



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

COSME EDUARDO DA SILVA

**ESTUDO BÁSICO SOBRE
SUPERCONDUTIVIDADE E SUAS APLICAÇÕES**

BELÉM

2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

COSME EDUARDO DA SILVA

**ESTUDO BÁSICO SOBRE
SUPERCONDUTIVIDADE E SUAS APLICAÇÕES**

Trabalho Acadêmico de Conclusão apresentado ao Colegiado do Curso de Física da Universidade Federal do Pará - UFPA, como requisito para a obtenção do Grau de Licenciatura Plena em Física, sob orientação do Prof. Dr. Rubens Silva .



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

COSME EDUARDO DA SILVA

**ESTUDO BÁSICO SOBRE
SUPERCONDUTIVIDADE E SUAS APLICAÇÕES**

Data de Defesa ____/____/____

Conceito: _____

Banca Examinadora

Prof. Orientador:

Prof.

Prof.

Dedico a Deus pela força em todos os momentos da minha vida.

A meus pais que me apoiaram em todas as fases da minha vida e por me incentivarem a estudar desde a minha educação básica ao ensino superior.

A minha esposa e família por todos os momentos de felicidade que passei me dando força para concluir com êxito o meu curso.

Aos meus professores da UFPA por contribuírem para a minha formação profissional como professor.

Cosme Eduardo da Silva

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus pela força, determinação, saúde, paz, que me deu para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais João Batista da Silva e Janete Lomboni da Silva por todas as conquistas da minha vida.

A minha esposa Giselda Cardoso Evangelista da Silva por nunca desistir de me incentivar, mesmo nos momentos de dificuldade que passei durante o curso.

Ao professor Rubens por ter me incentivado, ensinado, orientado e motivado para conclusão do curso.

Aos meus colegas de turma por ter me ajudado em vários momentos durante todo esse tempo de curso na UFPa.

Cosme Eduardo da Silva

"Os problemas significativos que enfrentamos não podem ser resolvidos no mesmo nível de pensamento em que estávamos quando os criamos."

Albert Einstein

RESUMO

A busca por novos materiais que poderiam superar a característica resistiva quando submetidos a grandes aplicações de correntes e campos magnéticos começou a ser de grande importância desde Onnes, o primeiro a descobrir tais características de metais que passou a chamá-la de Supercondutividade. A partir do momento da descoberta, iniciou-se a corrida para conseguir elevar a temperatura no qual os materiais mantêm suas propriedades supercondutoras, corrida que não cessou até os dias atuais. Junto às descobertas experimentais, tornou-se necessária a apresentação de uma explicação teórica para o novo estado da matéria, sendo que a evolução destas teorias vem ocorrendo com a mesma velocidade com que novos materiais surgem.

Palavras-Chave: Onnes , Supercondutividade, temperatura, materiais.

ABSTRACT

The search for new materials that could overcome the resistive characteristic when subjected to large applications of current and magnetic fields began to be of great importance since Onnes, the first to discover these characteristics of metal that started to call her Superconductivity. From the moment of discovery, began the race to get raise the temperature at which the material retains its superconducting properties, that race has not ceased to this day. Together with the experimental findings, it became necessary to present a theoretical explanation for the new state of matter, and the developments of these theories has been occurring at the same speed with which new materials emerge.

Key- Words: Onnes, Superconductivity, Temperature, Materials.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 ESTADO SUPERCONDUTOR	12
1.1 Descoberta do Estado Supercondutor	12
1.2 Principais Nomes da Supercondutividade	14
2 ALGUMAS PROPRIEDADES DOS SUPERCONDUTORES	17
2.1 Temperatura Crítica (T_c)	17
2.2 Calor Específico (C_v)	18
2.3 Campo Magnético Crítico (H_c)	19
2.4 Corrente Crítica (J_c)	20
2.5 Efeito <i>Meissner</i> ou Diamagnetismo Perfeito	21
2.6 Levitação Magnética	24
3 TIPOS DE SUPERCONDUTORES	25
3.1 Supercondutores Tipo I	25
3.2 Supercondutores Tipo II	26
3.3 Caso Particular do Supercondutor Tipo II : Estado Misto	28
4 TEORIAS	33
4.1 Pares de <i>Cooper</i>	33
4.2 Efeito Isótopo	37
4.3 Teoria BCS	37
4.4 Teoria dos Cupratos Supercondutores de Alta Temperatura (HTSC)	41

5 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA SUPERCONDUTIVIDADE	48
5.1 Introdução	48
5.2 Aplicações em Grande Escala	49
5.2.1 Fios Supercondutores de Alta Temperatura Crítica	49
5.2.2 Transmissão de Potência	49
5.2.3 Magnetos Supercondutores	50
5.2.4 Armazenamento de Energia	51
5.2.5 Levitação Magnética (MAGLEV)	53
5.2.6 Outras Aplicações em Grande Escala	56
5.3 Aplicações em Pequena Escala	56
5.3.1 Junções <i>Josephson</i>	56
5.3.2 SQUIDS (<i>Superconducting Quantun Interference Device</i>)	57
CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS	60

INTRODUÇÃO

Neste trabalho apresentaremos um contexto histórico-científico da evolução do estudo sobre a supercondutividade, iniciado em 1911, onde se observou o desaparecimento abrupto da resistência a eletricidade apresentada no Mercúrio (Hg). Esta descoberta desencadeou grandes avanços na ciência principalmente na área de materiais. Os resultados experimentais desencadearam avanços teóricos, bem como, o desenvolvimento de uma teoria microscópica capaz de explicar a supercondutividade em qualquer intervalo de temperatura. A obtenção de um material que seja supercondutor a temperatura ambiente ou maior que a ambiente, acabaram se tornando um desafio intrigante.

A importância das pesquisas em supercondutividade pode ser verificada pelo emprego de tecnologias que facilitam o dia-a-dia das pessoas, fato este que rendeu muitos Prêmios Nobel nesta área. As atuais pesquisas são motivadas pela busca em uma explicação mais simples para tal fenômeno e pelo surgimento de novos materiais que podem trazer muitos benefícios as pessoas e ao planeta.

No primeiro capítulo abordaremos a descoberta da supercondutividade bem como seu contexto histórico por sequência cronológica com alguns comentários.

No segundo capítulo veremos algumas propriedades físicas dos supercondutores tais como: a temperatura crítica, campo magnético crítico, corrente crítica e calor específico, efeito *Meissner* e levitação magnética

No terceiro capítulo mostraremos como estão classificados os materiais supercondutores, quanto ao seu tipo, e a particularidade do estado misto entre eles.

No quarto capítulo falaremos de algumas teorias que foram criadas para tentar explicar os fenômenos supercondutores.

No quinto capítulo apresentaremos uma gama de aplicações ligadas ao uso de supercondutores, com aplicações em grande escala e pequena escala desses materiais.

CAPÍTULO 1

ESTADO SUPERCONDUTOR

1.1 *DESCOBERTA DO ESTADO SUPERCONDUTOR*

Em 1911, o Físico Holandês Heike Kamerlingh Onnes (Figura 1), trabalhando em seu laboratório, observou que o Mercúrio (*Hg*) quando submetido a uma temperatura de $4,2\text{ K}$ ($-268,8\text{ °C}$) tinha sua resistência a passagem de eletricidade praticamente zero, persistindo tal efeito por um tempo indefinido. Baseando-se nesta proeza tecnológica, Onnes dedicou-se ao estudo das propriedades elétricas dos metais em temperaturas muito baixas, empregando o hélio líquido como refrigerante. Onnes interpretou esta propriedade que o mercúrio (*Hg*) passa de um estado resistivo normal a um novo estado, o de Supercondutor. A Supercondutividade a partir de então, vem sendo usada para denotar todos os materiais que, abaixo de uma *temperatura crítica* perdem a resistência à passagem de corrente elétrica, além de outras propriedades. Dois anos após a descoberta Onnes é agraciado com o Prêmio Nobel de Física.



Figura 1- Heike Kamerlingh Onnes.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2, 2010, Mato Grosso da Sul. *Estudo sobre Supercondutividade e suas aplicações*. Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: < <http://fisica.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> >. Acesso em: 28/11/2014.

Denominam-se *supercondutores* os materiais que transportam energia elétrica praticamente sem dispersão. Como se sabe, a resistividade de um material condutor aumenta com a temperatura e, por conseguinte, há um aumento de sua resistência elétrica, acarretando uma diminuição da corrente elétrica que nele circula. Assim, abaixando-se a temperatura de alguns materiais condutores para próximo de *zero*

Kelvin, consegue-se obter resistividades quase nulas (ver figura 2, onde se verifica esta relação no metal Mercúrio- Hg). Uma vez que a corrente elétrica tenha sido estabelecida num supercondutor, ela fluirá indefinidamente atravessando o material com uma mínima perda de energia e com praticamente nenhum aquecimento durante o fluxo de carga. [3,10]

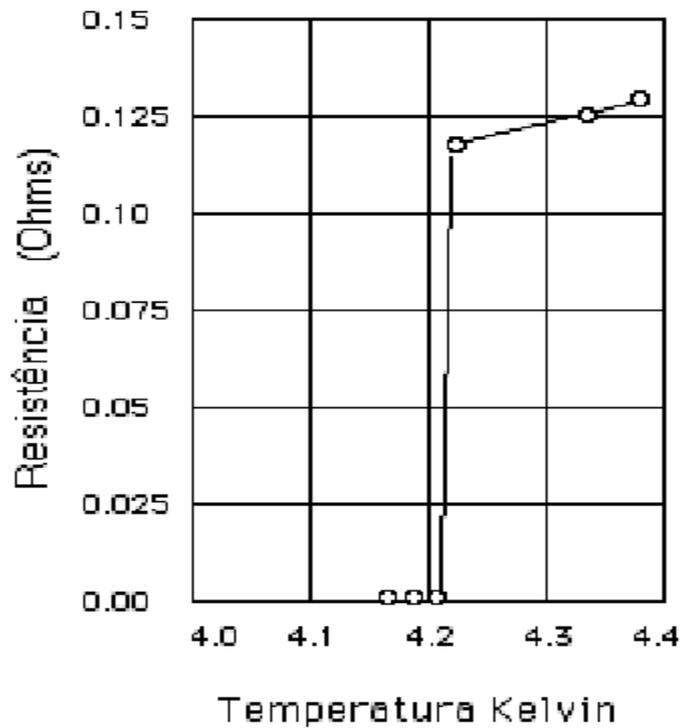


Figura 2 - Relação entre Resistência (Ohms) e Temperatura (K) do Mercúrio (Hg).

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2, 2010, Mato Grosso da Sul. *Estudo sobre Supercondutividade e suas aplicações*. Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: < <http://fisica.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> >. Acesso em: 28/11/2014.

Outra propriedade fundamental deste estado é o *EFEITO MEISSNER*, que será abordado mais adiante .

1.2 PRINCIPAIS NOMES DA SUPERCONDUTIVIDADE

Junto a essas descobertas de Onnes, tornou-se necessária a apresentação de uma explicação teórica para esse novo estado da matéria, sendo que a evolução destas teorias vem ocorrendo com a mesma velocidade com que os novos materiais surgem.

Em 1933, o físico alemão Walther Meissner (ver figura 3) e seu assistente Robert Ochsenfeld descobrem um dos efeitos mais característicos e importantes do estado supercondutor, hoje conhecido como Efeito Meissner. Este efeito consiste na expulsão total do fluxo de campo magnético do interior do supercondutor, quando este é resfriado abaixo de sua temperatura crítica. A supercondutividade passa então a ser encarada como um novo estado da matéria. [6]



Figura 3 - WALTER MEISSNER

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2, 2010, Mato Grosso da Sul. *Estudo sobre Supercondutividade e suas aplicações*. Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: < <http://fisica.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> >. Acesso em: 28/11/2014.

No ano seguinte a descoberta de Meissner e Ochsenfeld , em 1934, o físico inglês F. London formula sua *teoria sobre as propriedades eletrodinâmicas dos supercondutores*. Eram equações que complementavam as Equações de Maxwell. A teoria descrevia, mas não explicava o fenômeno da supercondutividade .

Físicos soviéticos em 1950, V. L. Ginzburg e L. D. Landau desenvolveram a chamada *teoria fenomenológica ou macroscópica da supercondutividade* para explicar as propriedades Termodinâmicas da transição do Estado Normal para o Estado Supercondutor. Embora fenomenológica a teoria mostrava-se muito eficiente quanto a descrição de óxidos supercondutores (cerâmicas) de temperatura crítica. Tanto a teoria London, quanto esta última serviu para estabelecer relações entre diferentes fenômenos. Ambas são descrições matemáticas de efeitos observados em laboratório, incapazes de explicar o fenômeno como consequência das leis fundamentais da física.

A supercondutividade foi descrita em 1957 pelos cientistas americanos John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer, o ponto chave na teoria criada por eles é a formação de pares de elétrons, conhecidos como *Pares de Cooper*, através de interações com oscilações da rede cristalina. Esta teoria ficou conhecida como *TEORIA BCS*, em homenagem a seus criadores. Em 1972 foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física em reconhecimento da importância de sua teoria. Mas, mesmo sendo precisa para explicação de supercondutores a baixas temperaturas em metais e ligas simples, esta se revelou insuficiente na explicação dos supercondutores de alta temperatura crítica , como nas cerâmicas supercondutoras.

As principais aplicações dos supercondutores em dispositivos eletrônicos são baseados no efeito Josephson. Josephson propôs teoricamente a ocorrência deste fenômeno baseado na teoria do BCS em 1964 de que dois materiais supercondutores em contato devem apresentar propriedades particulares, e que anos mais tarde foi comprovada em laboratório, o que lhe valeu o Prêmio Nobel de Física em 1973.

Vitaly Ginzburg recebe em 2003 o Prêmio Nobel de Física pelo desenvolvimento da *Teoria Fenomenológica da Supercondutividade*. Neste ano também recebe o prêmio além de Ginzburg Alexei A. Abrikosov com a *Teoria dos Supercondutores do Tipo II*. [4]

A figura 4 possui uma tabela que ilustra alguns agraciados com o Prêmios Nobel relacionados na área da supercondutividade.

ANO	PREMIADOS	CONTRIBUIÇÃO
1913	Heike Kamerlingh Onnes	Propriedades da matéria em baixas temperaturas, incluindo a descoberta da <i>Supercondutividade</i> e a Liquefação do Hélio.
1972	Jonh Bardeen Leon N. Cooper Robert Schrieffer	Desenvolvimento da Teoria Microscópica da Supercondutividade, hoje denominada Teoria BCS.
1973	Brian D. Josephson	Predição teórica do tunelamento de Pares de Cooper através de uma barreira isolante entre supercondutores.
	Ivar Giaver	Tunelamento de elétrons em supercondutores
1987	Karl Alex Muller J. Georg Bednorz	Descoberta da Supercondutividade de alta temperatura crítica num <i>Cuprato</i> de Lantânio e Bário.
2003	Vitaly Ginzburg	Desenvolvimento da Teoria Fenomenológica da Supercondutividade.
	Alexei A. Abrikosov	Teoria dos Supercondutores do Tipo II
		<i>Obs: Neste mesmo ano Anthony Leggett também foi contemplado com desenvolvimento da teoria da superfluidez no He³, que é um fenômeno análogo à Supercondutividade.</i>

Figura 4 - Tabela 1: Prêmios Nobel Relacionados à Supercondutividade

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2, 2010, Mato Grosso do Sul. *Estudo sobre Supercondutividade e suas aplicações*. Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: < <http://fisica.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> >. Acesso em: 28/11/2014.

CAPÍTULO 2

ALGUMAS PROPRIEDADES DOS SUPERCONDUTORES

2.1 TEMPERATURA CRÍTICA (T_c)

A temperatura na qual a resistência elétrica é igual a zero é chamada de *temperatura crítica* (T_c) e varia de acordo com o material. As temperaturas críticas são atingidas por meio do resfriamento do material com hélio ou nitrogênio líquidos. Nas pesquisas com novos materiais observou-se que somente com o uso de metais não era possível elevar a temperatura crítica, descobrindo-se então os materiais cerâmicos (ver figura 5, na qual, possui uma tabela com alguns metais e suas temperaturas críticas).

<i>MATERIAL</i>	<i>TIPO</i>	<i>T_c (K)</i>
ZINCO	METAL	0,88
ALUMÍNIO	METAL	1,19
ESTANHO	METAL	3,72
MERCÚRIO	METAL	4,15
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	CERÂMICA	90
TlBaCaCuO	CERÂMICA	125

Figura 5 - Tabela 2: Temperatura Crítica (T_c) de alguns Supercondutores

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, 3, 2010, Ponta Grossa. *Processamento, Caracterização e Estudo de Fenômenos Críticos nos Sistemas Supercondutores*. Ponta Grossa, 2010. Disponível em: < http://fisica.uepg.br/ppg fisica/Public/Projetos/1316461911_.pdf >. Acesso em 29/11/2014.

Como esses materiais não possuem resistência elétrica, o que significa que os elétrons podem se deslocar livremente através deles, eles podem transmitir grandes quantidades de corrente elétrica por longos períodos sem perder energia na forma de calor. Foi comprovado que malhas de fios supercondutores podem transmitir correntes elétricas por centenas de anos sem nenhuma perda considerável. Essa propriedade tem implicações para a transmissão de energia elétrica, se as linhas de transmissão puderem ser feitas de cerâmicas supercondutoras, e para dispositivos de armazenamento de energia elétrica.

2.2 CALOR ESPECÍFICO (C_v)

O calor específico eletrônico de um supercondutor apresenta uma anomalia na temperatura crítica (T_c), tal como está esquematizado na figura 6. Este comportamento constitui-se numa evidência experimental contundente da ocorrência de um fenômeno de transição de fase em T_c , pois o calor específico é uma propriedade de equilíbrio termodinâmico.

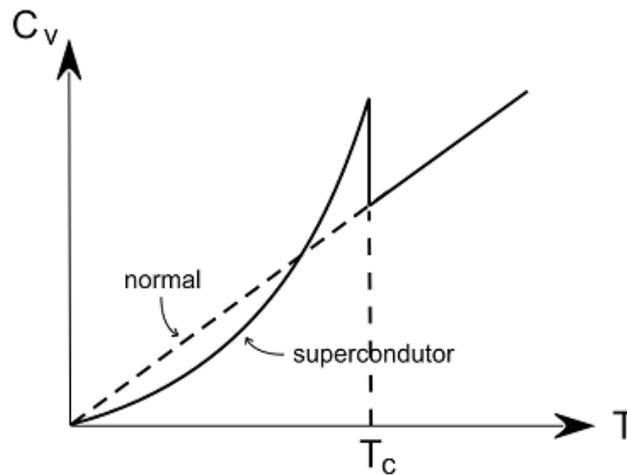


Figura 6: Calor Específico (C_v) de um Supercondutor em função da temperatura comparado ao comportamento normal (linha tracejada), que pode ser obtido experimentalmente submetendo o material a um campo superior ao valor crítico.

ESCOLA DO CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS, 2, 2012, Rio de janeiro. *Supercondutividade: Uma Introdução*. Rio de janeiro, 2012. Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001089.pdf> >. Acesso em 29/11/2014.

O Calor Específico de um metal normal em baixas temperaturas é descrito pela equação:

$$C_v = \gamma T + AT^3$$

onde o termo linear em temperatura deve-se à contribuição dos elétrons de condução e o termo cúbico provém das vibrações de rede cristalina (*Termo de Debye*). As constantes γ e A são características do material. Este comportamento está presente na Figura 6. No estado supercondutor, e em temperaturas bem inferiores T_c , a contribuição eletrônica mostra um comportamento do tipo

$$C_v = \exp(-\Delta / k_B T),$$

em que k_B é a constante de Boltzmann ($k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K). Estas observações indicam que a transição de fase está relacionada com o comportamento eletrônico do metal e confirmam que o estado fundamental supercondutor está separado por dois níveis excitados por um intervalo de energias proibidas de largura 2Δ . Em temperaturas próximas ao zero absoluto, Δ é da ordem de $k_B T_c$. Assim, quando $T_c = 10$ K, obtém-se $\Delta \sim 10^{-21}$ J. Este valor de energia é muito pequeno quando comparado às energias típicas do sistema eletrônico nos metais, o que é consistente com o fato de que a supercondutividade é um sutil fenômeno Quântico, que somente se manifesta em temperaturas muito baixas. [17]

2.3 CAMPO MAGNÉTICO CRÍTICO (H_c)

A propriedade mais conhecida de um supercondutor é a inexistência de resistência elétrica em temperaturas inferiores ao valor crítico T_c quando o sistema é percorrido por uma corrente contínua. Este fenômeno contrasta fortemente com o comportamento da resistividade elétrica de um metal normal em baixas temperaturas. Porém a aplicação de um campo magnético externo ao supercondutor produz uma diminuição da temperatura em que a resistência se anula. Se o campo for suficientemente forte, ocorre a supressão total do estado supercondutor e o metal adquire um comportamento elétrico normal, com resistividade diferente de zero em qualquer temperatura. Observações detalhadas mostram que existe um campo magnético crítico (H_c), que é uma função da temperatura, acima do qual a supercondutividade é desestabilizada. A figura 7 mostra a variação da indução magnética crítica no metal chumbo (Pb) em função da temperatura. [17]



Figura 7: variação da indução magnética crítica H no metal chumbo (Pb) em função da temperatura T .

ESCOLA POLITÉCNICA DE ENSINO DE FÍSICA, 1, 2008, Rio de Janeiro. *Estudo e Simulações do Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor*. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001089.pdf> >. Acesso em 29/11/2014.

Os valores de campo magnético crítico em geral observados nos elementos supercondutores são baixos. Por outro lado, a existência de um campo magnético crítico sugere que a supercondutividade e o magnetismo são fenômenos mutuamente excludentes.

2.4 CORRENTE CRÍTICA (J_c)

Observa-se também que o estado supercondutor é destruído quando a amostra é percorrida por uma corrente (contínua) superior a um certo valor crítico. Nos elementos supercondutores, o valor crítico para esta corrente está relacionado ao valor do campo magnético produzido pela própria corrente na superfície da amostra.

Se um supercondutor for submetido a uma corrente alternada de alta frequência, ocorrerá dissipação de energia, ou seja, o material apresentará uma certa resistividade mesmo abaixo da temperatura crítica. Em particular, se a corrente alternada exceder o limite $f_c = \Delta / h$, onde Δ é uma energia característica do estado supercondutor e h é a constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s), a resistividade não sofrerá nenhuma diminuição em temperatura crítica e o sistema mostrará um

comportamento elétrico normal, independentemente do valor da corrente aplicada. A frequência f_c em geral situa-se na região correspondente ao infravermelho no espectro eletromagnético.[17]

2.5 *EFEITO MEISSNER OU DIAMAGNETISMO PERFEITO*

O diamagnetismo perfeito nos materiais supercondutores foi descoberto por W. Meissner e R. Ochsenfeld em 1933 enquanto estudavam o comportamento de amostras de Nióbio metálico em função da temperatura e na presença de um campo magnético. Descobriram que além da resistência nula abaixo de T_c , no supercondutor havia uma magnetização de mesma intensidade, porém no sentido oposto ao que estava aplicado. Ou seja, o fluxo magnético é expulso do interior do supercondutor, penetrando apenas numa região em torno da superfície, e este fenômeno foi denominado por Efeito Meissner.

Verifica-se a partir do efeito Meissner que, se a transição ocorrer na presença de um campo magnético, serão induzidas correntes superficiais na amostra que cancelam exatamente a indução magnética no seu interior. E estas correntes superficiais circulam numa espessura do material denominada de comprimento de penetração. Esta quantidade, que em geral é denotada pelo símbolo λ , é uma das grandezas características do estado supercondutor.

O comprimento de penetração define também a espessura da camada superficial em que o campo magnético se anula ao penetrar no supercondutor. Na figura 8 podemos observar que a indução B decai exponencialmente conforme penetra na amostra segundo a Lei:

$$B = B_0 e^{-x/\lambda}$$

Onde B_0 é a magnitude da indução magnética na superfície do supercondutor, λ é o comprimento de penetração e x denota a dimensão espacial perpendicular à superfície da amostra.

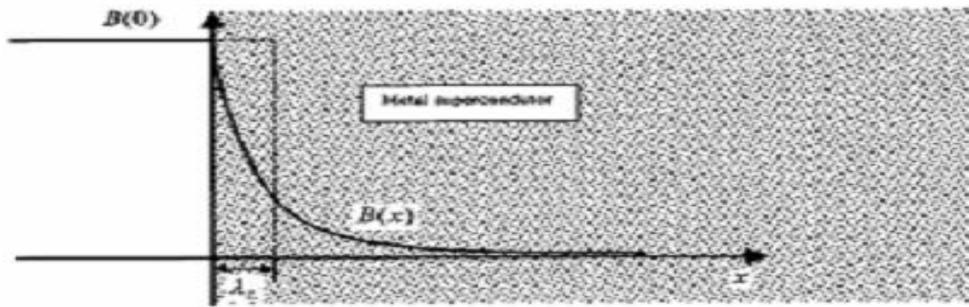


Figura 8: Penetração da indução magnética através da superfície de um supercondutor

OSTERMANN, F ; PUREUR, P. **SUPERCONDUTIVIDADE**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAw7YAE/supercondutividade#> >. Acesso em 29/11/2014.

Aplicando-se sob o material supercondutor um campo magnético fraco, quando este estiver no estado normal (condutor), ou seja, quando a temperatura T é maior que a temperatura crítica T_c , as linhas de campo magnético penetram no condutor. Ao resfriar este condutor na presença de um campo magnético, observa-se uma expulsão abrupta do fluxo de campo magnético no interior do material quando este transita para o estado supercondutor em que $T = T_c$ (fig. 9).

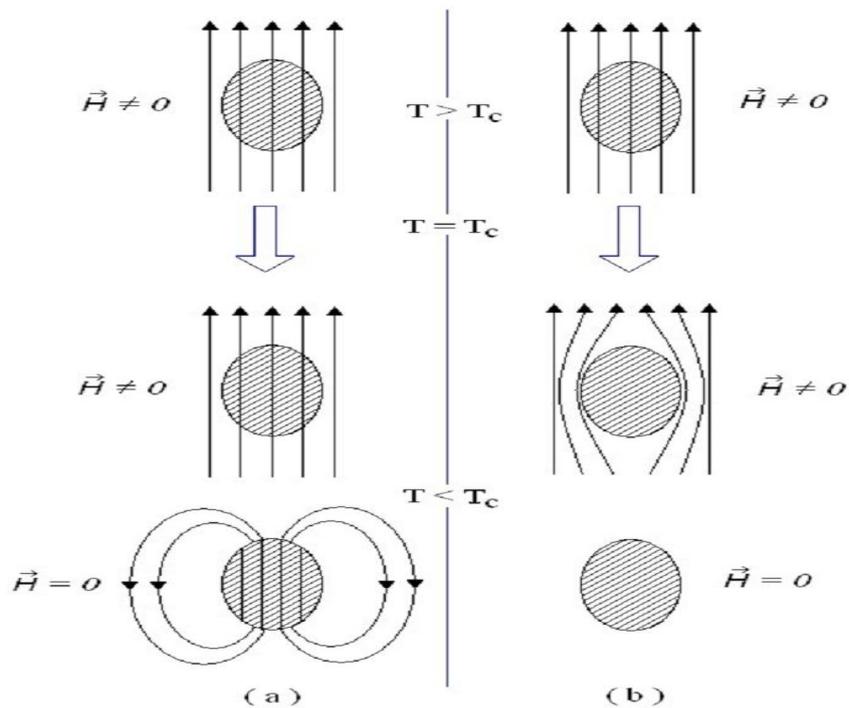


Figura 9 - Comportamento de um (a) hipotético condutor normal perfeito que obedece a Lei de Indução de Faraday comparado ao (b) Efeito Meissner em um Supercondutor.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2, 2010, Mato Grosso da Sul. *Estudo sobre Supercondutividade e suas aplicações*. Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: < <http://fisica.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> >. Acesso em: 28/11/2014.

Esta propriedade mostra que, se a transição ocorrer na presença de um campo magnético, será induzido supercorrentes superficiais na amostra que cancelam exatamente a indução magnética \vec{H} no seu interior.

Em razão da expulsão do fluxo magnético, dizemos que um supercondutor comporta-se como um diamagneto perfeito, no interior do material.

O efeito Meissner mostra que um supercondutor não é simplesmente idêntico a um hipotético condutor perfeito que obedece unicamente às leis de Maxwell do eletromagnetismo, um condutor perfeito reage à variação do fluxo magnético em seu interior e não à simples presença de um campo magnético estático, como o faz um supercondutor.

A expulsão de fluxo magnético do interior de um supercondutor pode ser usada para gerar forças magnéticas de levitação. [17, 16]

2.6 LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

A expulsão de fluxo magnético do interior de um supercondutor pode ser usada para gerar forças magnéticas de levitação (fig. 10). Esse efeito faz com que a magnetização associada às correntes superficiais induzidas, as chamadas *correntes de Blindagem* ou *Efeito Blindagem*, no supercondutor, se oponha à orientação do campo magnético externo. Assim, surge uma força repulsiva entre o supercondutor e a fonte de campo magnético, se este for inhomogêneo (campo gerado por um ímã). A força magnética repulsiva se contrapõe à força gravitacional e pode fazer com que o supercondutor levite. [9 , 6]

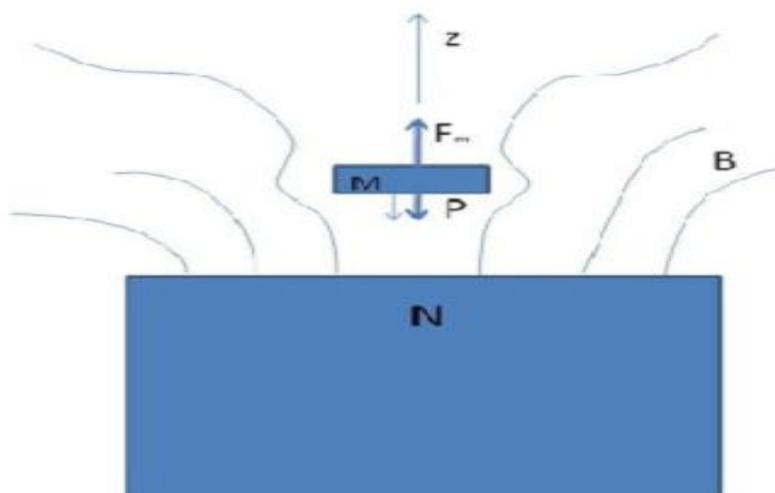


Figura 10 - Levitação de um supercondutor sobre um campo magnético inhomogêneo. As correntes superficiais de Blindagem fazem com que o supercondutor se comporte como um corpo magnetizado (ímã) cuja magnetização \vec{M} aponta no sentido oposto a \vec{B} . Isto gera a Força de Levitação \vec{F}_m , que no equilíbrio iguala-se ao peso \vec{P} , orientando-se verticalmente na direção z , onde $+z$ é o sentido que os campos são mais fracos.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2, 2010, Mato Grosso da Sul. *Estudo sobre Supercondutividade e suas aplicações*. Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: < <http://fisica.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> >. Acesso em: 28/11/2014.

CAPÍTULO 3

TIPOS DE SUPERCONDUTORES

3.1 SUPERCONDUTORES TIPO I

O efeito Meissner pode ser observado em todos os supercondutores se o campo magnético aplicado for suficientemente fraco. Mas não se observava este efeito em alguns materiais quando estas amostras eram colocadas na presença de um campo mais intenso, porém, nestes a presença parcial das linhas de campo no interior do material não interrompia o efeito do estado supercondutor. Desta forma, os supercondutores passaram ser diferenciados em dois tipos.

A maioria dos elementos metálicos supercondutores é do Tipo I. Nestes materiais que foram classificados como sendo do Tipo I, nota-se apenas os Estados *Meissner* e *Normal*. Assim, se o campo aplicado for inferior ao valor crítico, não ocorre nenhuma penetração de fluxo magnético, fato este representado na figura 11. [17]

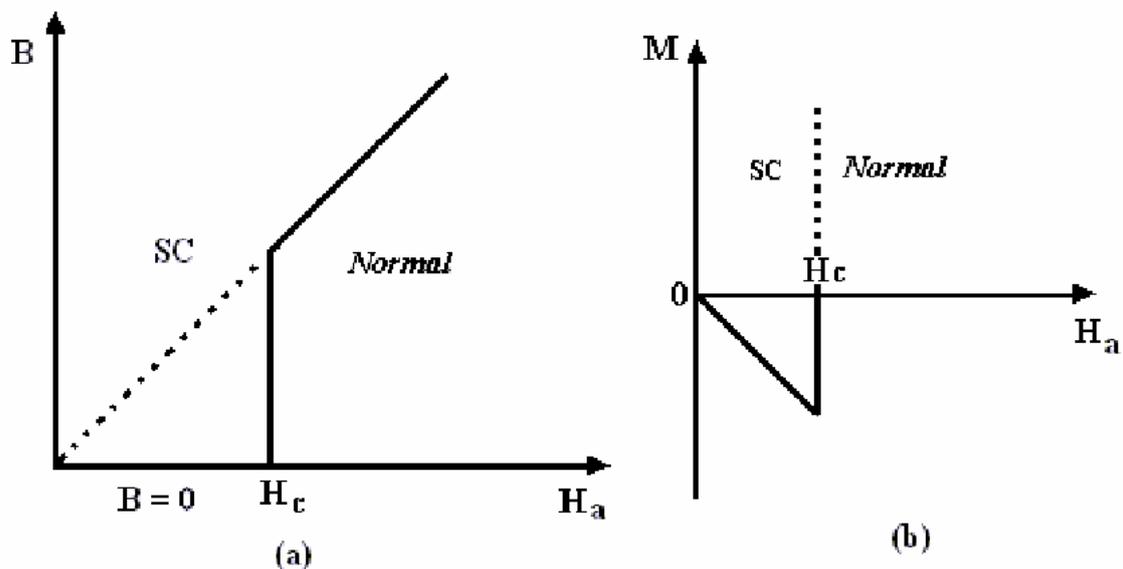


Figura 11 - Representação para Supercondutores do tipo I: (a) Variação do fluxo magnético B em função do campo aplicado H_a (b) Magnetização M em função do campo externo aplicado H_a .

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, 3, 2010, Ponta Grossa. *Processamento, Caracterização e Estudo de Fenômenos Críticos nos Sistemas Supercondutores*. Ponta Grossa, 2010. Disponível em: < http://fisica.uepg.br/ppg fisica/Public/Projetos/1316461911_.pdf >. Acesso em 29/11/2014.

A magnetização nos supercondutores do Tipo I é negativa, devido à expulsão do fluxo magnético ($B = 0$) no interior do material, atingindo um máximo, em valor absoluto, quando o campo externo aplicado é igual ao campo crítico (H_c), conforme ilustra a figura 11. Os campos críticos nos supercondutores do Tipo I são, em geral, muito fracos.

3.2 SUPERCONDUTORES TIPO II

Os supercondutores do Tipo II são formados por ligas metálicas e outros compostos, as exceções são os metais puros, Vanádio (V), Tecnécio (Tc) e Nióbio (Nb). Em geral, as temperaturas críticas associadas a eles são muito mais altas que as dos supercondutores do Tipo I, como é o caso das cerâmicas baseadas em óxidos de cobre.

Nos supercondutores do tipo II, há dois campos críticos, H_{c1} e H_{c2} . Para campos magnéticos de intensidade igual ou inferior ao campo crítico H_{c1} , o material apresenta o estado Meissner. Para campos magnéticos de intensidades entre H_{c1} e H_{c2} , o Efeito Meissner não é completo, ou seja, há penetração parcial do fluxo magnético no material, entretanto o estado supercondutor permanece (figura 12). Para campos magnéticos acima do campo crítico H_{c2} , o estado supercondutor é suprimido. Dessa forma, os supercondutores do tipo II apresentam dois estados: o Estado Meissner e o Estado Misto (estado entre H_{c1} e H_{c2}). O campo crítico H_{c2} pode ser muito maior que H_{c1} e ambos dependem da temperatura.

A magnetização nos supercondutores do tipo II atinge um valor máximo, em valor absoluto, em H_{c1} . No Estado Misto, a magnetização tende a zero à medida que o campo externo aplicado aproxima-se de H_{c2} , quando então, a magnetização é nula, como mostra a figura 12.

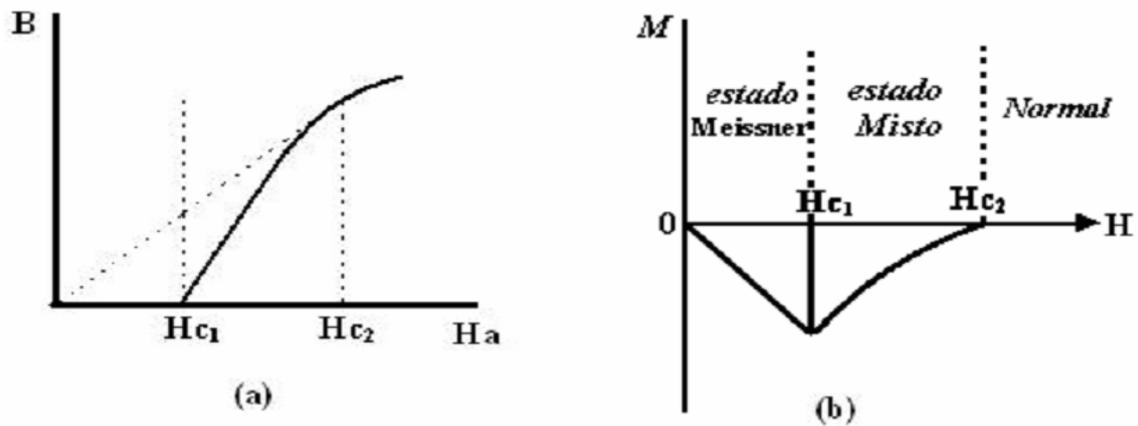


Figura 12 - Representação para Supercondutores do tipo II: (a) Variação do fluxo magnético B em função do campo aplicado H_a (b) Magnetização M em função do campo externo aplicado H .

OSTERMANN, F ; PUREUR, P. **SUPERCONDUTIVIDADE**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAew7YAE/supercondutividade#> >. Acesso em 29/11/2014.

O supercondutor do Tipo II tem maior valor em utilidade tecnológica, pois valores altos de fluxo magnético final e força repulsiva podem ser encontrados em muitos sistemas quando expostos a temperaturas próximas do zero absoluto.

Na região entre H_{c1} e H_{c2} , dizemos que o Efeito Meissner é incompleto, ou que na amostra se estabelece um Estado Misto no qual ocorre penetração parcial do fluxo magnético. Ambos os campos críticos, H_{c1} e H_{c2} , dependem da temperatura e se anulam em T_c , assim como H_c nos sistemas de tipo I. [2 , 5]

A figura 13 ilustra o comportamento dos supercondutores Tipo I e II.

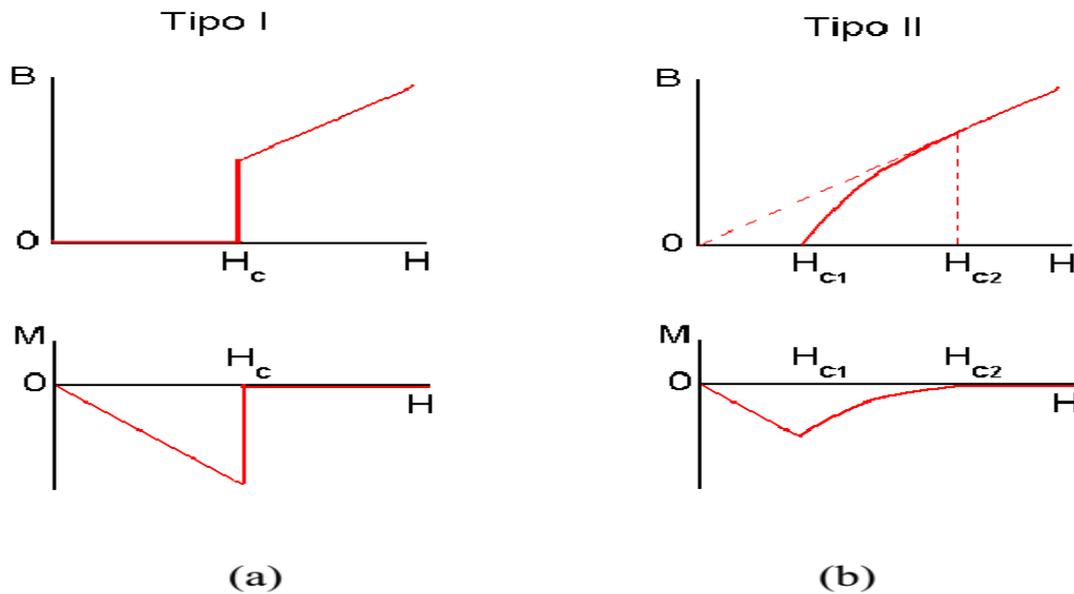


Figura 13 - Variação do Fluxo magnético B e Magnetização M em função da intensidade de campo magnético H aplicado em supercondutores (a) do tipo I e (b) do tipo II.

ESCOLA DO CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS, 2, 2012, Rio de Janeiro. *Supercondutividade: Uma Introdução*. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001089.pdf> >. Acesso em 29/11/2014.

3.3 CASO PARTICULAR DO SUPERCONDUTOR TIPO II: ESTADO MISTO

Com a descoberta dos materiais supercondutores do Tipo II, o interesse nas aplicações dos materiais supercondutores aumentou, devido principalmente a possibilidade de utilização do material no estado supercondutor em campos magnéticos mais elevados, já que $H_{c2} \gg H_{c1}$.

O ESTADO MISTO

O comportamento dos supercondutores do Tipo II em presença de um campo magnético é caracterizado por dois campos críticos, ver o diagrama de fases na figura 14. Na região entre os campos críticos, que são dependentes da temperatura e estabelecidos um estado peculiar, denominado de Estado Misto. Neste intervalo de campos ocorre penetração parcial do fluxo magnético no material sem que suas propriedades supercondutoras sejam suprimidas.

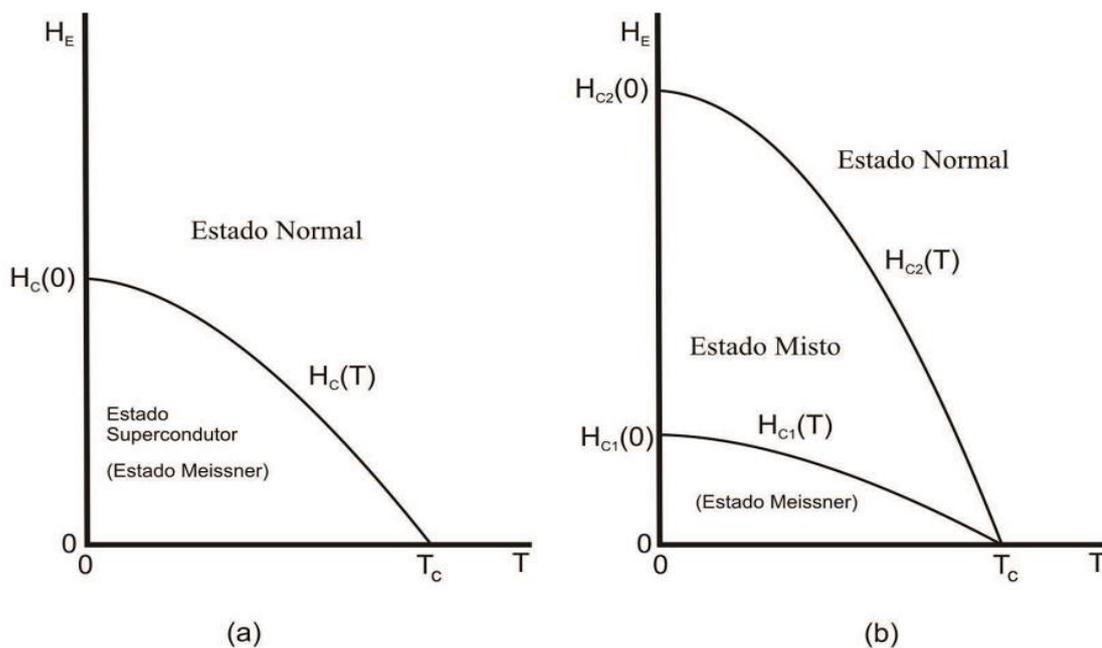


Figura 14 - Diagrama de fases do campo magnético em função da temperatura para supercondutores :
(a) Tipo I e (b) Tipo II.

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, 2, 2012, Recife. *Supercondutividade: um século de desafios e superação*. Recife, 2012. Disponível em: < <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/342602.pdf> > . Acesso em: 16/12/2014.

A estrutura do Estado Misto é possível porque há um ganho energético para o sistema com a formação de interfaces entre regiões normais e supercondutoras. Nos supercondutores do Tipo I, a formação de tais fronteiras não é favorável energeticamente. Conseqüentemente o custo energético da expulsão Meissner , inviabiliza o estado supercondutor quando a indução magnética alcança o valor crítico.

No Estado Misto, a penetração do fluxo ocorre na forma de vórtices, ou fluxóides, que apresentam a estrutura de um núcleo cilíndrico circundado por supercorrentes de blindagem. A orientação dos fluxóides é paralela às linhas de indução magnética e no núcleo de cada vórtice o material apresenta Estado Normal, veja Figura 15. Cada vórtice é atravessado por apenas um quantum de fluxo magnético que é dado por:

$$\varphi_0 = \frac{\hbar}{2e} = 2,068 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

,em que \hbar é a constante de Planck e e é a carga elementar.

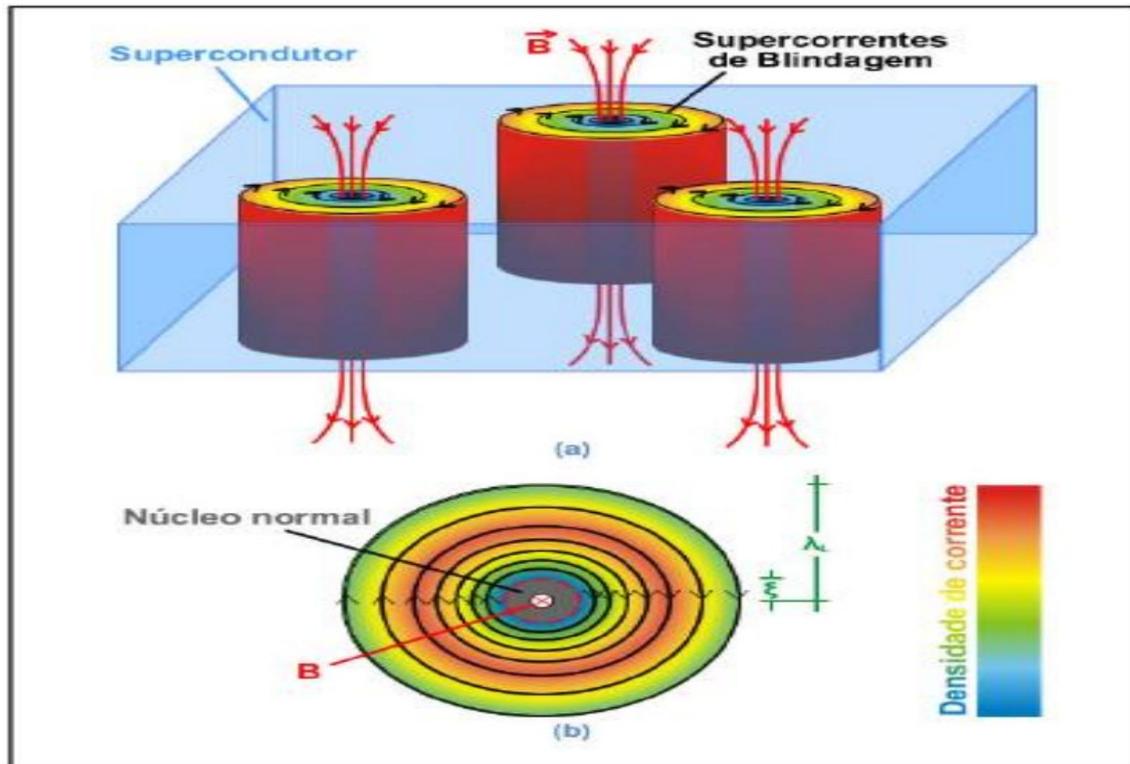


Figura 15 - (a) Estrutura de vários vórtices no interior do supercondutor do tipo II. (b) Vista superior de um vórtice.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 3, 2013, Rio Grande do Sul. *Estudo de Irreversibilidades Magnéticas no Supercondutor Granular*. Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78346/000898827.pdf?sequence=1> >. Acesso em 29/11/2014.

Como pode ser visto na Figura 15 - (b), o núcleo normal tem raio igual ao comprimento de coerência ξ , enquanto que a espessura máxima da distribuição das correntes de blindagem é igual ao comprimento de penetração λ_L . A distribuição desses vórtices no supercondutor do tipo II ocorre de acordo com a teoria de Abrikosov. Essa teoria diz que os vórtices se repelem entre si através da força de Lorentz, pois as linhas de fluxo magnético são circundadas por supercorrentes de blindagem, tendendo a formar uma rede de vórtices com geometria hexagonal ou triangular de estrutura periódica, chamada rede de Abrikosov, veja Figura 16. A rede hexagonal ou triangular corresponde à estrutura mais estável, ou seja, o estado de menor energia.

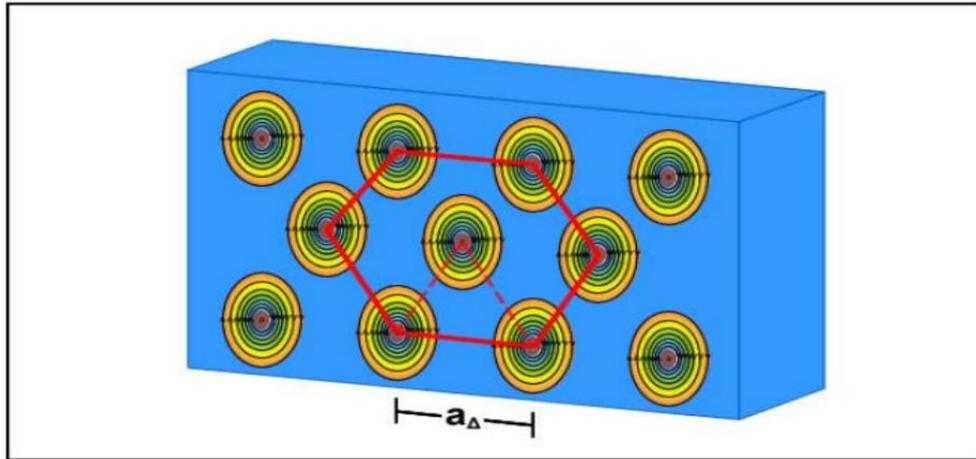


Figura 16 - Arranjo hexagonal de vórtices num supercondutor do tipo II no Estado Misto.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 3, 2013, Rio Grande do Sul. *Estudo de Irreversibilidades Magnéticas no Supercondutor Granular*. Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78346/000898827.pdf?sequence=1> >. Acesso em 29/11/2014.

Nessa configuração a distância de separação entre os vórtices é dada por

$$a_{\Delta} = 1,075 \sqrt{\frac{\varphi_0}{B}}$$

Note que com o aumento da indução magnética , a distância diminuiria. Quando a_{Δ} for da ordem do comprimento de coerência ξ , então os núcleos normais tenderiam a se sobreporem, destruindo a supercondutividade do material. Neste ponto o material passaria do Estado Misto para o Estado Normal, onde é determinado o campo crítico H_{c2} .

Uma das características desejadas para um supercondutor é a de que ele possa transportar a maior densidade de corrente sem transacionar para o Estado Normal, na maior temperatura possível. A maneira mais eficiente de aumentar a densidade de corrente num supercondutor é evitar o movimento dissipativo e viscoso dos fluxóides, devido a própria força de repulsão dos fluxóides entre si

que tende a movê-los coletivamente, isso pode ser obtido com a inserção controlada de defeitos que atuam como centros aprisionadores de fluxóides. Os defeitos aprisionadores dos fluxóides podem ser de natureza intrínseca ou extrínseca, os primeiros são aqueles relacionados ao material, e para o caso do YBCO a deficiência de oxigênio na amostra é um defeito intrínseco. Os defeitos de natureza extrínseca são aqueles que podem ser controlados durante o processo de fabricação do material, tais como a qualidade de material intergranular. Ainda é possível a introdução de defeitos após a preparação da amostra, como por exemplo, a irradiação da amostra com feixes de íons.

Os centros de aprisionamento evitam que os fluxóides mudem constantemente de posição, evitando que ocorra perda de energia no supercondutor e fazendo com que surja uma força restauradora oposta, caso haja mudança no campo externo.

Devido ao aprisionamento de vórtices muitas vezes o número de fluxóides presentes na amostra é diferente do que seria esperado numa condição de equilíbrio termodinâmico. Assim muitas propriedades dos supercondutores do tipo II sob campo magnético aplicado exibem efeitos irreversíveis. E um destes efeitos é a histerese magnética. [14, 12]

CAPÍTULO 4

TEORIAS

4.1 *PARES DE COOPER*

No Estado Normal de um sistema metálico, os elétrons de valência se comportam como se fossem partículas quase independentes. O modelo mais simples foi feito para representar estes sistemas, no qual se supõe que os elétrons de valência são livres para se propagar pelo volume metálico, podendo interagir com o potencial cristalino periódico. Um elétron normal que se desloca pela rede cristalina de um condutor vai se chocando com os átomos da rede, perdendo energia e aquecendo o material. Isso é chamado de "efeito Joule" e ocorre em todo condutor normal.

O fenômeno da supercondutividade começou realmente a ser entendido em 1956, quando Leon Cooper teve a idéia de que os elétrons que transportam a "super corrente" se associam em pares enquanto se deslocam pelo material. Cooper mostrou que dois elétrons podem se associar formando o que hoje se chama um "par de Cooper". Logo se desconfiou que esses pares de Cooper poderiam ser os responsáveis pela corrente supercondutora em materiais a baixas temperaturas. Ao se propagarem, os elétrons interagem com os íons positivos da rede cristalina, produzindo uma deformação local, ver figura 17 . Esta deformação aumenta a densidade de carga positiva na região atravessada pelos elétrons. Contudo, as velocidades eletrônicas típicas são muito maiores que as velocidades iônicas e a deformação da rede acompanham com certo atraso a passagem dos elétrons, ver figura 18. Eventualmente, este processo pode produzir um acúmulo de carga positiva na região entre os elétrons, o que produz uma fraca força de atração entre as partículas. Em condições de baixa desordem térmica em que as vibrações atômicas incoerentes são minimizadas, esta atração efetiva pode produzir um par de elétrons ligados. O Par de Cooper é formado por elétrons com momentos lineares iguais em módulo, porém de sentidos diametralmente opostos. Os spins dos elétrons pareados também são opostos. [17]

Podemos representar a função de onda de um Par de Cooper como:

$$\psi = (\vec{p} \uparrow; -\vec{p} \downarrow)$$

Em que $(\vec{p} , -\vec{p})$ representam os momentos lineares dos elétrons pareados e $\downarrow \uparrow$) seus spins. É importante notar que a interação dos elétrons de condução com as vibrações da rede cristalina é um processo quântico, tecnicamente denominado elétron-fônon.

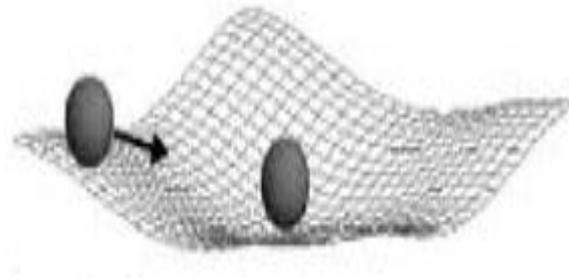


Figura 17 - Representação da atração entre elétrons na formação de Pares de Cooper. Assim como uma bola de boliche é atraída por outra que está rolando ao meio de um colchão de água, como pode ser visto na figura acima, um elétron é atraído pela deformação na rede cristalina provocada por outro elétron.

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, 4, 2001, São Paulo. *Introdução à Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MgB₂: Uma Abordagem Didática*. São Paulo, 2001. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172001000400004&script=sci_arttext >. Acesso em 29/11/2014.

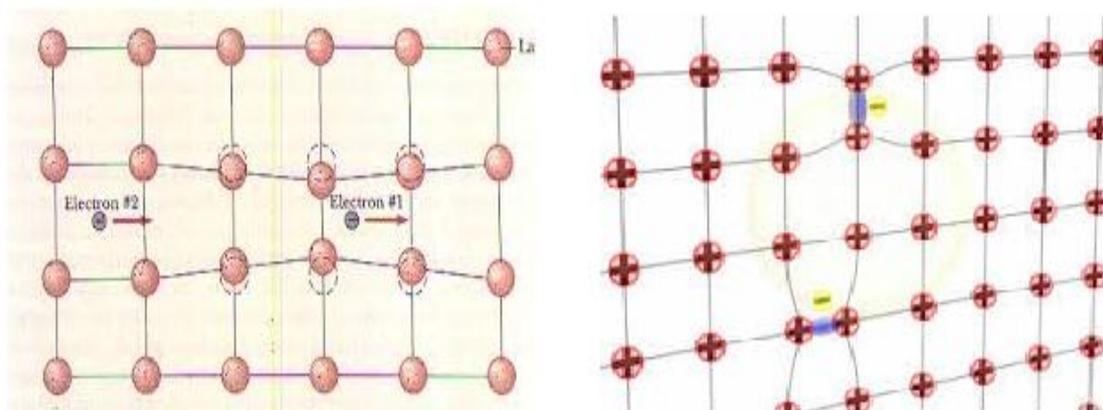


Figura 18 - Ilustração esquemática do processo de interação indireta entre dois elétrons mediada por deformações da rede cristalina. Notar que apenas dois elétrons estão representados, pois muitos outros pares de elétrons coexistirão na mesma região do cristal.

OSTERMANN, F ; PUREUR, P. **SUPERCONDUTIVIDADE**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAew7YAE/supercondutividade#> >. Acesso em 29/11/2014.

Normalmente, dois elétrons, ambos com carga negativa, não podem chegar perto um do outro por causa da forte repulsão coulombiana. No entanto, Cooper sugeriu que, dentro de um sólido metálico, dois elétrons poderiam vencer essa repulsão mútua com a ajuda de uma excitação da rede cristalina do material, comumente chamada de "fônon". Portanto, para entender como são os pares de Cooper, vejamos primeiro como é um fônon.

Um fônon é uma excitação mecânica que se propaga pela rede cristalina de um sólido. Assim como os fótons são os quanta da radiação eletromagnética, os fônons são os quanta da radiação acústica. Normalmente, essa excitação, que se desloca como uma onda pelo material, é causada pela agitação natural existente em todo sistema sujeito a uma temperatura finita, ver figura 20. Ela consiste de pequenos deslocamentos dos átomos da rede. É claro que, quanto maior a temperatura maior o número de fônons, e esses fônons se propagam em todas as direções dentro do material. Analogamente aos fótons que cujo número não é fixo ou conservado, também o número de fônons não se conserva ou permanece fixo, o que significa que estas excitações não obedecem ao Princípio da Exclusão de Pauli, o qual proíbe que duas partículas ocupem o mesmo nível de energia, logo é permitido se ter um número arbitrário de fônons ocupando um estado quântico. Os elétrons são espalhados pelas imperfeições

da rede devido a defeitos estruturais ou impurezas num cristal. E as vibrações da rede de íons em modos normais que constituem algo como ondas de som percorrendo o sólido; e estes são chamados de fônons. Neste caso, como os fônons se propagam com velocidades inferiores às velocidades dos elétrons, os processos de emissão da excitação por um elétron e de absorção pelo outro não são simultâneos (figura 19). [17 , 11]

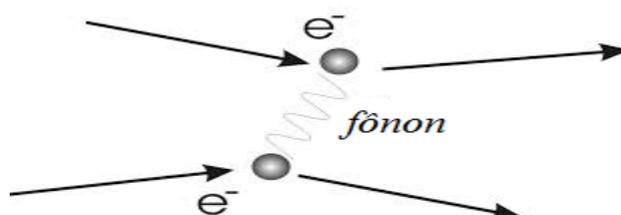


Figura 19 - Diagrama representando a interação entre dois elétrons mediada pela troca de um fônon, representado pela linha ondulada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, 3, 2010, Ponta Grossa. *Processamento, Caracterização e Estudo de Fenômenos Críticos nos Sistemas Supercondutores*. Ponta Grossa, 2010. Disponível em: < http://fisica.uepg.br/ppg fisica/Public/Projetos/1316461911_.pdf >. Acesso em 29/11/2014.

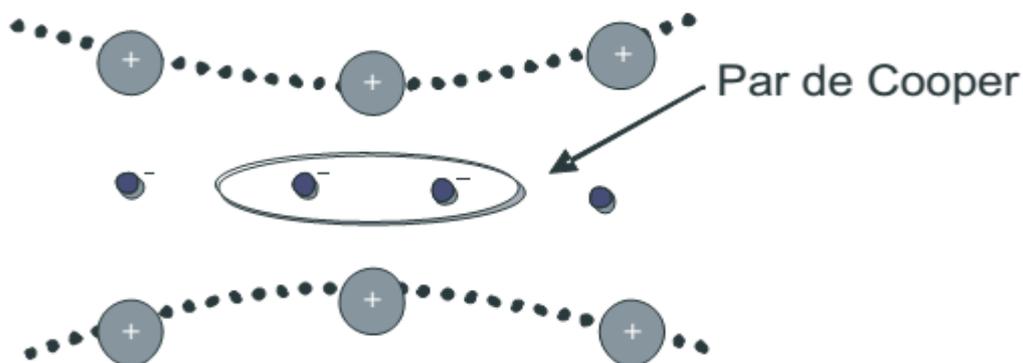


Figura 20 - Movimento do Par de Cooper por uma rede cristalina. As distorções da rede são provocadas pela passagem de um elétron que acarreta na atração de outro. A distorção é o fônon emitido pelo primeiro elétron e capturado pelo segundo.

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, 2, 2012, Recife. *Supercondutividade: um século de desafios e superação*. Recife, 2012. Disponível em: < <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/342602.pdf> > . Acesso em: 18/12/2014.

4.2 *O EFEITO ISÓTOPO*

Uma das manifestações experimentais dos supercondutores que demonstra a importância das deformações dinâmicas da rede cristalina no processo de formação dos Pares de Cooper é o efeito isótopo. Segundo este efeito, a temperatura crítica dos supercondutores depende da massa dos átomos componentes do material, conforme a relação:

$$T_c = AM^{-\alpha}$$

em que A é uma constante, M é a massa atômica e α é uma expoente cujo valor é, em muitos casos, próximo a $0,5$. O fato de que uma propriedade eletrônica (T_c) depende de uma propriedade tipicamente nuclear (a massa do isótopo M) leva a crer que as vibrações de rede interferem no processo de pareamento. Supondo que os átomos vibram em torno de suas posições na rede cristalina como Osciladores Harmônicos acoplados. [17]

4.3 *TEORIA BCS*

Só após 46 anos da descoberta de Onnes é que surgiu uma explicação bem sucedida do fenômeno da supercondutividade. Em 1957, os físicos John Bardeen, Leon Cooper (o mesmo dos Pares) e Robert Schrieffer apresentaram um modelo teórico que concordava muito bem com as observações experimentais nos supercondutores. Esse modelo ficou conhecido por Teoria BCS, das iniciais dos autores, e lhes rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1972. Bardeen já recebera outro Nobel pela invenção do transistor e, até hoje, foi o único a receber dois prêmios de Física.

A teoria BCS, analisa detalhadamente o acoplamento entre elétrons e fônons, mostra que os elétrons dos pares de Cooper têm energia ligeiramente inferior à energia dos elétrons individuais. Em termos técnicos, diz-se que existe um "gap" de energia separando os elétrons emparelhados dos elétrons normais ou que o estado supercondutor está separado do estado normal por um "gap" de energia. Esse "gap" seria originado da interação elétron-fônon-elétron. Essa interação indireta entre dois elétrons acontece

quando o primeiro elétron interage com a rede cristalina e a deforma. O segundo elétron interage com a rede cristalina deformada e altera seu estado, de modo a diminuir sua energia. Essa interação entre os elétrons é, na verdade, atrativa. O par de elétrons que se interage possui característica central, que é: se um orbital com vetor de onda k e spin *up* está ocupado, então um orbital com vetor de onda $-k$ e spin *down* também está ocupado, o mesmo ocorrendo pra estados desocupados. Esse par de elétrons recebe o nome de par de Cooper, e é essencial para a teoria BCS.

Quando um elétron, em um condutor normal, interage com os átomos da rede, dá-se uma troca de energia, como costuma acontecer em toda interação. Na interação, o elétron pode transferir energia para os átomos, como uma bola de sinuca se chocando com outra, e, no processo, os átomos são "excitados". Isto é, a energia da interação gera uma vibração nos átomos da rede. No entanto, se dois elétrons já estiverem ligados em um par de Cooper, essa interação com outros átomos da rede só será possível se a energia trocada for igual ou maior que a energia do "gap". Quando a temperatura é alta, há muita disponibilidade de energia térmica para isso, e os pares de Cooper nem conseguem se formar, ou, quando se formam, são logo aniquilados. No entanto, baixando-se a temperatura, pode-se chegar a um valor no qual a energia disponível para trocas térmicas é menor que a energia do "gap". Quando isso acontece, alguns pares de Cooper não são aniquilados pela agitação térmica. Mesmo que os elétrons de um par se choquem com átomos da rede, não haverá troca de energia entre eles. Em processos quânticos, como são esses choques, só pode haver troca de energia se o "gap" for vencido. Não pode haver troca parcial de energia. O choque, se houver, será "*elástico*", sem perda de energia pelos elétrons.

A temperatura na qual o material fica supercondutor, chamada de Temperatura Crítica (T_c), é uma medida do tamanho do "gap" de energia. Em um supercondutor típico, como aqueles conhecidos até a década de 80, a energia do "gap" é bem pequena, da ordem de 0,01 elétron-volts. Por isso, as temperaturas críticas desses supercondutores são tão baixas. [12]

O gráfico abaixo, *figura 21*, mostra o resultado obtido com o mercúrio, cuja supercondutividade foi descoberta por Onnes. O mercúrio tem vários isótopos, com pesos entre 203 e 198. Como vemos, a temperatura crítica aumenta para isótopos mais pesados, confirmando a teoria que prevê uma dependência com o inverso da raiz da massa atômica (Efeito Isótopo).

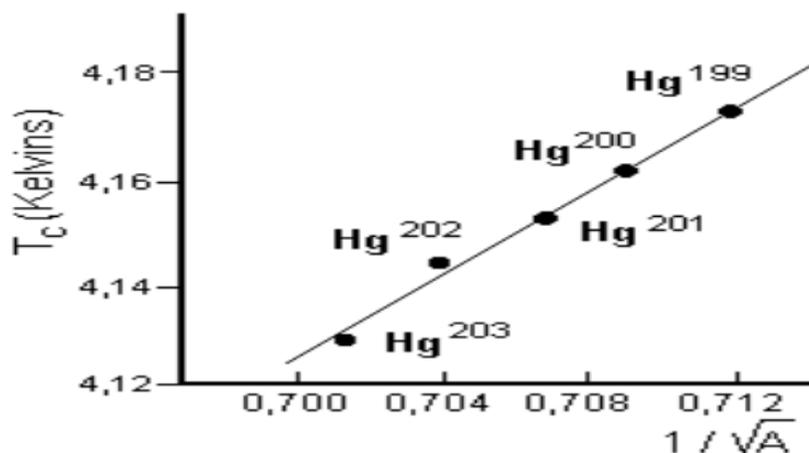


Figura 21 - Variação da temperatura crítica com a massa isotópica.

REDE SOCIAL AO CAMPO ACADÊMICO (Ebah), 7, 2006, Uberlândia. *Apostila de Supercondutividade*. Uberlândia, 2006. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAajUAE/apostila-supercondutores> >. Acesso em 29/11/2014.

A teoria BCS prevê que o "gap" de energia controla o valor da temperatura crítica (T_c). Quanto maior o "gap", maior a temperatura de transição. A previsão da teoria, obtida de uma análise rigorosa da interação elétron-fônon, é que essa relação deve ser:

$$E_{GAP} = (7/2) k T_c$$

Onde k é a chamada constante de *Boltzman*

A experiência concorda de forma excelente com essa previsão, como mostra o gráfico abaixo, *figura 22*. A linha reta é a previsão teórica (equação acima) e os pontos mostram a energia do "gap" medida para vários supercondutores.

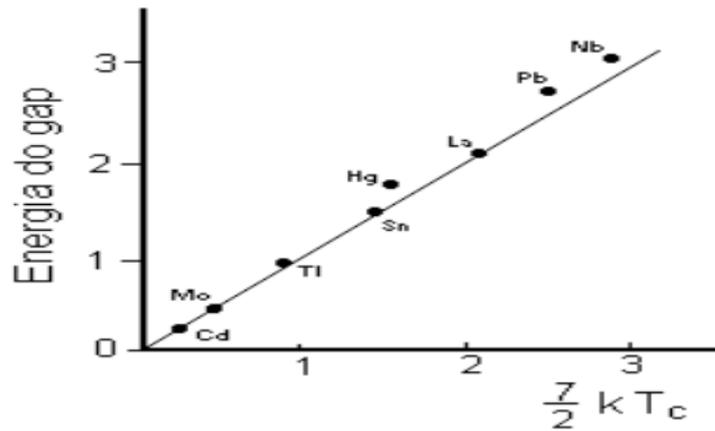


Figura 22 - Energia do "gap" vs temperatura crítica.

REDE SOCIAL AO CAMPO ACADÊMICO (Ebah), 7, 2006, Uberlândia. *Apostila de Supercondutividade*. Uberlândia, 2006. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAjUAE/apostila-supercondutores> >. Acesso em 29/11/2014.

Segundo a teoria BCS, o calor específico de um supercondutor deve crescer exponencialmente, ao se aproximar da temperatura crítica. Isto é:

$$C = A e^{-b/kT}$$

onde A e b são constantes que dependem do material supercondutor. A figura 23 mostra o resultado experimental para o Vanádio, cuja temperatura crítica é 5,4 K. Os pontos são as medidas experimentais e a linha contínua é a previsão da teoria. A inclinação dessa reta, por sinal, permite calcular a energia do "gap", que, para o Vanádio, é de 1,3 meV, concordando bem com as experiências.

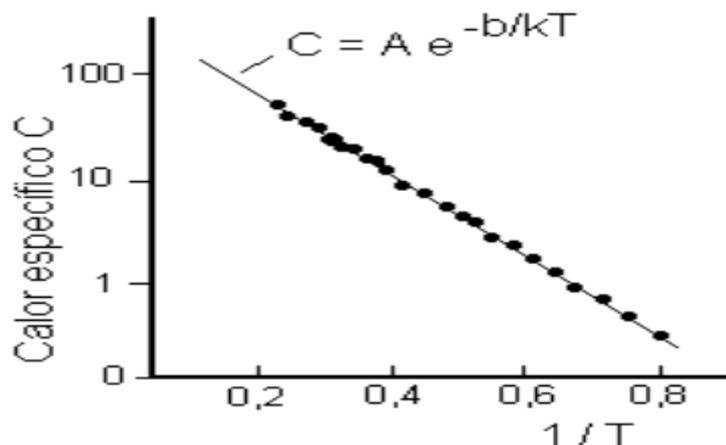


Figura 23 - Calor específico do vanádio em função do inverso da temperatura absoluta.

REDE SOCIAL AO CAMPO ACADÊMICO (Ebah), 7, 2006, Uberlândia. *Apostila de Supercondutividade*. Uberlândia, 2006. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAjjUAE/apostila-supercondutores> >. Acesso em 29/11/2014.

Em suma, na teoria BCS, a atração entre pares de elétrons mediada por oscilações da rede cristalina é a responsável pela supercondutividade. Os pares de Cooper formam um condensado que flui sem resistência pelo material e atua expelindo campos magnéticos externos fracos, ocasionando o efeito Meissner.

Portanto, a teoria BCS teve enorme sucesso, explicando muito bem o comportamento dos materiais supercondutores conhecidos até a década de 80 do século passado. Mas, em 1986, um novo tipo de supercondutor surgiu e a história se modificaria.

4.4 TEORIA DOS CUPRATOS SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA (HTSC)

Nos anos seguintes a descoberta de Onnes, observou-se esta estranha propriedade em outros elementos como o Estanho (*Sn*) e o Chumbo (*Pb*) que apresentavam esta fascinante propriedade a 3,7 K e 7,2 K, resultados estes que mostravam que a supercondutividade não era um fenômeno presente apenas no Mercúrio (Hg), como chegou a ser sugerido na época. A busca por materiais que poderiam superar a característica resistiva quando submetidos a grandes aplicações de

correntes e campos magnéticos começou a ser de grande importância, iniciando uma corrida para se conseguir elevar a temperatura no qual os materiais mantêm suas propriedades supercondutoras. Desde então vários outros sistemas supercondutores passaram a aparecer, com as mais variadas características, e não tem cessado de aumentar. Vejamos a figura 24 que mostra uma tabela com diversos tipos de supercondutores de baixa temperatura crítica. [10 , 13 , 17]

COMPOSTO	T_c (K)	H_c(T)
LaMo ₆ S ₈	7	45
VTi	7	11
NbTi	9,8	15
Sn Mo ₆ S ₈	12	34
V ₃ Ga	14	21
Pb Mo ₆ S ₈	15	60
V ₃ Si	17	25
Nb ₃ Sn	18	24
Nb ₃ Ge	23.2	38

Figura 24 - Tabela de alguns materiais supercondutores de baixa temperatura.

ESCOLA POLITÉCNICA DE ENSINO DE FÍSICA, 1, 2008, Rio de Janeiro. *Estudo e Simulações do Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor*. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001089.pdf> >. Acesso em 29/11/2014.

A liga NbTi (Nióbio-Titânio) tem grande participação no mercado dos supercondutores, seguida pelo composto intermetálico Nb₃Sn (Nióbio-Estanho), porém, devido a necessidade de resfriamento a hélio líquido, a utilização destes materiais em aplicações no setor elétrico não são atrativos economicamente. Nas pesquisas com novos materiais observou-se que somente com o uso de metais não era possível elevar a temperatura crítica, isto durou apenas até a descoberta da liga MgB₂ , com T_c de 30 k .

Na década de 80, foi observada a supercondutividade em óxidos cerâmicos, especialmente nos chamados cupratos, ver figura 25 . O primeiro foi descoberto no início de 1986, por Karl Alex Muller e Georg Bednorz . Este composto, formado por Lantânio, Bário, Cobre e Oxigênio, cuja fórmula química é $La_xBa_{5-x}Cu_5O_{5(3-y)}$, apresentou T_c em torno de 30K. Uma modificação na estequiometria, com fórmula

química, $La_{2-x}Ba_xCuO_4$, elevou a T_c para 38 K. Em 1987 foi descoberto por C.W. Chu e colaboradores, um cuprato com temperatura crítica acima do ponto de liquefação do nitrogênio (77 K). Este composto constituído por Ítrio, Bário, Cobre e Oxigênio, apresenta temperatura crítica de aproximadamente 92 K e sua fórmula química é $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Nesses óxidos supercondutores, os planos CuO_2 desempenham um papel chave para a existência da supercondutividade.

A descoberta dos materiais supercondutores de alta temperatura crítica (HTSC - High Temperature Superconductors), principalmente aqueles com temperatura crítica superior a 77 K, tornou-se possível seu resfriamento com o nitrogênio líquido, que possui menor custo que a refrigeração com hélio líquido, viabilizando a utilização dos materiais supercondutores em aplicações no setor energético (figura 26).[10]

<i>COMPOSTO</i>	<i>TC (K)</i>
$La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$	39
$YBa_2Cu_3O_7$	92
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	< 96 K
$Bi_2SrCa_2Cu_3O_{10}$	110
$Tl_2Ba_2CuO_6$	90
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$	110
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125
$TlBa_2CaCu_2O_7$	91
$TlBa_2Ca_2Cu_3O_9$	116
$TlBa_2Ca_3Cu_4O_{11}$	122
$HgBa_2CuO_4$	95
$HgBa_2CaCu_2O_6$	122
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	133

Figura 25-Tabela com alguns cupratos supercondutores de alta temperatura e com $T_c > 30$ K

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2, 2010, Mato Grosso do Sul. *Estudo sobre Supercondutividade e suas aplicações*. Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: < <http://fisica.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> >. Acesso em: 28/11/2014.

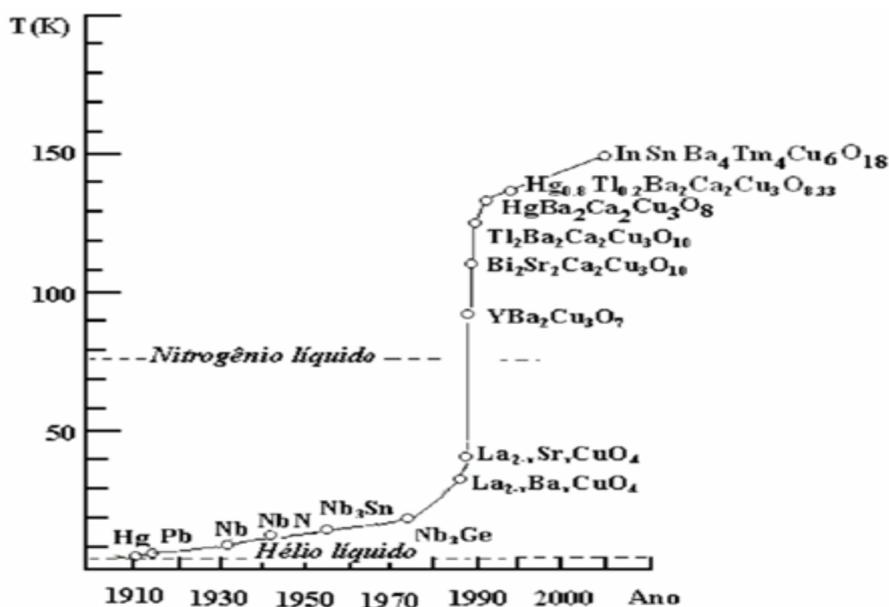


Figura 26- Gráfico da evolução da Tc dos supercondutores desde a sua descoberta.

ESCOLA DO CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS, 2, 2012, Rio de Janeiro. *Supercondutividade: Uma Introdução*. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001089.pdf> >. Acesso em 29/11/2014.

A estrutura cristalina dos cupratos supercondutores é anisotrópica (característica peculiar a certos materiais em que uma ou mais propriedades dependem da direção em que são observadas no meio), caracterizando-se pela presença de planos atômicos paralelos de $Cu-O_2$, que são os responsáveis pelas propriedades eletrônicas das fases normal e supercondutora, os quais são separados por átomos de Y, La, Ba ou Sr. Além dos planos de $Cu-O_2$ a estrutura dos óxidos supercondutores possui reservatórios de cargas constituídos de cadeias de $Cu-O$. Verifica-se que para os HTSC contendo Bismuto (Bi), Tálho (Tl) ou Mercúrio (Hg), a temperatura crítica aumenta com o número de planos de $Cu-O_2$, o que evidencia a importância desses planos para a supercondutividade dos óxidos cerâmicos, ver as figuras 27 e 28. [16]

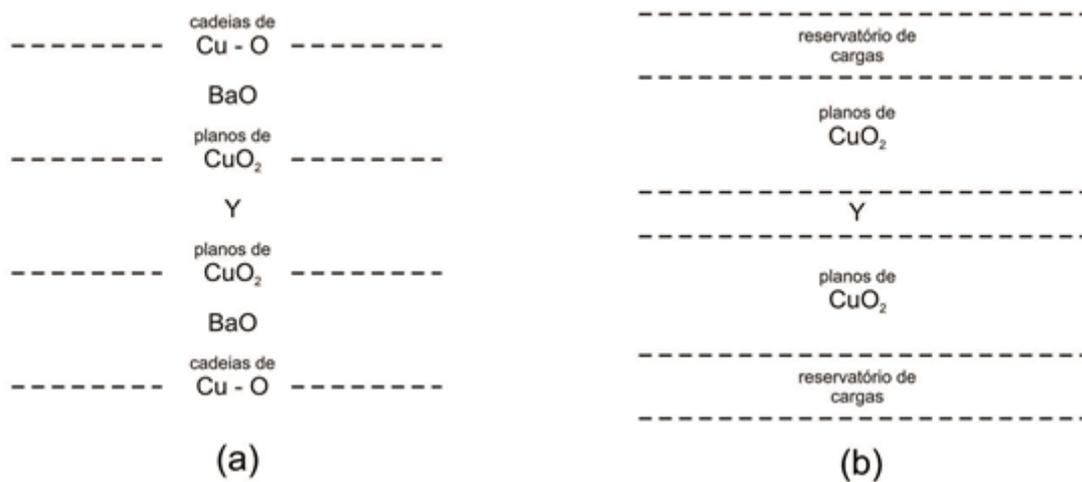


Figura 27- (a) Esquema da estrutura do $YBa_2Cu_3O_7$ e (b) Modelo em camadas.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, 3, 2010, Ponta Grossa. *Processamento, Caracterização e Estudo de Fenômenos Críticos nos Sistemas Supercondutores*. Ponta Grossa, 2010. Disponível em: < http://fisica.uepg.br/ppg fisica/Public/Projetos/1316461911_.pdf >. Acesso em 29/11/2014.

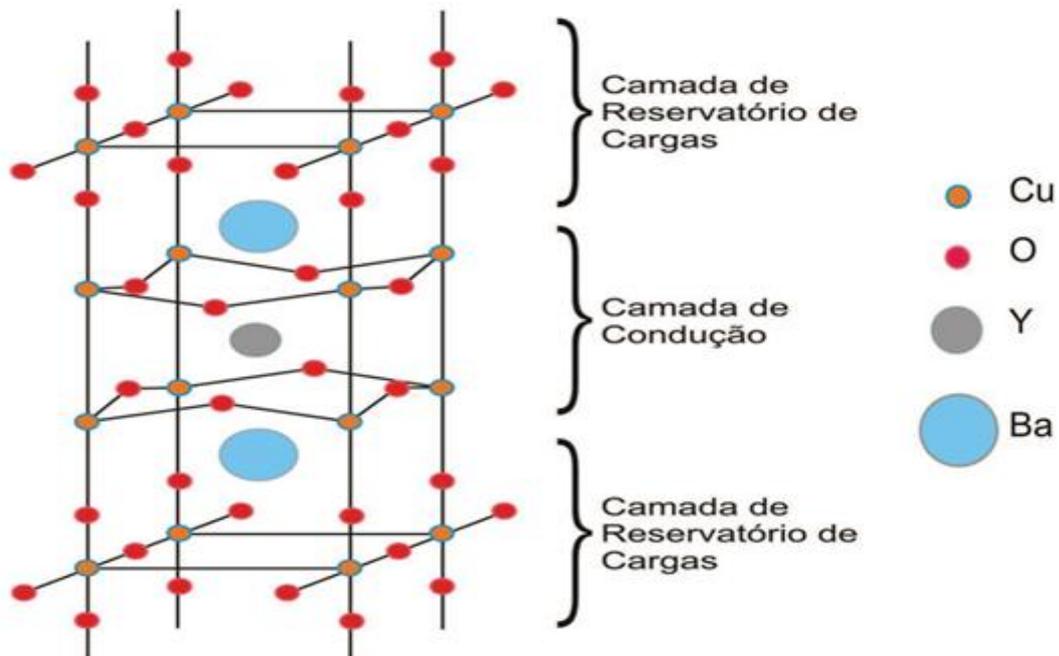


Figura 28- Estrutura ortorrômbica do $YBa_2Cu_3O_7$.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, 3, 2010, Ponta Grossa. *Processamento, Caracterização e Estudo de Fenômenos Críticos nos Sistemas Supercondutores*. Ponta Grossa, 2010. Disponível em: < http://fisica.uepg.br/ppg fisica/Public/Projetos/1316461911_.pdf >. Acesso em 29/11/2014.

A complexidade das propriedades eletrônicas dos cupratos de alta temperatura crítica tem dificultado o desenvolvimento de uma teoria microscópica suficientemente abrangente que seja capaz de descrever tanto o estado normal quanto o estado supercondutor destes sistemas. A teoria aplicável ao estado normal dos metais convencionais, a qual é baseada nos elétrons livres, não descreve adequadamente as propriedades dos cupratos supercondutores. Presume-se que pelo menos dois aspectos novos, porém essenciais, devam ser considerados na teoria eletrônica dos cupratos. Um deles é a forte anisotropia planar, sendo sistemas com estrutura cristalina complexa, na qual planos atômicos de CuO_2 (contendo elétrons de grande mobilidade) são separados por camadas atômicas pouco condutoras. O outro aspecto importante é a forte interação mútua entre os elétrons móveis dos planos CuO_2 , existindo dúvidas quanto a origem e a exclusividade do mecanismo de pareamento elétron-fônon, devido as altas temperaturas críticas desses compostos. Outras possibilidades de mecanismo de pareamento têm sido exploradas, em particular interações envolvendo excitações magnéticas, ou outros tipos de acoplamento puramente eletrônicos. [17, 15]

Existe a discussão de que a teoria do BCS possa ser aplicada aos cupratos supercondutores de alta temperatura crítica. Os pares de Cooper seguem por uma deformação que existe na rede cristalina onde a interação com os íons positivos da rede forçam a passagem de elétrons formando pares, embora originalmente considerados pelos autores da teoria, não são essenciais à teoria. Sendo que a teoria do BCS alcança descrever o processo de condensação de pares quando no estado supercondutor e pode ser aplicada mesmo quando os pares são estabilizados por outro tipo de interação. A fórmula que indica a relação entre os termos é dada por,

$$K_B T_C = \hbar \omega_E e^{-1/\Lambda}$$

na qual K_B é a constante de Boltzmann ($K_B = 1,38 \times 10^{-34}$ J/K), $\hbar = h/2\pi$ ($\hbar = 1,05 \times 10^{-34}$ J.s), ω_E é a frequência angular típica da excitação mediadora da interação atrativa intereletrônica e Λ é um parâmetro que traduz a intensidade da interação entre os elétrons e as excitações mediadoras. Genericamente, a teoria admite que $\Lambda < 1$ (um valor típico é $\Lambda \sim 0,3$). Assim, temperaturas críticas da ordem de $T_c \sim 100$ K exigem frequências ω_E que são altas para serem atribuídas às vibrações de rede, mas também não são facilmente compatibilizadas com excitações de natureza puramente eletrônica. Estes fatos lançam dúvidas sobre a aplicabilidade de uma descrição do tipo BCS nos cupratos supercondutores e têm estimulado o desenvolvimento de outras propostas teóricas. A compreensão das propriedades eletrônicas dos cupratos é um dos maiores desafios atuais da Física da matéria condensada com pesquisas em possíveis outros sistemas a fim de se encontrar compostos com temperaturas críticas mais elevadas bem próximos da temperatura ambiente. [14]

CAPÍTULO 5

PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA SUPERCONDUTIVIDADE

5.1 INTRODUÇÃO

Várias propriedades de um material supercondutor específico devem ser consideradas quando seu potencial para utilização em aplicações tecnológicas é avaliado. Do ponto de vista das propriedades supercondutoras propriamente ditas, os três parâmetros mais importantes são a temperatura crítica (T_c), a indução magnética superior (H_{c2}), e a densidade de corrente crítica (J_c). Em geral, nos supercondutores usados tecnologicamente procura-se maximizar estes parâmetros.

Há diversos fatores adicionais que também devem ser considerados, como, por exemplo, a maleabilidade e outras propriedades mecânicas dos materiais (que são importantes para conformação de dispositivos), a metalurgia (que inclui as técnicas de preparação, manuseio e estabilidade química) e o custo (que é fundamental para a definição da viabilidade econômica). A combinação destes fatores privilegia uns poucos materiais. Dentre estes estão o metal nióbio (Nb), as ligas de nióbio-titânio (Nb-Ti), o composto intermetálico (Nb_3Sn) e os cupratos de alta temperatura crítica BISCCO-2212 ($Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$) e YBCO ($YBa_2Cu_3O_7$).

As aplicações da supercondutividade podem ser divididas em dois tipos, conforme o tamanho do dispositivo. *AS APLICAÇÕES EM GRANDE ESCALA*, que consistem de fios, magnetos, motores, reservatórios de energia e outros. *AS APLICAÇÕES EM PEQUENA ESCALA* dizem respeito a componentes eletrônicos, ativos e passivos, que desempenham variadas funções como detectores, geradores de micro-ondas, filtros, antenas e outros.[17]

5.2 APLICAÇÕES EM GRANDE ESCALA

5.2.1) FIOS DOS SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA

Os cupratos supercondutores de alta temperatura crítica são óxidos quebradiços que não podem ser extrusados na forma de fios como os materiais metálicos e macios. Assim, para conformá-los em fios usa-se a técnica PIT (*powder-in-tube*). O método consiste em reduzir o material a pó e embuti-lo num tubo metálico, para o qual geralmente se usa prata. Uma vez que o pó esteja compactado, o tubo é extrusado na forma de um fio. Após esta etapa, o fio é submetido a um recozimento em alta temperatura que produz a sinterização do material granular em seu interior. Esta técnica foi usada com o YBCO. Porém, em virtude das ligações fracas que ocorrem nas soldaduras entre grãos, bem como da aleatoriedade orientacional existente entre eles, a densidade da corrente elétrica obtida é geralmente baixa e pouco adequada para aplicações tecnológicas.

Uma variante interessante desta técnica é aplicada a fios de *BISCOO-2212*. Neste caso, um fio *PIT* com cerca de 1mm de diâmetro é passado em um laminador até que se obtenha uma fita fina. Na fita assim formada, os grãos de *BISCOO-2212* – que são constituídos de plaquetas crescidas paralelamente aos planos atômicos de CuO_2 – tornam-se fortemente orientados. Esta orientação preferencial melhora consideravelmente a ligação que se forma entre os grãos após o processo de recozimento.[17]

5.2.2) TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA

Uma das aplicações teoricamente mais diretas e simples de fios supercondutores é no transporte de energia elétrica do ponto onde esta é gerada até os centros consumidores. Em geral, esta transmissão é feita por centenas ou milhares de quilômetros. Isto gera perdas consideráveis em fios condutores metálicos normais, aos quais devem ser aplicadas elevadas tensões alternadas que requerem complexos sistemas de transformadores e outros equipamentos. O uso de fios supercondutores simplificaria consideravelmente as redes de transmissão e produziria diminuições notáveis nas perdas. A dificuldade no emprego da tecnologia supercondutora reside no custo e na complexidade das técnicas de resfriamento dos fios a baixas temperaturas. No momento atual, o uso de fios supercondutores metálicos convencionais é pouco atrativo

do ponto de vista econômico. Porém, linhas de transmissão de curta extensão construídas com *BISCOO-2212* e resfriadas a 77 K estão sendo operadas experimentalmente em alguns países. [16]

5.2.3) MAGNETOS SUPERCONDUTORES

Fios supercondutores têm sido enrolados na forma de solenóides para geração de campos magnéticos elevados. Pequenos eletroímãs supercondutores, capazes de produzir campos magnéticos cuja magnitude pode alcançar mais de 20 T , usados principalmente em laboratórios de pesquisa, encontram-se disponíveis comercialmente há vários anos (figura 29).

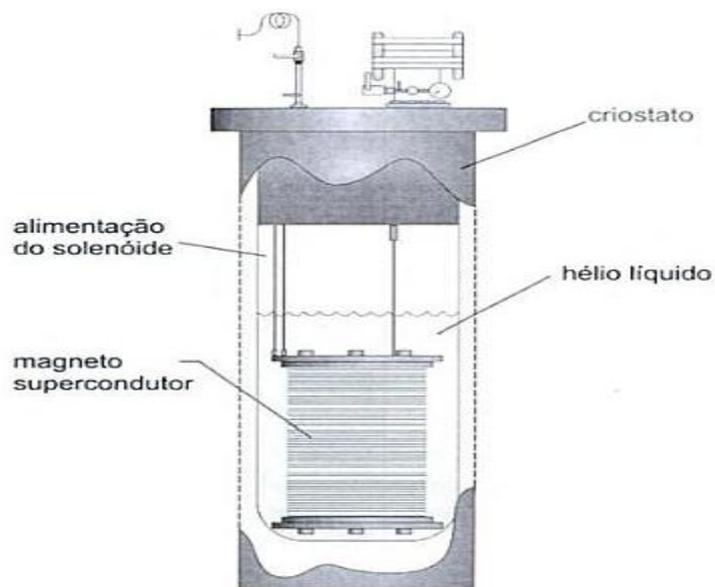


Figura 29- Esquema representando um solenóide supercondutor imerso em hélio líquido, operando no interior de um criostato, que é um sistema de isolamento térmica adequada para possibilitar experimentos em temperaturas muito baixas.

OSTERMANN, F ; PUREUR, P. **SUPERCONDUTIVIDADE**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAew7YAE/supercondutividade#> >. Acesso em 29/11/2014.

Os eletroímãs supercondutores mais populares são aqueles usados nos sistemas de imagem por *Ressonância Nuclear Magnética (RNM)*. Esta técnica tem sido amplamente usada como instrumento de diagnóstico médico, pois imagens de órgão internos do corpo humano podem ser obtidas com grande resolução e sem emprego de radiação ionizante. A Ressonância Nuclear Magnética detecta a posição dos núcleos de hidrogênio (protóns) em diferentes vizinhanças (tecidos) do corpo humano. Campos magnéticos com valores entre 0,5 e 2 T são empregados nesta técnica. Como o paciente deve ser colocado no interior do eletroíma , grandes volumes são necessários, o que favorece a tecnologia supercondutora. [17]

5.2.4) ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O armazenamento de energia eletromagnética em sistemas constituídos por magnetos supercondutores é uma aplicação em pleno desenvolvimento tecnológico. O conceito SMES (*Superconducting magnetic energy storage* – armazenamento de energia magnética por supercondutividade) baseia-se no fato de que um campo magnético estático é um excelente reservatório de energia.

Há uma densidade de energia magnética associada à existência de um campo magnético num dado ponto do espaço que é dado por ;

$$u_M = \frac{1}{2\mu} H^2$$

em que μ é a permeabilidade do material que ocupa o referido ponto ($\mu = \mu_0$, no vácuo). Assim, a expulsão da indução magnética do interior de uma amostra supercondutora pelo efeito Meissner penaliza energeticamente o sistema pela quantidade:

$$E_M = \frac{1}{2\mu} H^2 V$$

em que V é o volume ocupado pela amostra e H é a indução magnética que existiria neste volume se a amostra não estivesse presente. Num super condutor do Tipo II , este custo energético se torna excessivo quando H ultrapassa o valor crítico inferior H_{c1} .

A variação na demanda de energia elétrica é uma fato na maioria das instalações de potência. Assim, as usinas geradoras devem ser projetadas de modo a satisfazer os picos de demanda, o que gera excesso de energia produzida em horários de baixo consumo. A idéia do *SMES* é de servir de reservatório para o excesso de energia produzida, a qual poderia ser liberada posteriormente, quando necessário.

O armazenamento desta energia na forma eletromagnética é vantajoso, pois não é necessário convertê-la em outro tipo de energia e a eficiência pode atingir valores muito próximos ao do ideal. Além do mais, trata-se de um sistema limpo, rápido e flexível, capaz de adaptar às variadas instalações que necessitam de estabilidade no fornecimento de energia elétrica. Pode-se conceber dispositivos *SMES* que atendam desde pequenas plantas industriais até cidades inteiras. Sistemas de transporte por trem ou metrô também podem ser beneficiados por esta tecnologia.

A concepção atual de um *SMES* é a de um toróide supercondutor, que permite o confinamento do campo magnético, ligado a um sistema de controle para carregá-lo ou descarregá-lo, conforme a necessidade. Um sistema de resfriamento do supercondutor também é necessário, conforme a figura 30, abaixo.

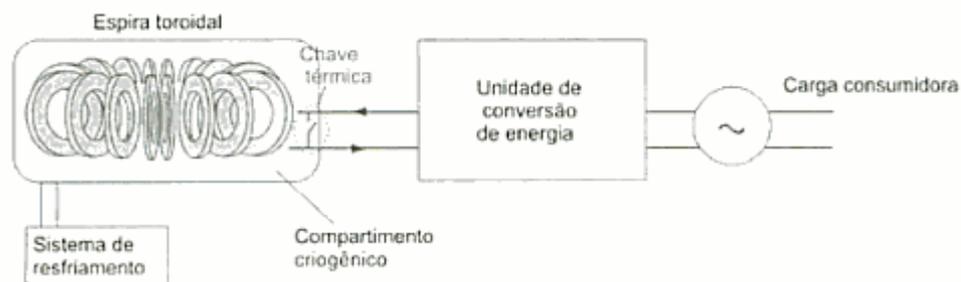


Figura 30- Esquema de um *SMES* baseado num Toróide supercondutor

OSTERMANN, F ; PUREUR, P. **SUPERCONDUTIVIDADE**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAew7YAE/supercondutividade#> >. Acesso em 29/11/2014.

Usando-se a E_M da expressão acima como exemplo, podemos estimar a quantidade de energia potencial magnética armazenada num toróide com perímetro médio de 50m e secção transversal de 10 m^2 , percorrido por uma corrente capaz de gerar uma indução magnética média de 2 T . Obtemos, assim, $E_M \cong 800\text{ MJ}$. Supondo um consumo residencial médio de 100 kW/h mensal, a energia estocada no pequeno SMES usado nesse exemplo poderia, idealmente, suprir a necessidade energética de aproximadamente 1600 residências (ou seja, uma pequena cidade) durante uma hora.

5.2.5) LEVITAÇÃO MAGNÉTICA (MAGLEV)

Uma das mais charmosas aplicações da supercondutividade são os veículos levitados magneticamente. Um exemplo é o trem MAGLEV (sigla para *magnetic levitation* - levitação magnética) que opera experimentalmente há alguns anos.

O princípio de operação do MAGLEV é baseado na repulsão entre solenóides supercondutores localizados dentro do trem (ver figuras 31 e 32) e campos magnéticos gerados por correntes de Foucault induzidas no trilho, que é constituído de metal normal. O movimento do trem produz um fluxo magnético variável sobre o trilho, induzindo as correntes de Foucault. Eletroímãs supercondutores também são usados no sistema de guia, estabilidade e propulsão do trem. A levitação eletrodinâmica produzida pelos solenóides supercondutores elimina o atrito das rodas do trem com os trilhos, que é o principal fator limitante de velocidade. Assim, um trem MAGLEV pode alcançar velocidades superiores a 500 km/h. [17, 12]

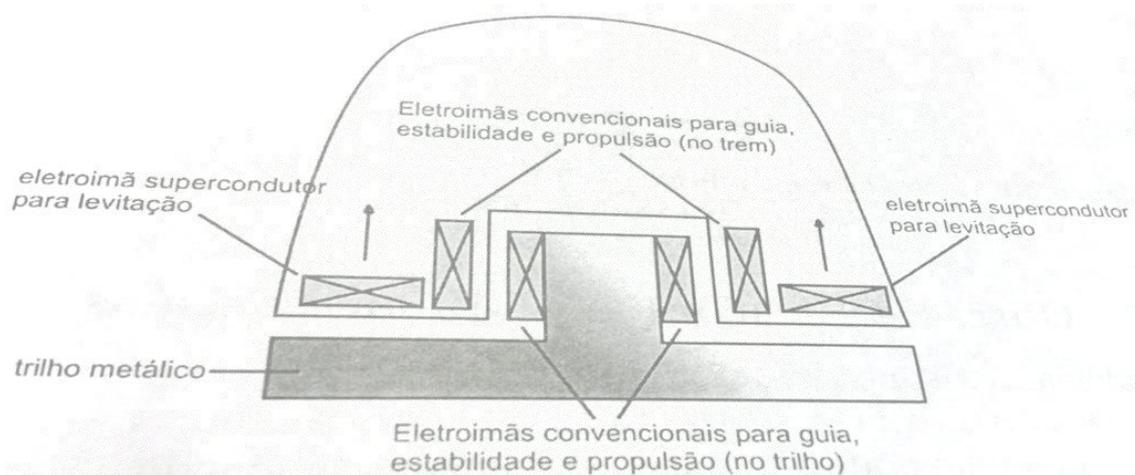


Figura 31 - Diagrama esquemático do trem MAGLEV

OSTERMANN, F ; PUREUR, P. **SUPERCONDUTIVIDADE**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAew7YAE/supercondutividade#> >. Acesso em 29/11/2014.

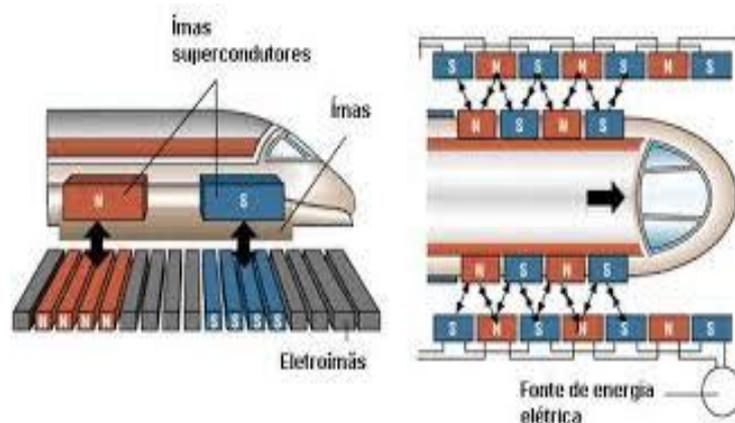


Figura 32- Diagrama esquemático do trem MAGLEV

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2, 2010, Mato Grosso do Sul. *Estudo sobre Supercondutividade e suas aplicações*. Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: < <http://fisica.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> >. Acesso em: 28/11/2014.

A levitação magnética é também interessante em sistemas onde movimentos de alta rotação exigem mancais e rolamentos. A levitação permite evitar o desgaste que esses componentes sofrem. Nestes casos, a levitação passiva - que faz uso do efeito Meissner ou do efeito de blindagem - pode ser usada. Rotações com velocidades

superiores a 100.000 rpm podem ser obtidas com o uso de supercondutores do Tipo II em sistemas de levitação passiva.

Outra possibilidade de emprego da levitação magnética passiva é no armazenamento de energia através do sistema denominado "flywheel" (roda flutuante). A concepção deste sistema está esquematizada na figura 33. A energia é armazenada na forma mecânica, e é essencialmente expressa como

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

em que I é o momento de inércia da roda girante e ω é sua velocidade angular. Quantidade apreciáveis de energia podem ser estocadas neste equipamento simples. O armazenamento e a retirada de energia são feitos através de ímãs permanentes em rotação sobre o "flywheel". O interesse em sistemas desse tipo cresceu bastante após a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica, pois o mancal de suporte é um componente passivo, de geometria simples, e que pode ser construído com cupratos em forma policristalina. Evidentemente, o "flywheel" somente se torna um sistema viável se a perda de velocidade causada pelas forças de atrito do ar sobre a roda que gira for pequena. Estima-se que, dependendo do tamanho do rotor, um "flywheel" será eficiente se a frequência de rotação decair em taxas entre 10^{-4} e 10^{-5} Hz/s. [17, 01]

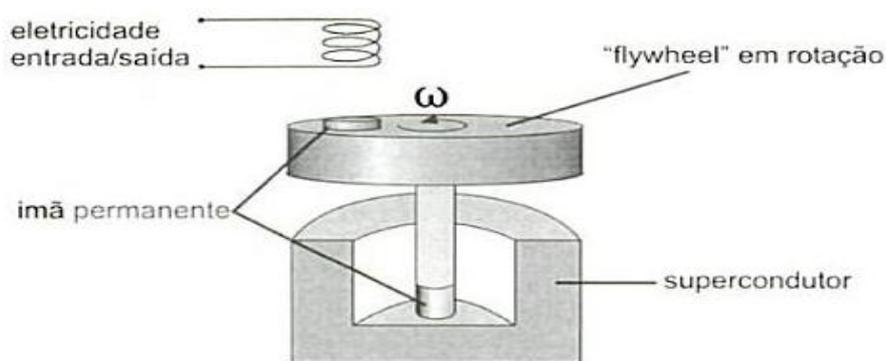


Figura 33- Desenho esquemático de um acumulador de energia do tipo "flywheel" que levita sobre um supercondutor

OSTERMANN, F ; PUREUR, P. **SUPERCONDUTIVIDADE**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAew7YAE/supercondutividade#> >. Acesso em 29/11/2014.

5.2.6) OUTRAS APLICAÇÕES EM GRANDES ESCALAS

A tecnologia dos supercondutores pode ser empregada em diversos outros dispositivos com grandes dimensões. Em motores e geradores elétricos, o tamanho pode ser consideravelmente diminuído pelo uso de supercondutores. Nestes equipamentos são eliminadas as bobinas com núcleos de material ferromagnético que causam perdas apreciáveis de energia.

Aplicações industriais na separação de materiais por campo magnético e na eletrônica de potência também são possíveis. Eletroímãs supercondutores para controle de feixes em grandes aceleradores de partículas, usados na pesquisa em Física de altas energias, são exemplos recentes da tecnologia supercondutora aplicada a dispositivos em grande escala.

5.3) APLICAÇÕES EM PEQUENA ESCALA

Um grande número de pequenos dispositivos são baseados em filmes finos ou pequenas amostras supercondutoras. Alguns destes estão disponíveis comercialmente e, em geral, são empregados em circuitos eletrônicos. Outros tem grande potencial em aplicações variadas, porém a disseminação de seu uso em escala industrial ainda é limitada. Há fatores técnicos que nem sempre são otimizados, tais como confiabilidade, reprodutibilidade, integração em circuitos, necessidade de criogenia e outros. Por outro lado; aspectos econômicos normalmente ligados à concorrência com tecnologias convencionais também têm impedido a rápida popularização da eletrônica supercondutora, apesar de sua superioridade técnica em muitas situações.

5.3.1) JUNÇÕES JOSEPHSON

As principais aplicações dos supercondutores em dispositivos eletrônicos são baseadas no efeito *Josephson*. Este efeito consiste no tunelamento de pares de *Cooper* através de uma fina barreira isolante colocada entre dois eletrodos supercondutores, tal como esquematizado na figura 34. *Brian Josephson* propôs teoricamente a ocorrência deste fenômeno em 1964, o que lhe valeu o prêmio Nobel de Física em 1973.

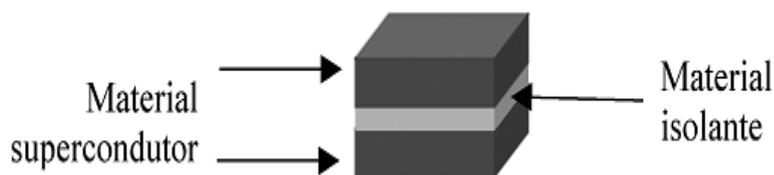


Figura 34 - Exemplo de Junção *Josephson*

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, 2, 2012, Recife. *Supercondutividade: um século de desafios e superação*. Recife, 2012. Disponível em: < <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/342602.pdf> > . Acesso em: 10/12/2014.

A principal característica desse tipo de estrutura é o fato de que, quando uma voltagem constante V_{DC} é aplicada a uma Junção *Josephson*, aparece uma corrente que oscila com uma frequência. [2]

5.3.2) SQUIDS ("*Superconducting Quantun Interference Device*")

A mais importante das aplicações das Junções *Josephson* é realizada num dispositivo denominado SQUID. O dispositivo é muito simples sendo formado basicamente por um pequeno anel supercondutor, contendo uma ou duas Junções *Josephson*, ligado a um circuito elétrico. Este sistema é extremamente sensível ao fluxo magnético que atravessa a área delimitada pelo anel, pois a corrente crítica passando através de uma Junções *Josephson* na presença de um campo magnético extremamente aplicado é modulada com um período de um quantum de fluxo magnético.

Os SQUIDS são usados na detecção de campo magnéticos extremamente fracos, capazes de detectar atividades magnéticas da ordem de $10^{-15} T$. O campo da Terra é em torno de $10^{-6} T$, enquanto que o do cérebro humano é por volta de $10^{-13} T$. Assim, os SQUIDS são usados em magnetômetros muito sensíveis, empregados em laboratórios de pesquisa, em equipamentos de prospecção geológica, em metrologia, em equipamentos para diagnóstico médico e em várias outras aplicações.[17]

A técnica médica mais disseminada que usa um SQUID é a magnetoencefalografia (ver figura 35), que detecta os fracos campo magnéticos gerados por correntes elétricas produzidas em eventos no cérebro. Na maioria das situações, esta técnica de diagnóstico é mais precisa que a eletroencefalografia. O estudo do magnetismo cerebral, possibilitado pelos detectores SQUID, originou um novo ramo da investigação multidisciplinar que se denomina neuromagnetismo. Atividades patológicas do coração também podem ser detectadas através de equipamentos cardiomagnéticos, equipados com sensores SQUID. [13 , 17]

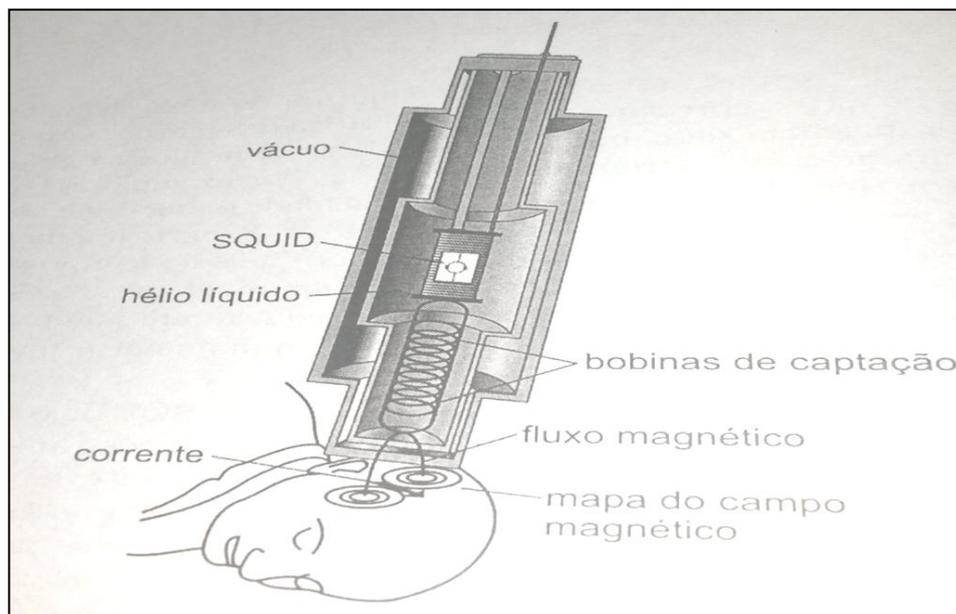


Figura 35 - Representação esquemática de magnetoencefalografia usando SQUID.

OSTERMANN, F ; PUREUR, P. **SUPERCONDUTIVIDADE**. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAew7YAE/supercondutividade#> >. Acesso em 29/11/2014.

CONCLUSÃO

No presente trabalho foram vistas algumas das principais teorias que por sua vez descrevem as propriedades dos supercondutores, mas que em certas ocasiões não conseguem explicar totalmente o que é obtido em laboratório.

A grande busca nos trabalhos de hoje vem sendo uma relação entre a teoria que possa descrever materiais que apresentam uma alta temperatura crítica e o trabalho experimental.

Alguns destes materiais supercondutores já podem ser produzidos em larga escala, mas ainda precisam ser resfriados a baixas temperaturas, porém, o que tem tornado viável a utilização destes materiais é o desenvolvimento de compostos com temperaturas críticas acima da linha dos 74 (nitrogênio líquido), que é muito mais barato e fácil de utilizar. Os cupratos possuem as mais altas temperaturas críticas vistas até hoje.

Uma das aplicações da supercondutividade está ligada a fabricação de máquinas e equipamentos que apresentem uma elevada eficiência no aproveitamento da energia, como no caso dos trens de transporte do tipo MagLev, que podem vir a substituir outros meios de transportes, ajudando também na redução da emissão de gases poluentes.

Devido a eficiência associada ao uso da supercondutividade, alternativas surgem para a alimentação elétrica de cidades. Se toda a energia transmitida para estes centros fosse aproveitada, teríamos um melhor aproveitamento da energia elétrica e, conseqüentemente, custos mais baixos de produção. O desejo de encontrar um material supercondutor que opere a temperatura ambiente pode ser visualizado pela quantidade de trabalhos nesta área, realizado por vários pesquisadores no mundo todo. A análise histórica mostra uma rápida evolução da temperatura máxima nos quais os materiais apresentam propriedades supercondutoras, indicando que estamos perto de obter um material que apresente tal propriedade à temperatura ambiente ou a uma temperatura de mais fácil refrigeração. Um dos fatores que permitiriam alcançar este objetivo seria a elaboração de uma teoria que explicasse todos os fenômenos ligados a supercondutividade, desta forma, as teorias teriam que se unificar para que houvesse uma total compreensão do fenômeno descoberto por *Onnes*.

Hoje, aplicações de supercondutores é uma realidade. Bastam poucos anos para que possamos falar diariamente desta propriedade tão interessante da matéria, pois estaremos sempre utilizando algum aparelho, desde o nosso trabalho a nossa casa, que pode estar presente no deslocamento entre um lugar e outro, acessando computadores, na rede elétrica, ou seja, eles estarão presentes em alguma situação do nosso dia-a-dia.

REFERÊNCIAS

- [1] MARCONI, B. S. C.; ANTÔNIO, C. P. Supercondutividade: um século de desafios e superação, *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 2011. Disponível em < <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/342602.pdf> > Acesso em: 8 setembro 2014, 17:00.
- [2] CHRISTOPHER, T. Modelo de *Hubbard* estendido aplicado ao estudo da supercondutividade aplicado aos compostos de cobalto, UFRS. 2007. Disponível em < <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000601323&loc=2007&1=1d8065476079719a> > Acesso em: 8 setembro 2014, 20:00.
- [3] MARQUES, F. C.; VIANA, G. A. Medida da transição na condutividade de um supercondutor, UNICAMP. 2002. Disponível em < http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2002/981289-A%20SUPERCONDUTIVIDADE.pdf > Acesso em: 15 setembro 2014, 17:00.
- [4] JURELO, A. R.; LOPES, C. S. Processamento, caracterização e estudo de fenômenos críticos nos sistemas supercondutores, UEPG. 2010. Disponível em < http://www.fisica.uepg.br/ppg fisica/Public/Projetos/1316461911_.pdf > Acesso em: 15 setembro 2014, 21:00.
- [5] SILVA, S. A. Processamento e caracterização de amostras supercondutoras utilizando o concentrado de xenotima, UEPG. 2007. Disponível em <http://www.fisica.uepg.br/ppg fisica/Public/Projetos/131654226_2_.pdf > Acesso em: 18 setembro 2014, 21:00.
- [6] PASCOLATI, M. C. V. Dinâmica de vórtices em filmes finos supercondutores de superfície variável, Universidade Estadual Paulista Campos Bauru. 2010. Disponível em < http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/cp132620.pdf > Acesso em: 19 setembro 2014, 21:00.

- [7] SILVA, E.B. Estudo de Materiais Supercondutores: Corrente Crítica de amostras granulares de $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ e instrumentação associada, UNVASF. 2014. Disponível em < http://www.cpgcm.univasf.edu.br/adm/docs/EDUARDO-VFINALREVISAO_WAGNER_31_03_2014.PDF > Acesso em: 20 setembro 2014, 21:00.
- [8] BRANÍCIO, P. S. Introdução à Supercondutividade, suas aplicações e a Mini-Revolução provocada pela redescoberta do MgB_2 : Uma abordagem didática, Revista Brasileira de Ensino de Física. 2001. Disponível em < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172001000400004&script=sci_arttext > Acesso em: 21 setembro 2014, 19:00.
- [9] MOREIRA, F. M. A.; LANFREDI, A. J. C.; CARDOSO, C. A.; MALUF, W. O Fascinante Mundo dos Materiais Supercondutores, UFSCAR. 2002. Disponível em < http://www.ufscar.br/~univerci/n_2_a1/super.pdf > Acesso em: 23 setembro 2014, 20:30.
- [10] LÁZARO, F. S. Estudo e Simulações do Dispositivo Limitador de Corrente de Curto - Circuito Supercondutor, UFRJ. 2009. Disponível em < <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001089.pdf> > Acesso em: 24 setembro 2014, 19:30.
- [11] CASTRO, A. R. Mancais Magnéticos com Fitas Supercondutoras 2G, UFRJ. 2013. Disponível em < <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007200.pdf> > Acesso em: 26 setembro 2014, 21:30.
- [12] ALVES, L. S. Caracterização de Fitas Supercondutoras 2G com Fitas Soldadas, UFRJ. 2014. Disponível em < <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010651.pdf> > Acesso em : 28 setembro 2014, 21:00.
- [13] PAIVA, T. C. L. Supercondutividade, UFRJ. 2007. Disponível em < <http://www.if.ufrj.br/~joras/disciplinas/07.1/topicos/tcpl.pdf> > Acesso em : 29 setembro 2014, 22:00.

[14] COSTA, T. S. A. Resenha do livro Supercondutividade, UFPA. 2013. Disponível em < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABpI8AL/resenha-livro-supercondutividade> > Acesso em : 29 setembro 2014, 18:30.

[15] ROCHA, M. F. G. Estudo sobre Supercondutividade e suas Aplicações, UEMS. 2010. Disponível em < <http://www.física.uems.br/curso/tcc/tcc2010/michael.pdf> > Acesso em : 01 setembro 2014, 18:30.

[16] PUREUR, P. SUPERCONDUTIVIDADE: uma introdução, IX^a Escola do CBPF. 2012. Disponível em < http://mesonpi.cat.cbpf.br/e2012/arquivos/pg13/Supercondutividade_aula_1.pdf > Acesso em : 02 setembro 2014, 18:30.

[17] PUREUR, P. ; OSTERMANN. F. Temas Atuais de Física: Supercondutividade. 1^a edição. São Paulo : Editora Livraria: SBF, 2005.