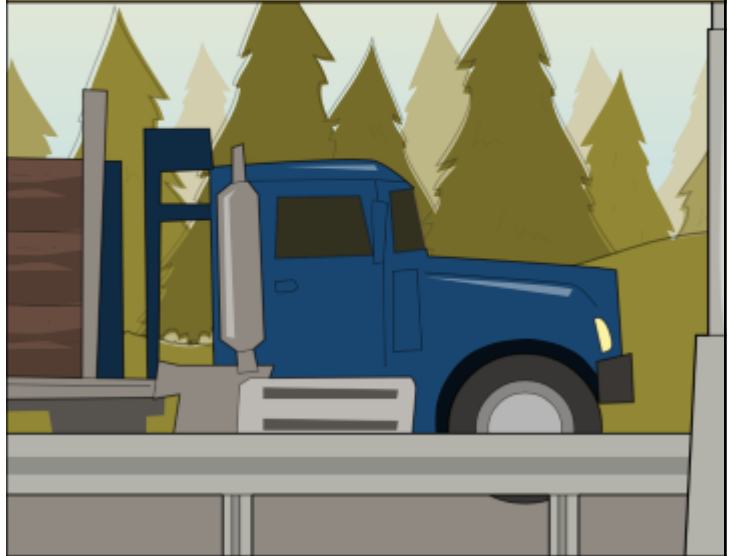
Em hospitais, ele é usado para preservar sangue e outros materiais biológicos. Ele é o criógeno usado para resfriamento no transporte de órgãos para transplante. Podendo ser usado em criocirurgias.



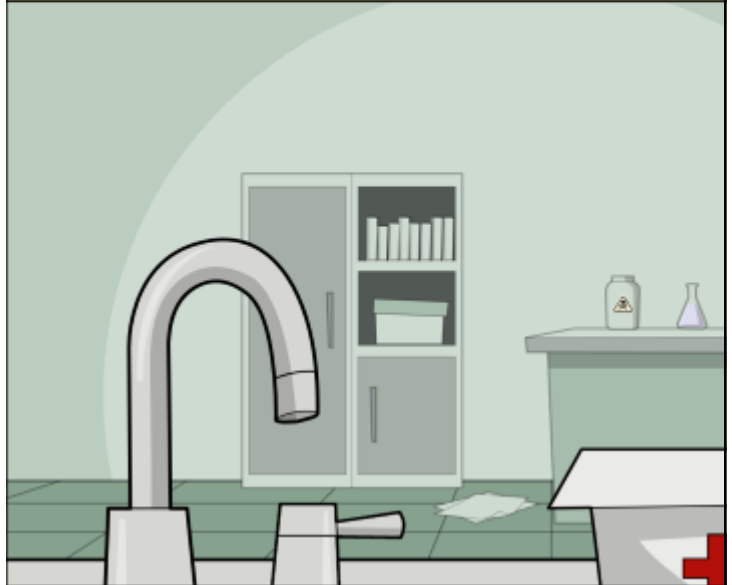
Na indústria de alimentos ele é a substância criogênica ideal no congelamento rápido de alimentos pois reduz a deterioração, preservando a sua coloração e o sabor.



Dependendo do volume de consumo, o NL pode ser transportados em tanques criogênicos até chegar ao local de consumo onde são transferidos para tanques criogênicos instalados nesses locais.



Nas clínicas especializadas, ele serve para controlar a temperatura em aplicações de resfriamento de reatores criogênicos e preservar amostras biológicas.



A visita é finalizada e a turma se despede do professor Márcio...



CAPÍTULO 6: Principais Aplicações Tecnológicas

Indo à escola, os protagonistas comentam:

Nando,
como é interessante
o Fenômeno da
Supercondutividade...

Verdade Rafa, me
chamou atenção a
descoberta, seus
conceitos e a
importância da Física das
baixas temperaturas para
o estudo dos
supercondutores.

Mas
onde podemos
ver a utilização
deles?

Quais tecnologias
do nosso dia a dia
são feitas a partir
de materiais
supercondutores?

Muito aprendizado sobre os SCs e mais dúvidas
surgindo...

Vamos
pra aula...

É melhor!

Profa. Maud fala das aplicações tecnológicas...

Vamos
distribuir as
aplicações
tecnológicas nos
seguintes grupos:

APLICAÇÕES

1-Sistema de Potência Supercondutora

2-Dispositivos Passivos Supercondutores

3-Aplicações em Metrologia Quântica

4-Detectores Supercondutores de Radiação e
Partículas

5-Dispositivos de Interferência Quântica (SQUIDS)

6-Eletrônica Digital Supercondutora

7-Outras aplicações

Frise-se que
este é um rol
não-exaustivo
de aplicações

Fonte: Adaptado de (SEIDEL, 2015).

Nando e Rafa ficam impressionados com a diversidade de aplicações.

Maravilha!!!

Nossa!!!

Meus queridos, vejam a quantidade de aplicações dos SCs. Estudar cada uma delas consistem em um curso extenso de Física. Dada a diversidade desse tema.

Balizados por tudo que já estudamos até agora, elencamos algumas aplicações para podermos falar com um pouco mais de substância.

Sistema de Potência Supercondutora

Dispositivos supercondutores de alta temperatura (HTS) apresentam uma diversidade de aplicações tecnológicas confiáveis e trazem inúmeras vantagens em relação aos dispositivos usuais neste segmento.

Nos últimos anos, foram produzidos inúmeros protótipos bem sucedidos baseados em HTS para energia elétrica, tais quais: cabo de transmissão, limitador de corrente de falha, transformadores, motores/geradores, ímãs para armazenamento de energia magnética supercondutora (SMES), reator de corrente contínua (CC), basicamente.

Fonte: (WANG, 2015).

Cabos Supercondutores. Fonte: (WANG, 2015, p.391).

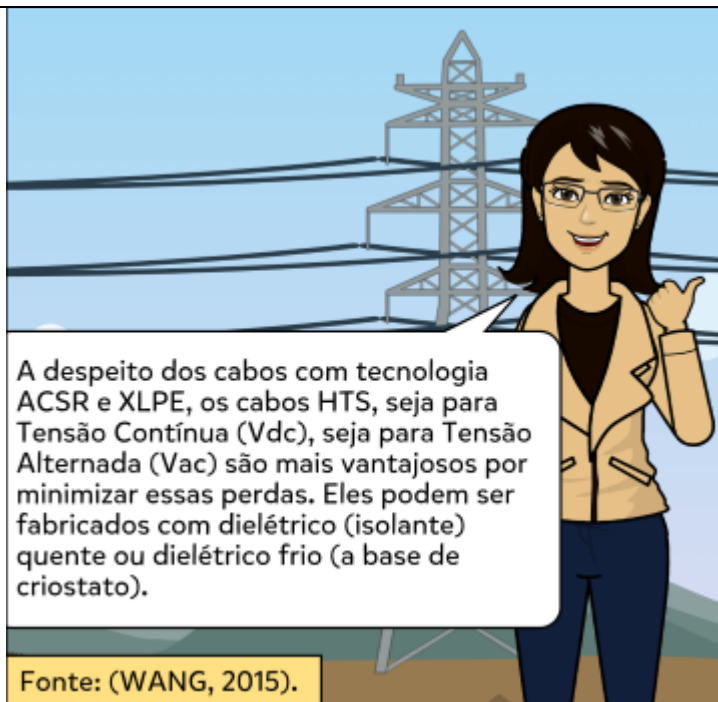
Duas considerações: 1º Os cabos de transmissão são baseados em alumínio reforçado com aço (ACSR) nas linhas aéreas e cabos subterrâneos com polietileno reticulado (XLPE). 2º Em cidades com grande densidade populacional, fica praticamente inviável a construção de novos sistemas de fornecimento de energia.

Na seara da viabilidade técnica destes cabos ...

...Os cabos HTS apresentam capacidade de transferência de energia em torno de 3 a 5 vezes maior em relação os cabos XLPE. (Fonte: WANG, 2015, p.391)

$$P = E \times I$$

O sistema entrega energia a uma taxa de Potência (P)=Tensão (E)x Corrente (I). Nesse sentido, quanto maior (I) mais perdas por efeito Joule teremos.



A despeito dos cabos com tecnologia ACSR e XLPE, os cabos HTS, seja para Tensão Contínua (Vdc), seja para Tensão Alternada (Vac) são mais vantajosos por minimizar essas perdas. Eles podem ser fabricados com dielétrico (isolante) quente ou dielétrico frio (a base de criostato).

Fonte: (WANG, 2015).

Exemplo de um cabo baseado na tecnologia HTS, para pequenas e médias distâncias.



Fonte: Adaptado de (WANG, 2015, p.392)

o SMES e o FESS ou o (SFES). Fonte:(SEIDEL, 2015, p.715; WANG, 2015).

Nesse escopo, duas tecnologias com SC se destacam: a superconducting magnetic energy storage (SMES) e a flywheel energy storage system (FESS). Elas são baseadas em rolamentos magnéticos supercondutores ou SMBs, do inglês (superconducting magnetic bearings).



Armazenamento de Energia

Há diversas tecnologias neste segmento apresentando vários níveis de desempenhos, relacionados à capacidade de energia e potência, tempo de resposta, número de ciclos de carga/descarga e eficiência. Fonte: (SEIDEL, 2015, p.660).



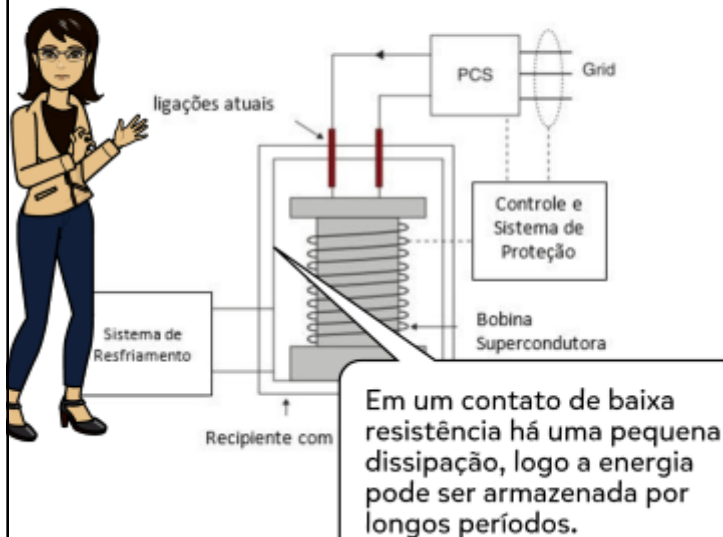
Densidade de energia magnética. Fonte: (KNIGHT, 2009, p.311)

$$U_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

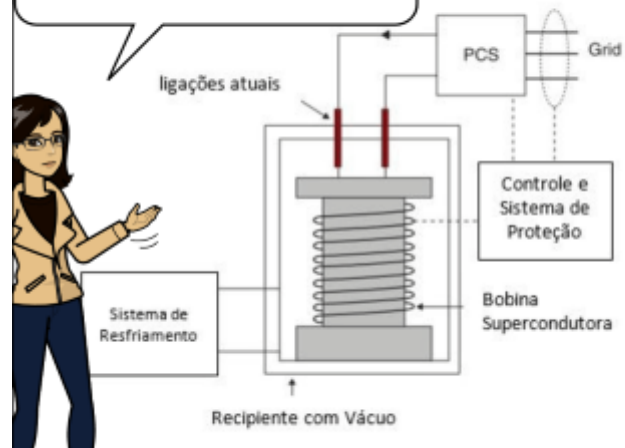


Quando uma corrente é forçada em um indutor, um campo magnético (B) é gerado. Uma energia total (UB) é associada a (B). Se este indutor for supercondutor, não há resistência elétrica nele e supondo a criação de um curto-circuito perfeito em seus terminais, a energia magnética pode ser armazenada indefinidamente.

A superconducting magnetic energy storage (SMES)

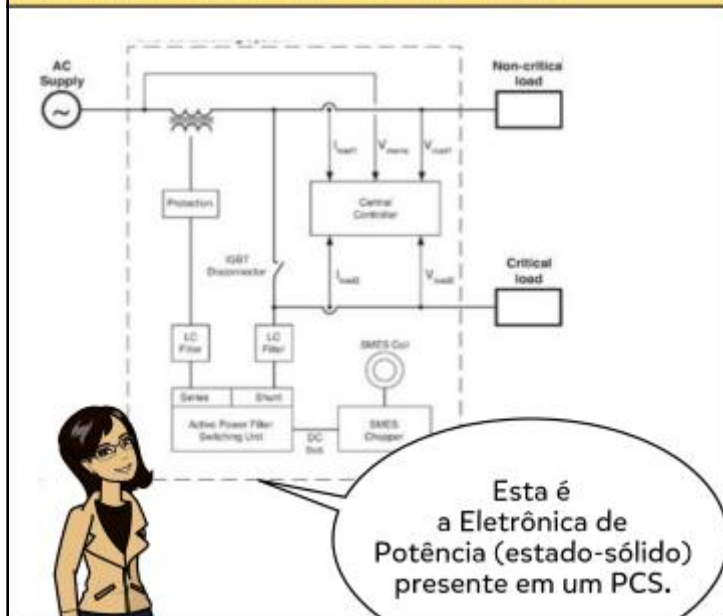


Nele há uma bobina supercondutora conectada ao sistema de energia trifásico a partir de um PCS de estado sólido.



Descrevendo o SMES. Fonte: Adaptado de (SEIDEL, 2015, p.665).

Diagrama elétrico simplificado do Power Conditioning System (PCS). Fonte: (researchgate, 2022)



Vantagens do SMES. Fonte: (SEIDEL, 2015).

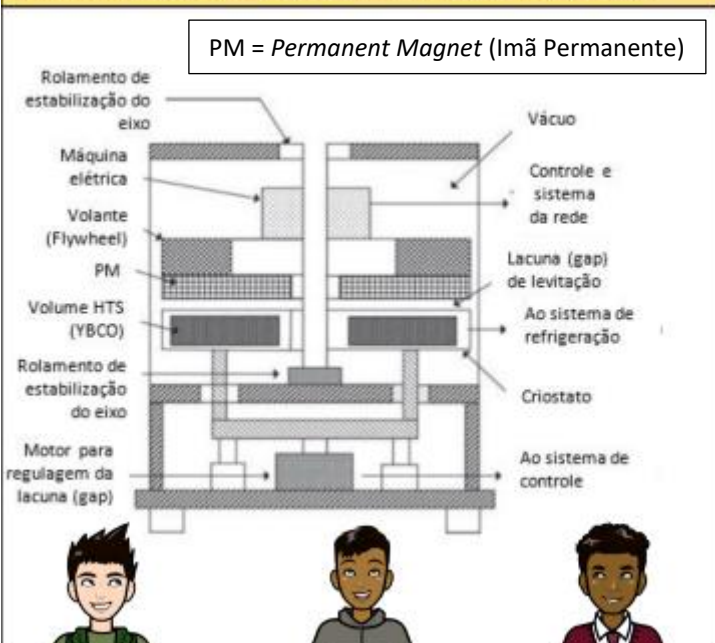
- Tempo de resposta rápido do modo de espera à potência total;
- Alta potência de entrega;
- Número (teoricamente) infinito de ciclos de carga-descarga sem perdas;
- Baixas perdas durante as fases de carga e descarga.



Superconducting Flywheel Energy Storage (SFES) ou Flywheel Energy Storage System (FESS)



Estrutura conceitual do SFES. (WANG, 2015, p.411)



Sistemas que compõem o SFES. Fonte: Adaptado de (WANG, 2015, p.411)



Flywheel (Volante). Adaptado de (WANG, 2015, p.412)

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

Esta equação mostra a energia armazenada (E). Ela pode ser aumentada com o aumento do Momento de Inércia (I) ou com o aumento da velocidade angular (ω).



Sistema de Levitação Magnética. Fonte (WANG, 2015)

PM = Permanent Magnet (Ímã Permanente)



Devido ao efeito Meissner, uma força repulsiva eletromagnética é criada entre o supercondutor (YBCO) e o PM, resultando na levitação de forma estável no campo magnético gerado pelo PM.

Sistema da máquina elétrica (WANG, 2015)



A máquina elétrica deve ser capaz de atuar como motor ou gerador em condições de direção de rotação fixa. Durante o armazenamento de energia, a velocidade de rotação do flywheel aumenta continuamente; no entanto, diminui gradativamente durante a liberação de energia.

Sistema Criostático e Vácuo. (WANG, 2015. p.412)



O supercondutor no SFES funciona em ambiente criogênico. Um ambiente de vácuo também é necessário para reduzir o atrito entre as moléculas de ar e as peças rotativas.

Aplicações. (WANG, 2015, p.412)



O SFES é um dos sistemas eletromecânicos de armazenamento de energia com as vantagens de longa vida útil, alta densidade de energia e baixa perda rotacional devido aos rolamentos supercondutores. No campo aeroespacial, o SFES tem aplicações potenciais, pois pode substituir baterias e controlar o desempenho de naves espaciais.

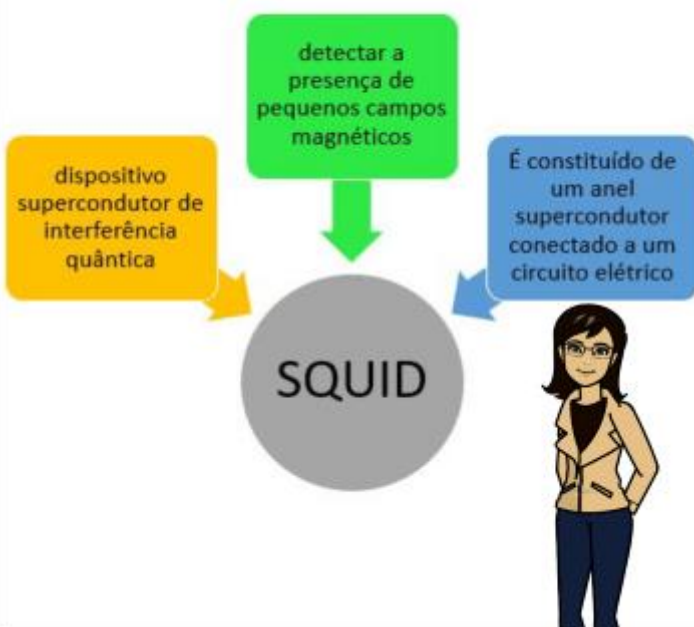
Dispositivos Supercondutor de Interferência Quântica

O SQUID é fundamental em aplicações de sistemas de medição elétrica e magnética ultrasensíveis. Em muitos casos, o SQUID oferece a capacidade de fazer medições onde nenhuma outra metodologia é possível. Fonte: (SEIDEL, 2015, p.949)

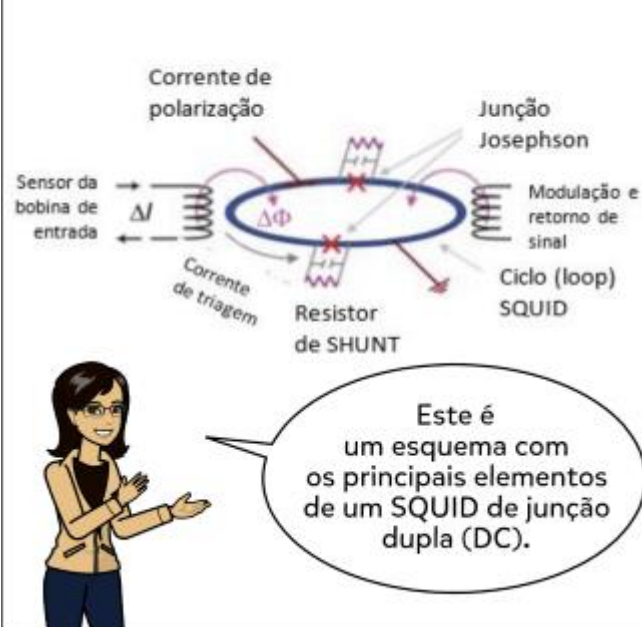


A capacidade de um sensor SQUID para medir mudanças em campos magnéticos e correntes é baseada em quatro efeitos. Fonte: (SEIDEL, 2015, p.949)

Características gerais. Fonte: dos autores (2021).

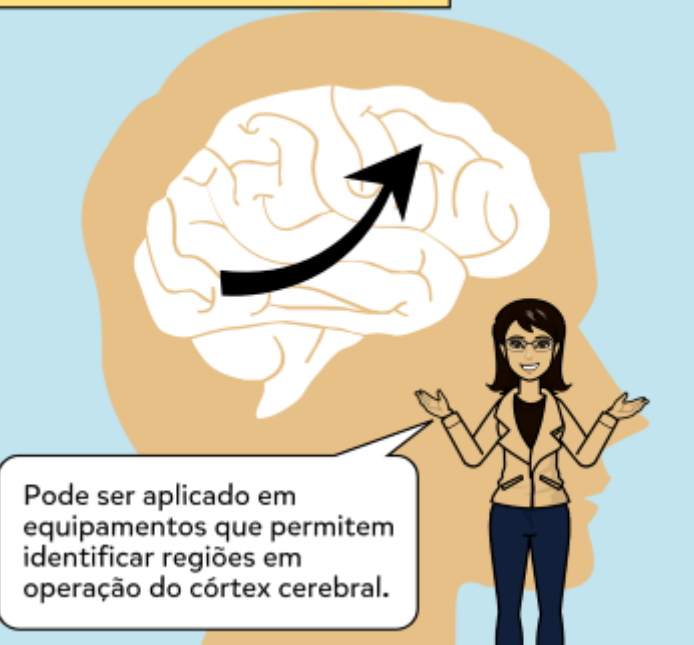


SQUID de junção dupla. Fonte: (SEIDEL, 2015, p.950)

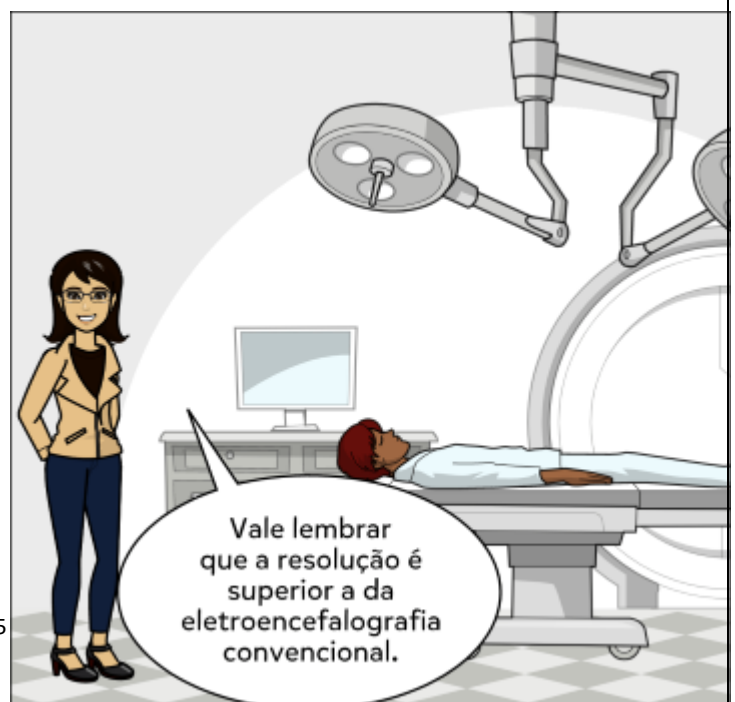


Este é um esquema com os principais elementos de um SQUID de junção dupla (DC).

Algumas aplicações dos SQUIDs:



Pode ser aplicado em equipamentos que permitem identificar regiões em operação do córtex cerebral.



Vale lembrar que a resolução é superior a da eletroencefalografia convencional.



Após a aula, Rafa e Nando comentam:

Nando,
gostei muito
desse
conteúdo...

Eu
também
Rafa!

O Fenômeno
da
Supercondutividade
é fascinante!!!

FIM

Agradecimentos: Dra. Maud Souza, Dr Márcio Gomes, Dra Luciana, Dr Igor Padilha e MsC José Estanislau Cunha e a todos que contribuíram para criação deste Produto Educacional.

REFERÊNCIAS

BRANÍCIO, Paulo S. Gráfico adaptado. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1806-11172001000400004>. Acesso em: 16 nov. 2020.

Bobek Ltd. Efeito dominó. 2007. Disponível em: <https://www.publicdomainpictures.net/pt/view-image.php?image=34179&picture=o-principio-da-domino-queda>. Acesso em: 10 ago. 2021.

COSTA, Marconi B.S.; PAVÃO, Antonio C. Supercondutividade: Um século de desafios e superação. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172012000200017>. Acesso em: 16 nov. 2020.

Eng Agr Ruy Gripp. Milho de Pipoca. 2018. Disponível em: <https://ruygripp.com.br/2018/11/09/milho-pipoca-por-que-explode-e-pula-na-panela/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

Imagens: 3,4 e 5. OSTERMANN, Fernanda; FERREIRA, Leticie Mendonca; CAVALCANTI, Claudio Jose de Holanda. **Tópicos de física contemporânea no ensino médio : um texto para professores sobre supercondutividade**. 1998. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/116764/000215873.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 nov. 2020.

LEPICH, Rodolpho Santos. **CARACTERIZAÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE PÓ CERÂMICO SUPERCONDUTOR DE $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ EM AÇO INOXIDÁVEL LEAN DUPLEX**. 90f. Dissertação (Mestrado). Vitória, 2017. Disponível: http://repositorio.ufes.br/jspui/bitstream/10/9751/1/tese_11191_RODOLPHO%20SANTOS%20LEPICH.pdf . Acesso 10 de mar. 2021

MORI, Thiago José de Almeida. Gráfico do campo magnético. 2008. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/2640/Mori_Thiago_Jose_de_Almeida.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 29 mar. 2021.

Nobel prize a. Heike Kamerlingh Onnes. 2021. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1913/onnes/facts/> . Acesso em: 10 ago. 2021.

Nobel prize b. The Nobel Prize in Physics 1972. 2021. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1972/summary/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

Nobel Prize c. The Nobel Prize in Physics 2003. 2021. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2003/summary/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

Onyxmet. YBCO - Yttrium barium copper oxide. 2021. Disponível em: https://onyxmet.com/index.php?route=product/product&product_id=2012. Acesso em: 10 ago. 2021.

P&R automação industrial. Por que um supercondutor precisa estar em baixa ou alta temperatura? 2019. Disponível em: <http://blog.perautomacao.com.br/por-que-um-supercondutor-precisa-estar-em-baixa-ou-alta-temperatura/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

SOUZA, Daniel Fonseca de. Gráfico obtido por K. Onnes, 2012. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3468>. Acesso em: 29 mar. 2021.

SEIDEL, Paul. **Applied Superconductivity**. Weinheim: Wiley-VCH, 2015.

Stringfixer. Supercondutor tipo II. 2021. Disponível em: https://stringfixer.com/pt/Type-II_superconductor. Acesso em: 10 ago. 2021.

Stackexchange. Magnetic flux ropes. 2021. Disponível em: <https://physics.stackexchange.com/questions/398279/magnetic-flux-ropes-are-they-stable-for-topological-reasons-like-fluxon-abriko>. Acesso em 10 ago. 2021

Unicentro. Prêmio Nobel em Física - 1987. 2021. Disponível em: <https://www3.unicentro.br/petfisica/2016/11/13/premio-nobel-em-fisica-1987/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

Wikiwand. Commemorative plaque in Leiden. 2021. Disponível em: https://www.wikiwand.com/en/Heike_Kamerlingh_Onnes. Acesso em: 10 ago. 2021.

WANG, Yinshun. **Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering**. [S. l.: s. n.], 2015. v. 3