

UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO DE JANEIRO



INSTITUTO DE FÍSICA  
LICENCIATURA EM FÍSICA

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA

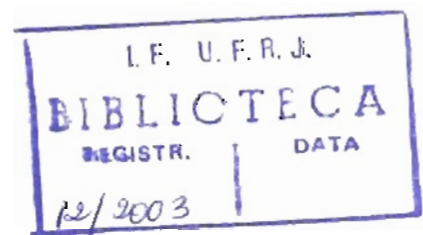
# **A SUPERCONDUTIVIDADE E SUAS APLICAÇÕES**

**Aluno: Douglas Barros e Silva**

Orientador: Prof. Adir Moysés Luiz

2003

12/2003



## RESUMO

Este trabalho visa informar e mostrar nas salas de aula do ensino médio o que é a supercondutividade, sua descoberta, aplicações e teorias que envolvem este fenômeno. É um trabalho que pretende auxiliar professores que irão discutir os conceitos da supercondutividade. O presente trabalho foi desenvolvido por mim, com a orientação do Prof. Adir Moysés Luiz, e algumas idéias aqui expostas foram aplicadas em sala de aula em turmas do segundo ano e do terceiro ano supletivo do Colégio Realengo.

Ao percebermos a completa desinformação dos nossos alunos em relação ao tema e verificarmos a falta de textos relativos ao assunto, adequados para alunos do ensino médio, resolvemos elaborar um texto com a finalidade de ser útil a professores que lecionam neste nível de ensino. Aplicamos este roteiro para as referidas turmas. Devido a dificuldades práticas de se obter nitrogênio líquido para fazer experiências envolvendo supercondutores com temperaturas elevadas, as experiências sugeridas nesta monografia foram apresentadas em sala de aula sob forma de transparências para motivar o estudo deste assunto.

O trabalho foi dividido em cinco partes que versam resumidamente sobre os seguintes temas: 1 - uma introdução genérica, 2 - um estudo acerca da supercondutividade, 3 - aplicações da supercondutividade, 4 - descrição de algumas montagens experimentais envolvendo a supercondutividade, e 5 - uma conclusão final na qual fazemos comentários dos aspectos didáticos envolvidos em nossa proposta.

## ÍNDICE

1	Introdução,	1
2	Supercondutividade,	8
2.1	Evolução histórica,	8
2.2	Parâmetros críticos,	10
2.3	Supercondutores com temperaturas elevadas,	11
2.4	Efeitos relacionados com a supercondutividade,	12
2.5	Propriedades magnéticas,	13
2.6	Quantização macroscópica do fluxo magnético,	16
2.7	Expulsão do fluxo magnético e diamagnetismo ideal,	17
2.8	Teorias para explicar a supercondutividade,	23
3	Aplicações da supercondutividade,	26
3.1	Aplicações que exigem fortes campos magnéticos,	26
3.2	Aplicações energéticas,	26
3.3	Aplicações no transporte,	28
3.4	Aplicações na medicina,	29
4	Experiências sobre supercondutividade,	31
4.1	Experiência 1,	31
4.2	Experiência 2,	32
4.3	Experiência 3,	33
4.4	Experiência 4,	35
4.5	Experiência 5,	36
5	Conclusão,	38
	Referências,	39



## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento adquirido é o resultado de uma organização de experiências, ou melhor, das interações que temos durante a vida. O processo de aprendizagem não se dá somente nas fronteiras da escola. Tanto a sociedade como as escolas são agentes que se articulam na formação do conhecimento. A escola - como instituição de ensino - deve montar seu trabalho levando em conta as realidades existentes no local.

A mídia é bem atuante no processo de obtenção do conhecimento dos alunos envolvidos. Essa fonte de informação parece ser a mais utilizada por eles. Diria que, em certos casos, é a única fonte de conhecimento. Como hoje em dia temos as informações prontas, automáticas, o sujeito é passivo, e não se exige nenhum esforço por parte do aluno. Em virtude deste fato, temos alunos preguiçosos, sem estímulos e dispersos durante as aulas.

Portanto, torna-se necessário organizar nosso trabalho buscando inserir o tema na realidade da vida do aluno.

*“ Os trabalhos devem fazer os alunos reconhecer o papel da Física no sistema produtivo; fazê-lo compreender a evolução dos meios tecnológicos e a sua relação dinâmica com a evolução do conhecimento científico” [1].*

A literatura a respeito das questões metodológicas sobre o ensino da física moderna nas escolas, é escassa e divergente quanto ao caminho que deve ser seguido. Ainda temos, como acréscimo, o fato de muitos textos serem densos e necessitarem conhecimentos prévios que, em geral, o público alvo não possui (professores do ensino médio, pesquisadores de ensino, não especialistas na áreas) [2].

É necessário investir na preparação de materiais dirigidos a professores de nível médio e, posteriormente, adaptá-los a alunos deste mesmo nível. A supercondutividade tem se mostrado um fenômeno físico de grande importância científica e de inúmeras aplicações tecnológicas e por isso é um assunto muito importante de ser desenvolvido.

Atualmente, este assunto só é estudado detalhadamente por alunos de pós - graduação, ficando muitas vezes excluído de cursos básicos de física.

Segundo os PCN [1], os professores devem observar o desenvolvimento das seguintes competências nos alunos:

- Compreender enunciados que envolvam códigos e símbolos físicos. Compreender manuais de instalação e utilização de aparelhos.

- Utilizar e compreender tabelas, gráficos e relações matemática gráficas para a expressão do saber físico. Ser capaz de discriminar e traduzir as linguagens matemática e discursivas entre si.

- Expressar-se corretamente utilizando a linguagem física adequada e elementos de sua representação simbólica. Apresentar de forma clara e objetiva o conhecimento adquirido, através de tal linguagem.

- Conhecer fontes de informações e formas de obter informações relevantes, sabendo interpretar notícias científicas.

- Elaborar sínteses ou esquemas estruturados dos temas físicos trabalhados.

- Desenvolver a capacidade de investigação física. Classificar, organizar, sistematizar, identificar regularidades. Observar, estimar ordens de grandeza, compreender o conceito de medir, fazer hipóteses, testar.

- Conhecer e utilizar conceitos físicos. Relacionar grandezas, quantificar, identificar parâmetros relevantes. Compreender e utilizar leis e teorias físicas.

- Compreender a física presente no mundo vivencial.

- Construir e investigar situações físicas, utilizar modelos físicos, generalizar de uma a outra situação, prever, avaliar, analisar previsões.

- Articular o conhecimento físico com o de outras áreas do saber científico.

- Reconhecer a Física enquanto construção humana, aspectos de sua história e relações com o contexto cultural, social, político e econômico.

- Reconhecer o papel da Física no sistema produtivo, compreendendo a evolução dos meios tecnológicos e sua relação dinâmica com a evolução do conhecimento científico.

- Dimensionar a capacidade crescente do homem propiciada pela tecnologia.

- Estabelecer relações entre o conhecimento físico e outras formas de expressão da cultura humana.

- Ser capaz de emitir juízos de valor em relação a situações sociais que envolvam aspectos físicos e/ou tecnológicos relevantes.

A História da Física pode, e deve, ser utilizada pelos professores como ferramenta para facilitar o aprendizado dos alunos porque a História de uma particular ciência é um legítimo foro de investigação de seus fundamentos. A História revela “o porquê” das categorias conceituais da ciência, clarificando, assim, o significado dos seus conceitos.

A História é o foro, onde a análise conceitual pode ser feita; ela permite rever conceitos, criticá-los, recupera significados e os entende à luz de novas descobertas. Ela é, pois, o instrumento da formação intelectual e da assimilação de conceitos. Conseqüentemente, a História de uma ciência é necessária à heurística da descoberta científica. Ela é o instrumento de formação de pensadores.

Porém, nem toda a História serve ao propósito do aprendizado de conceitos ou servem aos fundamentos da ciência. O uso de um conceito, ao longo de muitos anos e, até de séculos, tende a trivializar o não trivial; isto é, dificuldades conceituais são banalizadas, conceitos são tratados como “óbvios”. Isto deixa a desagradável sensação de que os conceitos são mágicos.

A história da descoberta de um conceito mostra não somente como o conceito foi criado, mas, sobretudo, seu porquê; a História mostra questões para cujas soluções o conceito foi introduzido, revela o quê o conceito faz na teoria, sua função e significado. A História revive os elementos do pensar de uma época, revelando, pois, os ingredientes com que o pensamento poderia ter contado na época em que dada conquista foi feita. Ela desvenda a lógica da construção conceitual; nesse esforço, ela revela, também os “buracos lógicos” que o conceito preenche, revivendo o próprio ato intelectual da criação científica. Existe uma profunda relação entre a História da Ciência e a Epistemologia [3].

Segundo E. J. Dijksterhuis (de acordo com [3]), a História é o laboratório da Epistemologia. Nesse sentido, ela aponta os ingredientes envolvidos na construção ou descoberta do conceito, revelando o grau de racionalidade do ato da descoberta [3].

*Todo Parágrafo começa com uma frase introdutória*  
*2. Introdução* *Estudo*

A supercondutividade chamou muito a atenção do grande público em anos recentes. O fenômeno consiste basicamente na perda de resistência à passagem de corrente elétrica verificada em certos materiais quando submetidos a temperaturas muito baixas.

As pesquisas continuam em vários laboratórios ao redor do mundo. Mais recentemente, a descoberta da supercondutividade no carbono-60 e no  $\text{MgB}_2$  chamou novamente a atenção para essas pesquisas. No mundo da supercondutividade, os avanços são medidos em termos da temperatura na qual se consegue observar o fenômeno. Novos compostos e materiais são pesquisados e são considerados mais eficientes na medida em que apresentam o fenômeno em temperaturas mais altas que as anteriores. Essa temperatura é chamada de  $T_c$ , ou temperatura crítica, que é aquela na qual o material estudado muda seu comportamento, perdendo a resistência à condução de elétrons e passando de condutor comum para supercondutor.

Ensinando supercondutividade podemos abordar diretamente na sala de aula tópicos de física como: a eletricidade, o magnetismo, a termodinâmica, e algumas noções de física quântica, isto sem comentar os aspectos históricos e as diversas aplicações tecnológicas que envolvem o fenômeno, tornando assim esta área uma das mais abrangentes da física.

Outro fator é a beleza apresentada pelas experiências que envolvem este fenômeno. Basta dizer que a levitação magnética é uma experiência bastante impressionante e pode ajudar a estimular os alunos na busca do aprendizado em física.

Fizemos uma pesquisa com alunos do turno noturno supletivo dos 2º e 3º períodos. O estudo foi proposto a esses alunos devido à exposição deste assunto na mídia e por encontrarmos, nos livros de ensino médio, pequenas abordagens sobre o tema. O tema supercondutividade foi apenas mencionado. Alguns alunos mostraram-se curiosos, justificando esta curiosidade por terem ouvido falar do assunto através da mídia. Depois da divulgação do tema, um questionário foi distribuído para ser respondido pelos alunos.

De posse das respostas, foi possível diagnosticar que os alunos não sabem o que é a supercondutividade, não possuem interesse em saber e estão alienados em relação ao mundo que vivem.

*Como foi feito?*

*Diana*

Foi preparada uma aula para sanar esta falta de informação. Esta aula foi dividida em três etapas. Começou com uma explanação da evolução histórica da supercondutividade, onde revistas e textos foram apresentados. Depois foi explicado o que é a supercondutividade e as teorias envolvidas através da utilização de transparências. A partir daí, foi iniciada a terceira etapa mostrando algumas <sup>aplicações</sup> utilizações da supercondutividade. Os alunos foram desafiados a buscarem novos exemplos para serem mostrados na próxima aula.

Esta aula foi transportada para o papel e deu origem a um texto direcionado a professores do ensino médio. Apesar da curiosidade apresentada por alguns alunos quando o tema foi mencionado, nenhum deles sabia o que é a supercondutividade. O questionário foi preparado e passado aos alunos do 2º e 3º ano supletivo noturno, totalizando 123 alunos.

~~As perguntas foram:~~ *Quanto a isso*

1. Você já ouviu falar em supercondutividade?
2. Você conhece alguma teoria que explique o fenômeno da supercondutividade? Qual? *Supercondutividade*
3. Você pode citar algum exemplo de aplicação da supercondutividade? Qual?
4. Você pode citar outro exemplo de aplicação da supercondutividade? Qual?

No quadro seguinte apresentamos o resumo das respostas.

Questão	Respostas	
1	SIM - 93	NÃO - 30
2	SIM - 0	NÃO - 123
3	TRANSPORTE - 93	NÃO - 30
4	SIM - 0	NÃO - 123

Nas respostas fornecidas à questão 1, podemos observar que 75% dos alunos, de alguma forma, ouviram falar em supercondutividade. Vemos também que, de acordo com a questão 2, nenhum deles disse conhecer alguma teoria que explique o fenômeno.

A questão 3 nos mostra que 75% dos alunos associaram a supercondutividade à área de transporte. Muitos citaram o exemplo do trem bala e disseram terem visto algo sobre o assunto no JN (Jornal Nacional). A questão 4 mostra que nenhum aluno foi capaz de citar



Punto 1º plus-  
1: impulse

um outro exemplo de aplicação da supercondutividade. Fato interessante é que nenhum aluno arriscou ao menos um palpite, todos entregaram a questão em branco.

Uma das maiores dificuldades encontradas pelos professores de física, e também pelos de outras áreas, é a falta de interesse dos alunos em relação aos assuntos discutidos em sala de aula. Esta falta de interesse gera situações muito estressantes para os professores imbuídos de tão nobre tarefa. Alunos dispersos, agressivos, comportando-se de forma inconveniente podiam ser encontrados nas turmas pesquisadas. Este quadro é comum e necessita ser combatido por nós, professores, da melhor maneira possível. Os alunos justificam estes fatos afirmando que as aulas são desestimulantes, tradicionais, expositivas e sempre seguidas pelas resoluções de exercícios referentes ao tema. Cabe aos professores a resolução deste problema.

Diversas correntes de pensamento fornecem sugestões para o combate deste tipo de problema. Nós tentaremos estimulá-los através da inserção do tema no cotidiano do aluno. A principal mudança foi deixar de considerar o aluno como um ser que deve modificar-se, onde uma quantidade de informação deveria ser dada e depois cobrada a aprendizagem, numa prova conceitual, mas aproveitar a sua bagagem intelectual e sua visão de mundo. Esta interação com os alunos fez com que os mesmos se soltassem, participassem, perguntassem sem medo. O resultado desta aula, a meu ver, foi bom e levou-me a tentar aplicar esta metodologia em outras aulas.

Os principais objetivos da presente monografia são:

- 1- Ratificar a importância do método utilizado no processo de ensino de física;
- 2 - Desenvolver um material de fácil aplicação para professores de ensino médio;
- 3 - Relacionar o conhecimento com a tecnologia, levando o aluno ao pleno exercício da cidadania;
- 4 - Inserir o ensino nos problemas cotidianos.

Possui também o interesse de servir como fonte de consulta para professores que pretendem abordar o tema em sala de aula. A elaboração deste texto é o resultado de uma pesquisa sobre supercondutividade. As informações obtidas em livros didáticos são escassas. Consultamos livros especializados, internet, revistas e outras fontes de consulta que

expusessem algo sobre o assunto.

A apresentação desta monografia segue o seguinte roteiro:

- A evolução histórica da supercondutividade;
- Alguns efeitos relacionados com a supercondutividade;
- As teorias que explicam o fenômeno da supercondutividade;
- Aplicações da supercondutividade na ciência e tecnologia;
- Algumas propostas para a realização de experiências sobre s propriedades dos supercondutores.

## 2 SUPERCONDUTIVIDADE

Neste capítulo, após uma breve descrição da evolução histórica que envolve a descoberta da supercondutividade, apresentaremos os parâmetros críticos, supercondutores com temperaturas elevadas, os principais efeitos relacionados, as propriedades magnéticas, a quantização macroscópica do fluxo magnético, a expulsão do fluxo magnético, o diamagnetismo ideal, o efeito Meissner, a resistência elétrica nula, a corrente persistente, a temperatura crítica e as teorias que explicam a supercondutividade.

### 2.1 Evolução histórica

Um metal na temperatura ambiente tem resistência elétrica pequena mas não nula. Quando a temperatura diminui, a resistência do metal também diminui. O que acontecerá se a temperatura do metal diminuir tanto que se aproxime do zero absoluto? Essa questão foi muito debatida no início do século passado. Onnes achava que a resistência deveria diminuir cada vez mais, chegando a zero no zero absoluto. Ele achava que as vibrações dos átomos do metal, que dificultam o deslocamento dos elétrons e causam a resistência, deveriam cessar no zero absoluto. Nesse caso, a resistência elétrica cairia a zero gradualmente.

A liquefação do hélio foi obtida pela primeira vez por Kamerlingh Onnes (Fig. 1) em 1908 no laboratório da Universidade de Leiden (Holanda). Mediante o uso do hélio líquido ele pôde realizar diversas pesquisas da chamada física das baixas temperaturas. O termo criogenia é utilizado para designar estas baixas temperaturas [4].

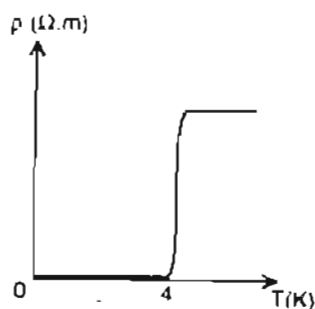
Onnes desenvolveu diversos projetos que lhe deram fama internacional nas áreas de termodinâmica, radioatividade, magnetismo e fenômenos elétricos, efeito Hall e especialmente resistência dos metais. A sua maior descoberta foi, sem dúvida, a supercondutividade e a observação, posterior, das chamadas correntes persistentes.

*Figura 1.* Kamerlingh Onnes foi o primeiro pesquisador a liquefazer o hélio, o que possibilitou a realização de experiências a temperaturas poucos graus acima do zero absoluto, levando à descoberta da supercondutividade. (Figura reproduzida da Ref. [5]).



Em 1911, ao pesquisar o comportamento da resistividade de metais em temperaturas muito baixas, Onnes verificou que a resistividade do mercúrio (Fig. 2) caía repentinamente a zero quando a temperatura era inferior a uma temperatura crítica ( $T_c$ ), aproximadamente igual a 4,2 K.[4]. O mercúrio foi escolhido porque podia ser altamente purificado.

Esse resultado foi apresentado por Onnes em um artigo publicado em uma revista científica holandesa em maio de 1911, com o título “Sobre a variação da resistência de metais puros em temperaturas muito baixas. O desaparecimento da resistência do mercúrio”. Este fenômeno, isto é, a perda total de resistência de um condutor, passou a ser conhecido pelo nome de supercondutividade.



*Figura 2.* O gráfico da resistividade do mercúrio em função da temperatura. A temperatura abaixo da qual a resistividade se anula chama-se temperatura crítica; para os metais que se tornam supercondutores ela é próxima do zero absoluto. (Figura retirada da Ref. [6]).

Evidentemente, em virtude das aplicações da supercondutividade, os pesquisadores do mundo inteiro buscam um supercondutor que possua uma temperatura crítica da ordem da temperatura ambiente.

O valor de  $T_c$  aproximadamente igual a 24 K permaneceu como um recorde desde 1973 até 1986, quando Muller e Bednorz descobriram uma cerâmica que se tornava supercondutora com uma temperatura crítica da ordem de 30 a 40 K. Em 1987 eles receberam o prêmio Nobel de física por esta descoberta.

A partir de 1987 foram descobertos muitos outros supercondutores cerâmicos com temperaturas críticas superiores a 90 K. Até a presente data (2003) as temperaturas críticas mais elevadas são da ordem de 120 a 130 K.

Em princípio, não existe nenhum impedimento teórico para que as temperaturas críticas atinjam valores da ordem da temperatura ambiente (ou até mesmo bem superiores a 300 K). Se este objetivo for atingido, certamente surgirá uma nova revolução tecnológica muito mais profunda do que a revolução eletrônica iniciada na década de 1950 com a fabricação das junções p-n e dos transistores [4].

Uma explicação teórica para a supercondutividade só surgiu em 1957. John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer propuseram uma teoria (a teoria BCS) que explicava satisfatoriamente o fenômeno. Segundo ela, os elétrons do supercondutor formam pares que podem se mover pela rede cristalina do metal sem impedimentos.

Por essa teoria, eles ganharam o prêmio Nobel de 1972. John Bardeen, em 1956, ganhou seu primeiro Nobel pela invenção do transistor. Ele foi, até hoje, o único a ganhar dois prêmios Nobel de física.

## ***2.2 Parâmetros críticos***

A descoberta da supercondutividade do mercúrio foi seguida por outras descobertas espetaculares obtidas no mesmo laboratório. Em 1913, verificou-se que o chumbo se tornava supercondutor abaixo de uma temperatura crítica aproximadamente igual a 7,2 K. Em 1914, Onnes notou que a supercondutividade pode ser destruída por um campo magnético  $B$  maior

que um campo magnético crítico  $B_c$ . Em virtude disto, verificou-se que também existe uma certa densidade de corrente  $J_c$  acima da qual o material passa da fase supercondutora para a fase normal. Portanto, a supercondutividade é destruída quando qualquer um dos parâmetros críticos for superado ( a temperatura crítica  $T_c$ , o campo magnético crítico  $B_c$  e a densidade de corrente crítica  $J_c$  ) [4].

### *2.3 Supercondutores com temperaturas elevadas*

Vamos definir o que chamamos de “altas temperaturas”.

O mercúrio usado na experiência pioneira de Onnes fica supercondutor com  $T_c$  igual a 4,2 K. Até 1986, os valores de  $T_c$  dos materiais supercondutores conhecidos eram extremamente baixos. O mais alto era o de uma liga de nióbio e germânio, com  $T_c$  aproximadamente igual a 23 K.

Muito esforço foi feito, sem sucesso por muitos anos, na tentativa de achar supercondutores com maiores valores de  $T_c$ . Essa dificuldade esmoreceu muita gente e a pesquisa em supercondutores passou por uma fase de baixa estação. A temperatura de fusão dos materiais era a grande barreira a ser vencida para o desenvolvimento da supercondutividade. Em 1954 verificou-se que a liga metálica  $Nb_3Sn$  possuía aproximadamente  $T_c = 18,1$  K. Em 1971 descobriu-se que a liga metálica  $Nb_3Ga$  possuía aproximadamente  $T_c = 20,3$  K. Em 1973 descobriu-se que a liga metálica  $Nb_3Ge$  possuía  $T_c = 23,9$  K. O valor de  $T_c$  aproximadamente igual a 24 K permaneceu como um recorde desde 1973 até 1986 [4].

Em janeiro de 1986, Karl Muller e Georg Bednorz mostraram que uma cerâmica de óxido de bário, lantânio e cobre ficava supercondutora a 35 K. Esse resultado teve tremendo impacto entre pesquisadores do ramo. Em pouco tempo, novos materiais com valores de  $T_c$  cada vez mais altos foram sendo descobertos. Já em 1987, Paul Chu e colaboradores apresentaram um óxido de itrio, bário e cobre com  $T_c$  igual a 93 K! Isso é o que se chama de alta temperatura!

A beleza deste achado consiste no fato de 93 K estar acima da temperatura de

liquefação do nitrogênio (77,7 K). Embora muito baixa do ponto de vista de uma geladeira doméstica, esta temperatura está ao alcance de qualquer laboratório de Física atual.

## *2.4 Efeitos relacionados com a supercondutividade*

Para caracterizar o estado supercondutor (ou fase supercondutora), é conveniente lembrar alguns conceitos de Termodinâmica sobre transições de fase (ou sobre o equilíbrio de fases).

Denomina-se fase (ou estado) de uma substância um particular estado de equilíbrio da substância caracterizado por um conjunto de propriedades físicas uniformes que a distinguem de outros estados de equilíbrio (ou fases) da mesma substância. Por exemplo, a água pode se apresentar numa fase sólida (gelo) ou numa fase líquida (água líquida). Dizemos que a 0°C e 1 atm de pressão ocorre uma transição de fase reversível líquido-sólido da substância água.

Na fase sólida da mesma substância podem surgir diferentes fases. Por exemplo, o ferro (sólido) pode se apresentar numa fase ferromagnética (abaixo de uma dada temperatura crítica) ou então numa fase paramagnética (acima desta temperatura crítica). Outro exemplo: o mercúrio (sólido) pode se apresentar numa fase supercondutora (abaixo de uma temperatura crítica igual a 4,2 K) ou numa fase condutora (acima desta temperatura) [4].

O fenômeno da supercondutividade produz diversos efeitos e os principais são:

- quantização macroscópica do fluxo magnético;
- expulsão do fluxo magnético do interior de um supercondutor (efeito Meissner);
- resistência nula;
- corrente persistente;
- campo magnético criado pela rotação de um supercondutor;
- efeito isotópico;
- profundidade de penetração e comprimento de coerência;
- faixa de energia proibida;
- reflexão e absorção de ondas eletromagnéticas num supercondutor;

- efeito Josephson [4].

Somente vamos descrever qualitativamente os seguintes efeitos: Quantização macroscópica do fluxo magnético, efeito Meissner, resistência nula.

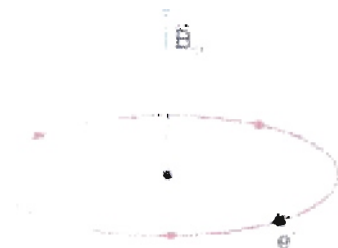
Somente no século XX, com a descoberta dos componentes do átomo e a criação de uma nova teoria, a Mecânica Quântica, foi possível compreender o funcionamento do magnetismo dos ímãs e explicar o comportamento dessas partículas. Porém, como este trabalho visa o ensino médio, não podemos nos valer das concepções mais atualizadas propostas por esta teoria, já que o estudo da Mecânica Quântica exige a aplicação de ferramentas matemáticas só discutidas em cursos de nível universitário. Assim, vamos nos limitar a relatar alguns resultados, recorrendo às vezes a um modelo de átomo que, embora já tenha sido superado pela Mecânica Quântica, apresenta previsões em boa concordância com os dados experimentais. Nesse modelo antigo supomos que os elétrons giram em trajetórias circulares ao redor dos núcleos dos átomos [7].

Por razões didáticas, vamos lembrar os conceitos de paramagnetismo, ferromagnetismo e explicar separadamente o diamagnetismo ideal e o efeito Meissner. Contudo, veremos que o diamagnetismo ideal e o efeito Meissner resultam da mesma propriedade do estado supercondutor [4].

## *2.5 Propriedades magnéticas*

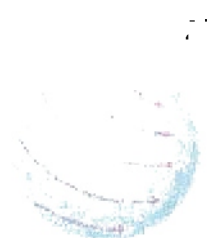
Se supusermos o elétron em movimento circular (Fig.3) em torno do núcleo (movimento orbital), teremos o caso de uma espira circular de corrente que produz um campo magnético  $B_m$ , o qual, no centro da espira, é perpendicular ao plano dela. Assim cada elétron comporta-se como uma espira que produz campo magnético. Porém, em uma amostra de material qualquer em que há um número grande de elétrons, existem campos em todas as direções, os quais, em média, se cancelam, e assim o campo produzido pela amostra é nulo ou desprezível [7].



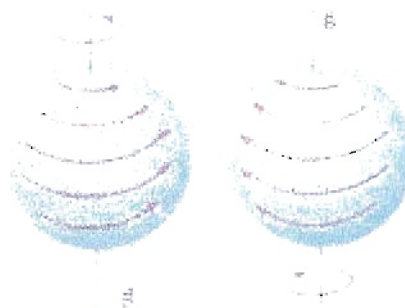


*Figura 3.* Campo magnético orbital do elétron. (Figura reproduzida da Ref. [7]).

Além do campo magnético orbital, o elétron produz outro campo magnético  $B_s$ , que pode ser imaginado (classicamente) como o resultado da rotação do elétron em torno de si mesmo (Fig.4). Esse campo é denominado **campo magnético de spin**. Em átomos, íons ou moléculas, em geral, por um mecanismo só explicado pela Mecânica Quântica, os elétrons se distribuem em pares (Fig.5), de modo que, em cada par, um dos elétrons produz campo em sentido oposto ao do outro, e desse modo ambos se anulam [7].



*Figura 4.* Campo magnético de spin do elétron. (Figura reproduzida da Ref.[7]).



*Figura 5.* Elétrons emparelhados com spins opostos. (Figura reproduzida da Ref. [7]).

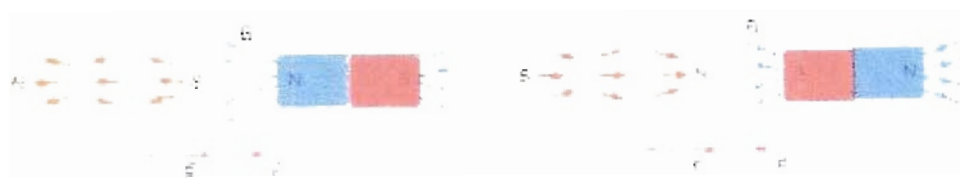
Porém, há casos em que os átomos (íons ou moléculas) possuem elétrons que não formam pares; conseqüentemente, o átomo produz um campo total não nulo, comportando-se como um minúsculo imã (imã elementar). As substâncias formadas por átomos (ou íons ou

moléculas) e que são ímãs elementares denominam-se substâncias **paramagnéticas**. Como exemplos, podemos citar: alumínio, cálcio, magnésio, cromo, oxigênio, platina.

Em uma amostra de uma substância paramagnética, há um grande número de ímãs elementares orientados em todos os sentidos (Fig.6); dessa maneira, no total há um anulamento do campo. Porém, se essa amostra for colocada próximo de um pólo de um potente ímã (Fig.7), o campo do ímã provocará um alinhamento parcial dos ímãs elementares, levando a amostra a se magnetizar, sendo atraída pelo ímã [7].



*Figura 6.* Ímãs elementares.(Figura reproduzida da Ref. [7]).



*Figura 7.* Alinhamento parcial dos ímãs elementares provocado pelo campo de um ímã. (Figura reproduzida da Ref. [7]).

O **ferromagnetismo** é um fenômeno semelhante ao paramagnetismo. A diferença é que nos materiais paramagnéticos, na ausência de um campo magnético externo, os ímãs elementares estão orientados em todos os sentidos, enquanto nos materiais ferromagnéticos há um alinhamento espontâneo dos ímãs elementares num dado sentido ao longo de uma região chamada de domínio [7].

Dizer que o alinhamento é espontâneo significa afirmar que ele ocorre mesmo na ausência de um campo externo. Assim, por exemplo, pode-se escolher uma pequena amostra

de cristal de ferro, de modo que os ímãs elementares tenham a orientação da Fig. 8.



*Figura 8.*(Figura reproduzida da Ref.[7]).

## 2.6 Quantização macroscópica do fluxo magnético

A quantização macroscópica do fluxo magnético é um dos fenômenos físicos mais característicos do estado supercondutor; esta propriedade permite explicar uma série de resultados macroscópicos inerentes ao estado supercondutor.

A regra da quantização macroscópica do fluxo magnético pode ser formulada de forma sucinta do seguinte modo:

O fluxo magnético total no interior de uma curva fechada traçada na superfície de um supercondutor permanece sempre constante para um dado estado quântico caracterizado pelo número inteiro  $n$ . Quando a curva fechada se encontra na superfície de um supercondutor homogêneo e maciço, isto é, quando no interior da curva considerada não existe nenhum buraco nem nenhum tipo de material, o número inteiro  $n$  só pode ser igual a zero [4].

Assim como a carga elétrica é quantizada e ocorre somente em múltiplos inteiros da unidade fundamental de carga “ $e$ ”, podemos demonstrar que o fluxo magnético é quantizado através de uma espira supercondutora. O quantum de fluxo vale  $h/2e$  (onde  $h$  é a constante de Planck). Essa quantidade minúscula de fluxo pode ser detectada por meio do efeito Josephson.

Josephson mostrou que dois pares de elétrons, numa corrente supercondutora, podem mover-se por “tunelamento” através de uma barreira fina de isolante. Uma espira de material supercondutor, possuindo tal barreira ou “junção de tunelamento”, pode ainda ser

supercondutora. Suponha agora que se tente aumentar o fluxo magnético através da espira. Uma vez que o fluxo é quantizado, não pode aumentar continuamente. Assim, a corrente que passa pela espira deve variar para manter o fluxo constante. Contudo, a junção não pode suportar uma corrente acima de um determinado limite. Quando este limite é atingido, a espira deixa momentaneamente de ser supercondutora e permite uma variação descontínua do fluxo. Sob determinadas condições, a variação pode tornar-se igual a exatamente um *quantum* de fluxo em cada etapa. Contando o número de etapas podemos determinar com grande precisão o fluxo através da bobina e, então, o próprio campo magnético [5].

### *2.7 Expulsão do fluxo magnético e Diamagnetismo ideal*

A expulsão do fluxo magnético ocorre sempre para um supercondutor maciço.

A indução magnética  $B$  é sempre igual a zero no interior de uma região pertencente a um supercondutor (região que não contém buracos). Se o supercondutor contém um ou mais buracos, o valor de  $B$  pode ser diferente de zero no interior dos buracos, mas na parte maciça do supercondutor  $B$  é igual a zero sempre [4].

Veja que a condição  $B = 0$  no interior da parte maciça de um supercondutor (em equilíbrio magnetostático) é semelhante à condição de que o campo elétrico  $E$  deve sempre ser nulo no interior da parte maciça de um condutor (em equilíbrio eletrostático).

Como vimos, um elétron, ao executar seu movimento orbital em torno do núcleo, produz campo magnético. No entanto, numa amostra de material qualquer, em geral há um número muito grande de elétrons produzindo campo em todos os sentidos, o que resulta em cancelamento dos campos. Mas, quando a amostra é colocada numa região onde há um campo magnético  $B_0$ , esse campo atua sobre os elétrons, aumentando a velocidade daqueles que giram num dado sentido e diminuindo a velocidade dos que giram em sentido oposto; conseqüentemente, o efeito final é que a amostra passa a produzir um campo magnético  $B_m$  de sentido oposto ao do campo externo  $B_0$ . Esse é o **efeito diamagnético**, o qual ocorre em **todas as substâncias** (mesmo nas paramagnéticas e ferromagnéticas); porém em algumas

esse efeito é superado pelos efeitos paramagnético e ferromagnético [7].

As substâncias que não apresentam os efeitos paramagnéticos e ferromagnéticos apresentam apenas o efeito diamagnético, e assim são chamadas de substâncias diamagnéticas. Como exemplo, podemos citar: água, cobre, prata, bismuto. Pelo fato de o campo produzido ( $B_m$ ) ser oposto ao campo externo ( $B_o$ ), as substâncias diamagnéticas são repelidas pelos ímãs (Fig.9). Ver a seção 4.1 e o efeito Meissner.



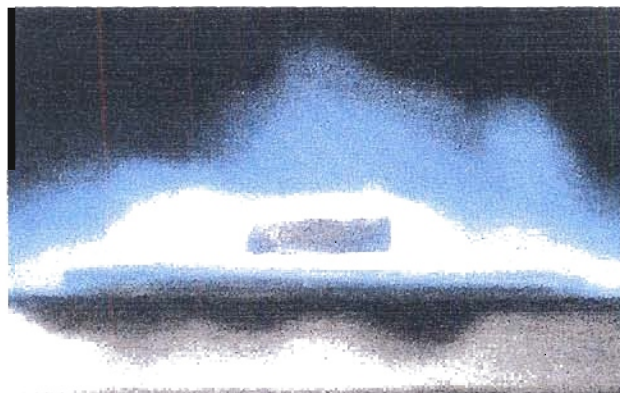
*Figura 9. Demonstração do efeito diamagnético. (Figura reproduzida da Ref. [7]).*

O diamagnetismo ideal possibilita uma das aplicações mais importantes dos materiais supercondutores. Estas aplicações são decorrentes da levitação magnética, ou seja, a sustentação de um peso que permanece em equilíbrio (sem nenhum apoio mecânico) sob a ação de uma força magnética que anula o peso do corpo. Sabemos que todo material diamagnético é repelido por um ímã (ou por um eletroímã). Como um supercondutor possui diamagnetismo ideal, a força de repulsão entre um ímã (ou eletroímã) e um supercondutor é muito grande. Sendo assim, se você colocar um ímã sobre um supercondutor, o ímã ficará

levitando sobre o supercondutor. Reciprocamente, se você colocar um supercondutor sobre um ímã, o supercondutor ficará levitando sobre o ímã.

### *Efeito Meissner*

Já observamos que o campo magnético no interior de um supercondutor é constante. Em 1933, os físicos alemães W. H. Meissner e Robert Ochsenfeld mostraram que o campo magnético do supercondutor não se limita apenas a ser constante, ele é **nulo**. Assim, se um material supercondutor, inicialmente a uma temperatura superior a  $T_c$  (ou seja, num estado em que ele não pode ser considerado supercondutor), é submetido a um campo magnético e a seguir resfriado a uma temperatura inferior a  $T_c$ , ele expelle todo o campo magnético do seu interior. Esse efeito, chamado de efeito Meissner, explica um segundo tipo de levitação. Suponhamos que um ímã seja colocado sobre um material supercondutor acima da temperatura  $T_c$  (ou seja, em uma situação em que ainda não é supercondutor). Quando a temperatura fica inferior a  $T_c$ , o material torna-se supercondutor e gera correntes que expellem o campo magnético, isto é, o ímã se levanta, passando a levitar acima do supercondutor (Fig.10) [4].



*Figura 10.* Ímã levitando cima de um supercondutor. (Figura reproduzida da Ref. [7]).

Um condutor ideal não apresenta o efeito Meissner. Quando o campo magnético externo  $H$  é eliminado, surge uma corrente induzida permanente que cria um fluxo

magnético interno igual ao fluxo magnético externo (Fig.11).

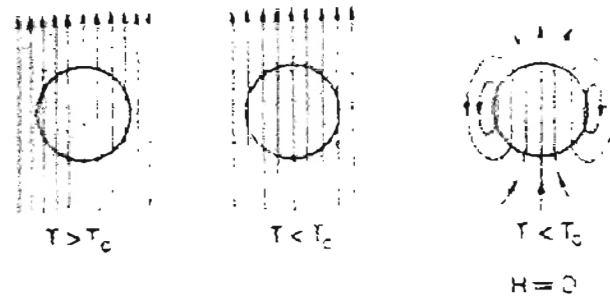


Figura 11. Esfera maciça condutora submetida a um campo magnético externo  $H$  e com  $H = 0$ . (Figura reproduzida da Ref. [4]).

Na figura 12 vemos uma esfera feita com um material que possui uma fase supercondutora (para  $T$  menor que  $T_c$ ). No início, a esfera supercondutora é submetida a um campo magnético externo; como no estado inicial  $T$  é maior que  $T_c$ , a esfera se encontra numa fase condutora normal; neste caso o fluxo magnético penetra no interior da esfera. Quando  $T$  possui um valor menor que  $T_c$ , a esfera sofre uma transição de fase e passa para a fase supercondutora, expulsando o fluxo magnético do seu interior. Depois de eliminar o campo magnético externo, não existirá mais nenhuma corrente  $i$  nem nenhum fluxo magnético [4].

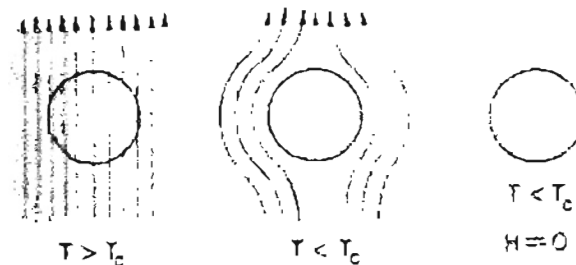


Figura 12. Esfera maciça supercondutora submetida a um campo magnético externo e com  $H = 0$ . (Figura reproduzida da Ref. [4]).

### **Resistência elétrica nula**

A corrente que circula na superfície de um supercondutor é responsável pela criação da magnetização volumétrica que possui sentido contrário ao sentido do campo magnético externo  $H$ . Em virtude disto, o valor de  $B$  se anula no interior de um supercondutor (efeito

Meissner). Podemos afirmar que a existência do efeito Meissner implica numa resistência nula. Se a resistência elétrica não fosse nula, a corrente superficial (que produz a magnetização necessária para anular o valor de  $H$ ) deveria diminuir com o tempo e, portanto, o valor de  $B$  deixaria de ser nulo no interior de um supercondutor [4].

A resistência nula foi a primeira propriedade macroscópica do estado supercondutor evidenciada desde a descoberta da supercondutividade. Todas as tentativas realizadas por Onnes para medir a resistência elétrica de um supercondutor mostraram que esta resistência era menor do que o valor mínimo que poderia ser detectado com os métodos experimentais disponíveis naquela época.

A melhor técnica para se medir uma eventual resistência elétrica de um supercondutor consiste em verificar se uma corrente persistente  $i(t)$  decai com o tempo numa bobina supercondutora que transporta esta corrente  $i(t)$ .

Sabemos que esta corrente é dada por:  $i(t) = i(0) \exp(-Rt/L)$  onde  $R$  é a resistência elétrica da bobina supercondutora e  $L$  é a sua auto-indutância. Caso a resistência elétrica  $R$  seja exatamente igual a zero, obtemos  $i(t) = 0 = \text{constante}$ , ou seja, a corrente persistente nunca decairá com o tempo [4].

### *Corrente persistente*

Observando as figuras 11 e 12 compreendemos facilmente que a principal diferença entre um condutor ideal maciço e um supercondutor maciço é o seguinte: um condutor ideal maciço pode manter o campo magnético interno (depois da eliminação do campo magnético externo), ao passo que o supercondutor maciço não pode manter nenhum campo magnético interno depois da eliminação do campo magnético externo [4]. As correntes que circulam num supercondutor maciço são correntes superficiais. Por exemplo, na figura 12, para que  $B$  seja igual a zero no interior do supercondutor maciço é necessário que circule uma corrente superficial que produza um campo magnético contrário a  $H$ , de modo que  $B$  seja sempre nulo no interior do supercondutor maciço (efeito Meissner).



Devido ao efeito Meissner, a densidade de corrente elétrica  $\mathbf{J}$  é sempre nula no interior da parte maciça de um supercondutor. Donde se conclui que só existem correntes superficiais fluindo num supercondutor maciço.

## ***2.8 Teorias para explicar a supercondutividade***

Existem três teorias destinadas a explicar a supercondutividade que são: A teoria dos dois fluidos, a teoria de Ginzburg-Landau e a teoria BCS. Neste capítulo vamos abordar qualitativamente a teoria BCS e dar uma pequena informação sobre as outras duas teorias existentes.

### ***Teoria dos dois fluidos***

A teoria dos dois fluidos foi utilizada por London (de acordo com [4]) para explicar a superfluidez do hélio líquido. De acordo com a teoria dos dois fluidos, o escoamento do hélio líquido pode ser descrito através da superposição de dois fluidos: um fluido normal (com viscosidade) e um superfluido (sem viscosidade). Gorter e Casimir (de acordo com [4]) desenvolveram a teoria dos fluidos para a supercondutividade. De acordo com a teoria dos dois fluidos, a corrente elétrica que flui num supercondutor pode ser encarada como a superposição de duas correntes: uma corrente normal (que obedece a lei de Ohm) e uma supercorrente (que não obedece a lei de Ohm).

### ***Teoria de Ginzburg-Landau***

Como a teoria dos dois fluidos apresentava falhas para explicar o comportamento de películas supercondutoras e suas previsões não batiam com os fatos experimentais, Ginzburg-Landau (de acordo com [4]) apresentaram uma teoria que removia as falhas da teoria de London.

### ***Teoria BCS***

A teoria BCS é a principal teoria microscópica moderna destinada a explicar os

principais fenômenos físicos associados com a supercondutividade. Será feito breve comentário e respeito da teoria BCS. Quem quiser saber mais sobre esta teoria deve consultar referência [8].

O primeiro passo para o estudo microscópico da supercondutividade foi dado por Fröhlich (de acordo com [4]). Em 1950 Fröhlich demonstrou que a interação elétron-fônon poderia ocasionar uma ligação entre dois elétrons. Assim como um fóton é uma partícula resultante da quantização de uma onda eletromagnética, um fônon é uma partícula resultante da quantização de uma onda sonora oriunda das vibrações de uma rede cristalina, ou seja, um fônon é uma excitação mecânica que se propaga pela rede cristalina de um sólido. 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. Logo depois da hipótese pioneira de Fröhlich, Bardeen (de acordo com [4]) desenvolveu uma teoria semelhante, mostrando que o elétron deixava de ficar “nu” e passava a “vestir uma roupa” em decorrência de sua interação com os fônons da rede cristalina. Antes da hipótese de Fröhlich e de Bardeen se imaginava que a interação entre dois elétrons deveria ser sempre repulsiva (em virtude da repulsão coulombiana). Contudo, o estudo da interação elétron-fônon que tal interação pode ocasionar uma força de atração entre dois elétrons no interior da rede cristalina.

O passo seguinte para a elaboração da teoria BCS foi dado por Cooper (de acordo com [4]) ao demonstrar que, sob certas condições, o gás de Fermi (formado pelos elétrons normais) torna-se instável possibilitando a formação de pares de elétrons ligados (hoje conhecidos como pares de Cooper). A teoria BCS um impulso final com o famoso trabalho de seus três autores: Bardeen, Cooper e Schrieffer [8].

Para entender qualitativamente como pode ocorrer atração entre dois elétrons, considere um elétron se movendo no seio de uma rede cristalina constituída por íons positivos. Como estes íons não estão rigidamente ligados na rede, pode ocorrer uma ligeira distorção da rede provocada pela atração coulombiana entre um elétron e os íons situados nas imediatas vizinhanças deste elétron. Sendo assim, a densidade das cargas positivas próximas do referido elétron torna-se maior que a densidade das cargas positivas mais afastadas do referido elétron.

Esta variação de densidade é instável e a rede cristalina deverá sofrer um processo de relaxação emitindo um fónon com uma frequência característica deste processo de relaxação. Suponha que um outro elétron se aproxime da região onde se encontrava o primeiro elétron num intervalo de tempo menor que o intervalo de tempo deste processo de relaxação. Este segundo elétron “verá” uma rede ainda distorcida. Deste modo, ele será atraído para a região onde existe o excesso de polarização das cargas positivas; esta atração poderá superar a repulsão coulombiana entre o primeiro elétron e o segundo elétron, produzindo, portanto, uma atração efetiva entre os dois elétrons.

No parágrafo anterior mostramos qualitativamente como é possível ocorrer uma atração entre dois elétrons. Uma explicação quantitativa pode ser encontrada na referência [4]. A teoria de Fröhlich segundo a qual a interação elétron-fónon pode ocasionar uma ligação entre dois elétrons permitiu que ele fizesse a previsão do efeito isotópico antes que este efeito fosse descoberto experimentalmente. Esta interação entre os elétrons e as vibrações da rede cristalina explica porque os maus condutores (na temperatura ambiente) são normalmente bons supercondutores (e vice-versa). Por exemplo, o chumbo possui uma forte interação elétron-fónon que produz uma baixa condutividade na temperatura ambiente; mas que permite que ele se torne um supercondutor metálico com uma das temperaturas críticas mais elevadas entre os supercondutores metálicos. Por outro lado, a prata e o ouro (que são excelentes condutores na temperatura ambiente) não se tornam supercondutores nem mesmo em temperaturas próximas do zero absoluto.

### 3 APLICAÇÕES DA SUPERCONDUTIVIDADE

Este capítulo possui o objetivo de mostrar algumas aplicações já existentes e possíveis aplicações futuras da supercondutividade na ciência e na tecnologia. As inúmeras aplicações da supercondutividade podem ser classificadas em dois grandes grupos: aplicações em grande escala e aplicações em pequena escala. As aplicações em grande escala são aquelas que envolvem grande quantidade de energia (ou fortes campos magnéticos). As aplicações da supercondutividade em pequena escala são aquelas que envolvem pequena quantidade de energia (ou fracos campos magnéticos) [4].

#### 3.1 Aplicações que exigem fortes campos magnéticos

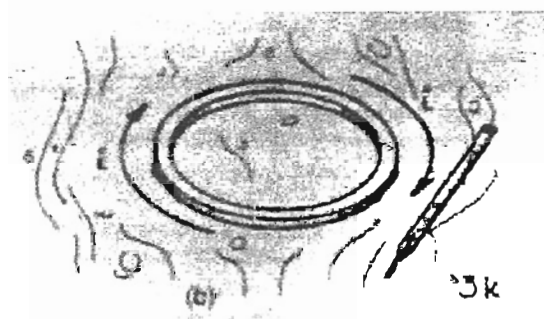
Os principais exemplos de aplicação em grande escala são fornecidos nas áreas de energia, transporte e aceleradores de partículas (estas aplicações exigem campos magnéticos superiores a 1 T). Por que são usadas bobinas supercondutoras para gerar fortes campos magnéticos e não são usadas bobinas convencionais? As bobinas convencionais além de possuírem um limite superior para a produção do campo magnético, devido à saturação do material ferromagnético, possuem outros inconvenientes: aquecem muito por causa do efeito Joule e são muito grandes. Todas essas dificuldades são superadas pelas bobinas supercondutoras. Além da produção de campos magnéticos elevados, outra vantagem das bobinas supercondutoras consiste na obtenção de campos magnéticos extremamente uniformes [4].

#### 3.2 Aplicações energéticas

Ginzburg (de acordo com [4]) diz que a viabilização prática das bobinas supercondutoras depende do desenvolvimento de um material supercondutor que possua uma

temperatura crítica elevada (da ordem da temperatura ambiente). Esta descoberta permitiria uma solução definitiva para os problemas relacionados com a produção de energia elétrica, com o consumo de energia elétrica e com o **armazenamento de energia elétrica**. Isto seria viável mediante o armazenamento de energia elétrica sob a forma de energia magnética (através de correntes persistentes (Fig.13) que circulam numa bobina supercondutora). Quando estas bobinas supercondutoras tornarem-se economicamente viáveis, os reatores nucleares (tanto os de fusão controlada quanto os de fissão controlada) se tornarão desnecessários, evitando-se o fantasma da poluição nuclear, além dos riscos normalmente envolvidos nos reatores nucleares.

O único método de armazenamento de energia elétrica sem nenhuma perda consiste na utilização de bobinas supercondutoras (ou de anéis supercondutores) que armazenam esta energia sob a forma de energia magnética (através das correntes persistentes que circulam numa bobina supercondutora) [4].



*Figura 13.* Uma vez estabelecida uma corrente num supercondutor, ela perdura mesmo quando se retira o gerador do circuito (pois não há perda de energia sob a forma de calor). (Figura reproduzida da Ref. [6]).

### ***Transmissão da energia elétrica***

A transmissão da energia elétrica feita por meio de linhas de transmissão supercondutoras não apresenta nenhuma perda somente quando transmitimos corrente contínua (DC). No caso da transmissão de corrente elétrica por meio de corrente alternada (AC) ocorre uma pequena perda mesmo quando utilizamos linhas de transmissão feitas com

materiais supercondutores. Entretanto, estas perdas são milhares de vezes menores do que as perdas que ocorrem numa linha de transmissão (para AC) feita com um material condutor normal [4].

### *3.3 Aplicações no transporte*

O termo MAGLEV deriva das palavras “MAGnetic LEVitation” que é igual à levitação magnética. Esta sigla serve para designar todos os **trens** (Fig. 14) que utilizam o fenômeno da levitação magnética (com ou sem o uso de supercondutores).

Existem duas técnicas para se projetar um trem com levitação: o método da levitação magnética e a técnica da levitação mediante a utilização de um colchão de ar. Vamos falar apenas da levitação magnética.

Conforme sabemos um supercondutor é um material diamagnético perfeito. Deste modo, o ímã induz no supercondutor correntes infinitesimais com sentidos contrários; e então surge uma força de repulsão entre as espiras que transportam correntes em sentidos contrários. Logo, a força entre um supercondutor e um ímã é sempre repulsiva. Esta é a explicação básica do fenômeno de levitação magnética. Se você colocar um ímã sobre um supercondutor (ou vice-versa) surgirá uma força de repulsão que manterá o supercondutor flutuando sobre o ímã ( ou vice-versa). Este é o princípio básico utilizado pelo MAGLEV.

*Figura 14.* Foto de um trem de levitação magnética japonês, que se move sem tocar o solo, em virtude da repulsão entre seus ímãs supercondutores e do campo magnético produzido por bobinas nos trilhos. (Figura reproduzida da Ref. [5]).



### 3.4 Aplicações na medicina

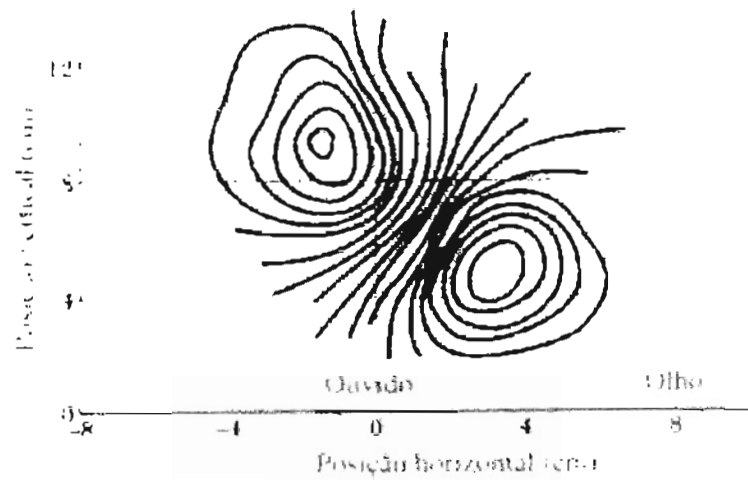
Nas seções anteriores descrevemos as principais aplicações que exigem fortes campos magnéticos. As principais aplicações que usam campos magnéticos fracos são as aplicações na **eletrônica**. Essas aplicações decorrem do uso das chamadas “junções Josephson” cujas explicações fogem ao objetivo desta monografia (ver a Ref. [4]).

O **Biomagnetismo** estuda as atividades biológicas que podem produzir fracos campos magnéticos. Por exemplo, algumas atividades do cérebro (Fig. 15) ou do coração produzem campos magnéticos extremamente fracos (da ordem de  $1 \text{ pT}$  ou menores). Já a magnetobiologia estuda o efeito de campos magnéticos sobre seres vivos. Por exemplo, alguns pesquisadores afirmam que as abelhas e algumas aves migratórias possuem sensibilidade magnética e provavelmente se orientam mediante a interpretação dos estímulos provocados pelo campo magnético da Terra.

O interesse maior das pesquisas de Biomagnetismo está concentrada principalmente nos campos magnéticos produzidos por fontes existentes no interior do corpo humano. Como exemplos podemos citar: o magnetocardiograma, o magnetocardiograma do feto, e outros mais. Todos os efeitos magnéticos acima possuem efeitos elétricos que são detectados através de medidas de ddp (diferença de potencial). Por exemplo o eletrocardiograma é produzido por impulsos elétricos provenientes da atividade cardíaca. Os métodos envolvendo medidas elétricas, são, atualmente, mais utilizados do que os métodos magnéticos. Contudo, com o aperfeiçoamento do SQUID acreditamos que as medidas magnéticas biológicas irão desempenhar brevemente um papel muito relevante nas pesquisas médicas.

Denomina-se SQUID todo dispositivo supercondutor que utiliza o fenômeno da interferência quântica produzida por junções Josephson (Fig. 16). A palavra SQUID é formada pelas iniciais da expressão “Superconductor Quantum Interferometric Device” (dispositivo supercondutor que exhibe a interferência quântica). Um SQUID é essencialmente um dispositivo que possui uma extraordinária sensibilidade para variações do fluxo magnético [4].





*Figura 15.* Campo magnético produzido quando uma pessoa ouve um som de 600 *Hz*. Essa experiência, realizada na New York University, permite verificar que parte do cérebro participa da audição. (Figura reproduzida da Ref. [5]).



*Figura 16.* Foto de um dispositivo supercondutor de interferência quântica imerso em hélio líquido que detecta o campo magnético gerado pela atividade cerebral. (Figura reproduzida da Ref. [5]).

## 4 EXPERIÊNCIAS SOBRE SUPERCONDUTIVIDADE

Este capítulo é destinado a mostrar algumas experiências de supercondutividade que podem ser realizadas em sala de aula. As experiências propostas são de três tipos:

- a) Experiências que mostram efeitos magnéticos (efeito Meissner, expulsão do fluxo e levitação) exemplificadas nas Seções 4.1 e 4.2.
- b) Experiências que mostram a resistência elétrica nula exemplificadas nas Seções 4.3 e 4.4.
- c) Experiências que envolvem o efeito Josephson aplicado na eletrônica. Como estas experiências exigem o uso de um laboratório de microeletrônica, vamos apenas citar um exemplo deste tipo de experiência na Seção 4.5.

Como o fenômeno da supercondutividade exige baixas temperaturas, as experiências necessitam de atenção especial durante sua preparação e execução. A experiência 5 é sugerida apenas para laboratórios de física. As que podem ser feitas em sala de aula são aquelas que possuem temperaturas mais elevadas e podem ser realizadas com nitrogênio líquido.

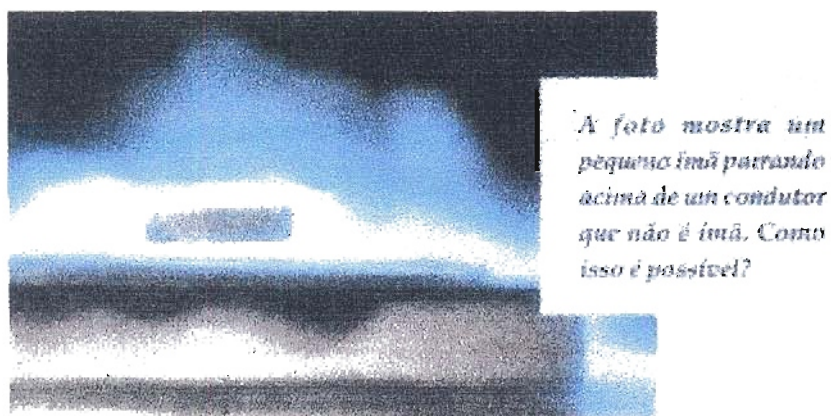
### 4.1 Experiência 1

Como visto na Seção 2.7 o campo magnético no interior de um supercondutor é nulo. Este fenômeno físico possibilita diversas aplicações tecnológicas assim como demonstrações científicas que são visualmente bastante impressionantes.

Para a realização de uma demonstração de levitação magnética, é sugerido aqui que seja usado um sistema composto por um ímã de terras raras sobre um bloco de  $\text{YBaCuO}$  em um recipiente transparente contendo nitrogênio líquido (Fig. 17). Esta é uma das muitas formas de demonstração da levitação magnética que pode ser feita em sala de aula com segurança.

Este tipo de demonstração causa sempre um impacto visual muito forte nos alunos despertando-lhes a atenção para o fenômeno da supercondutividade. É sempre importante

lembrar os cuidados que devemos tomar com a manipulação de nitrogênio líquido para que não ocorra acidentes. As experiências são de tamanha importância porque permitem que os alunos analisem as previsões feitas pelo modelo com os fatos reais verificados experimentalmente.



*Figura 17.* Foto de um ímã de terras raras levitando sobre um supercondutor. (Figura reproduzida da Ref. [7]).

Sobre o ímã atuam duas forças, o peso ( $F_p$ ) do ímã e a força magnética ( $F_m$ ) que age sobre o ímã, devido ao efeito Meissner. Como o módulo do peso é o mesmo da força magnética, o ímã levita sobre o supercondutor.

Materiais utilizados:

- 01 ímã de terras raras;
- 01 recipiente para conter nitrogênio líquido;
- 01 bloco de YBaCuO;
- nitrogênio líquido, transportado em uma garrafa térmica.

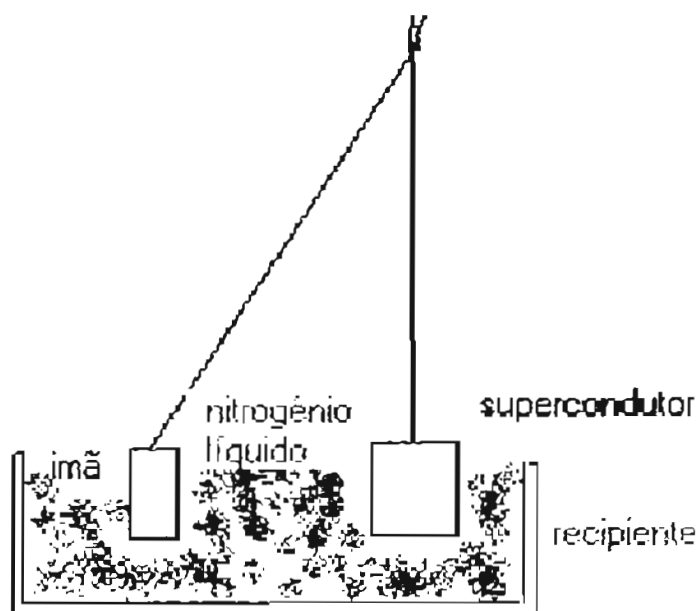
## 4.2 Experiência 2

Outra experiência que apresenta o efeito magnético é a do pêndulo de teste (Fig 18). Uma liga de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  e um ímã são suspensos por dois fios de náilon que são unidos

em um ponto. A liga e o imã, que estão na temperatura ambiente, são imersos em nitrogênio líquido. Quando a liga de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  tornar-se supercondutora, a força de repulsão entre o supercondutor e o imã causa a sua separação [10]. Este experimento pode ser usado para verificar se um material é ou não supercondutor.

Materiais utilizados:

- 02 fios de náilon;
- 01 recipiente próprio para conter nitrogênio líquido;
- 01 imã;
- 01 liga de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ;
- nitrogênio líquido, transportado em uma garrafa térmica.



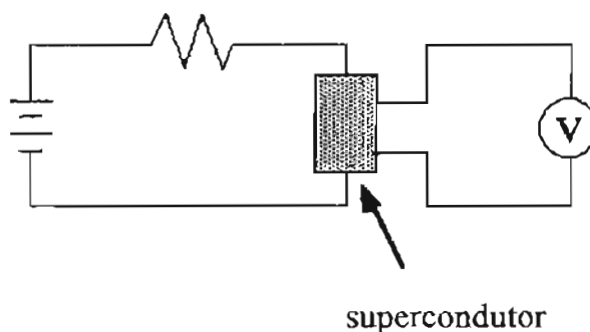
*Figura 18.* Pêndulo de teste. O supercondutor e o imã são imersos em nitrogênio líquido. O efeito Meissner causa a separação entre ambos. (Figura adaptada de [10]).

### 4.3 Experiência 3

A perda da resistência, abaixo da temperatura crítica, pode ser verificada medindo-se a queda de voltagem através do supercondutor no circuito. O aparato é mostrado esquematicamente na Fig. 19. Uma bateria gera uma corrente,  $I$ , a qual passa através do

supercondutor. A queda de voltagem,  $V = RI$ , no supercondutor devido a sua resistência,  $R$ , em temperatura ambiente é medida utilizando-se o voltímetro. Quando o material se torna supercondutor,  $R = 0$ , então  $V = 0$  e nenhuma queda de voltagem deve ser medida. O resistor no circuito evita que a bateria sofra um curto-circuito quando o supercondutor perder sua resistência.

Cuidado! O resistor no circuito de teste torna-se quente. Não toque o resistor ou coloque nitrogênio líquido nele. O choque térmico pode causar sua quebra e você pode queimar seus dedos.



*Figura 19. Supercondutor colocado num circuito elétrico.  
(Figura reproduzida da Ref. [9]).*

#### Materiais utilizados:

- 01 bateria de 12 volts;
- 01 resistor de 100  $\Omega$ ;
- 01 liga de YBaCuO;
- 01 voltímetro;
- ~~01 recipiente para conter nitrogênio líquido;~~
- nitrogênio líquido, transportado em uma garrafa térmica;
- fios;
- conectores;
- cola prata para ligar os conectores elétricos com a liga de YBaCuO.

#### Procedimento experimental.

- 1 - Coloque o supercondutor cuidadosamente nos conectores para inseri-lo no circuito;
- 2 - Monte o circuito da Fig. 19;

3 - Coloque nitrogênio líquido cuidadosamente no recipiente onde se encontra o supercondutor;

4 - Observe o que acontecerá com a voltagem quando for atingida uma temperatura abaixo da temperatura crítica.

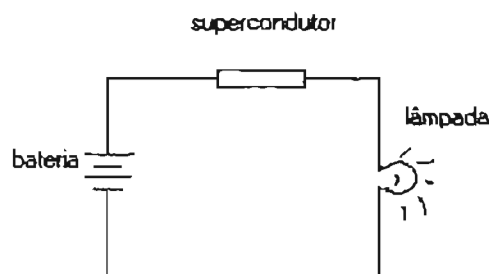
5 - Explique o que aconteceu com suas palavras.

#### 4.4 Experiência 4

Sugerimos uma experiência semelhante à anterior para demonstrar a resistência nula sem usar o voltímetro. Esta experiência pode ser feita utilizando o circuito elétrico indicado na Fig. 20. Para isso adotamos o seguinte procedimento:

- Insira no circuito uma pequena lâmpada em série com o supercondutor;
- Conecte a bateria em série com o supercondutor e com a lâmpada.

Figura 20. Circuito elétrico para demonstrar a resistência nula.



Na situação descrita na Fig. 20, a lâmpada não acenderá porque a resistência oferecida pelo circuito é muito grande e a corrente não possui o valor mínimo necessário para acender a lâmpada. Coloque cuidadosamente nitrogênio líquido sobre o supercondutor e aguarde. Quando a temperatura diminuir abaixo da temperatura crítica haverá a passagem do estado condutor para o estado supercondutor. Instantaneamente, a lâmpada acenderá e poderemos verificar uma das propriedades do estado supercondutor, a resistência elétrica nula.

Materiais utilizados:

- 01 bateria de 12 volts;
- 01 pequeno fragmento de um bloco de YBaCuO;
- 01 lâmpada de 21 W;

- 01 bocal de lâmpada;
- ~~01 recipiente para conter nitrogênio líquido;~~
- cola prata para ligar os conectores elétricos com o fragmento de YBaCuO;
- conectores;
- fios;
- nitrogênio líquido, transportado em uma garrafa térmica.

#### 4.5 Experiência 5

A experiência 5 não é tão simples de ser realizada em sala de aula e por isso a propomos apenas aos laboratórios de física capacitados em microeletrônica. Esta é uma proposta experimental que possui duas características singulares e relevantes para as aplicações na eletrônica: possuem um nível de ruído eletrônico extremamente pequeno (principalmente na entrada) e uma resistência muito pequena. Vamos discutir a viabilidade do projeto de um amplificador paramétrico (também chamado de amplificador de potência) (Fig. 21) usando a resistência diferencial negativa da curva característica I - V de uma junção Josephson metálica conforme proposto por [4].

Designamos a tensão de entrada por  $V_o(w)$  e a tensão na saída de  $V(w)$ . A resistência equivalente da carga externa é dada por  $R_p$  e  $R_s$  é uma resistência equivalente que inclui as resistências dos fios e conexões, bem como a resistência da fonte (não incluída no esquema da Fig. 19 e da Fig. 20).

Vemos que o ganho de voltagem é dado pela seguinte expressão:

$$V(w)/V_o(w) = -R_n R_p / [R_s R_p - R_n (R_s + R_p)]$$

onde  $R_n$  é o módulo da resistência diferencial negativa. No caso de uma operação estável a microponte SNS não produz nenhuma variação de frequência nem na entrada nem na saída. Quando

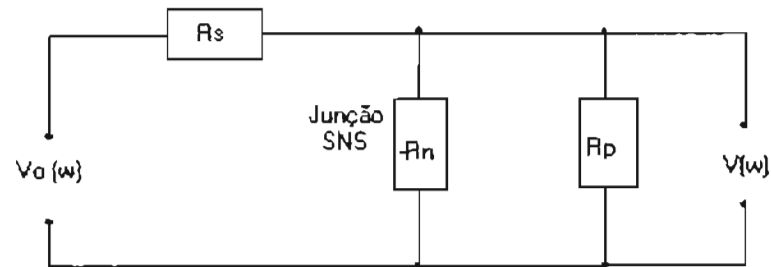
$$R_n > R_s R_p / (R_s + R_p)$$

existe um ganho positivo e o dispositivo proposto fornece amplificação de potência, ou

seja trata-se de um amplificador paramétrico. Entretanto, quando

$$R_n = R_s R_p / (R_s + R_p)$$

o ganho torna-se infinito, ou seja, uma tensão de saída é obtida sem nenhuma tensão na entrada.



*Figura 21.* Diagrama esquemático de um amplificador paramétrico que utiliza a região de resistência diferencial negativa da curva característica I - V de uma junção Josephson metálica. (Figura adaptada de [4]).



## 5 CONCLUSÃO

Após o término das passagens históricas, explicações da teoria e da exibição de transparências que mostraram aplicações já existentes e futuras aplicações da supercondutividade, os alunos puderam perceber como a física está relacionada ao seu cotidiano. Muitos queixaram-se da dificuldade de entender os conceitos, o que mostra que o problema também pode ter sido “eu”, ou seja, o professor; ou também, a falta de bagagem teórica.

Quero também deixar registrado a imensa dificuldade que tive em transportar o assunto para sala de aula por diversos motivos, entre os quais destaco:

- Não ter visto a supercondutividade em sala de aula durante o curso de física;
- Por ser um assunto relativamente novo, a falta de materiais adequados;
- A dificuldade de montar aparatos experimentais;
- Fazer a filtragem de uma matemática avançada.

O trabalho alcançou seu objetivo porque além dos alunos terem ficado curiosos, diversos deles quiseram continuar a conversar sobre o tema, fazendo inúmeras perguntas. Alguns chegaram a trazer revistas que mostravam reportagens sobre o assunto. Tal fato mostra que, considerando as limitações do professor, quando se faz a relação entre a teoria e o cotidiano dos alunos eles se mostram mais receptivos ao saber.

Dessa forma, concluímos que a prática pedagógica de inserção do tema no cotidiano é muito importante para o aprimoramento do aluno e só lhe traz benefícios. A apresentação da evolução histórica facilitou o trabalho porque mostrou que o conhecimento não surge do “nada”, e sim de um acúmulo de conhecimentos e pela busca incessante de novas descobertas.

As discussões sobre o tema, os efeitos relacionados, as teorias que envolvem o fenômeno e suas aplicações tornaram a aula interessante e descontraída quebrando a monotonia que quase sempre acompanha as exposições teóricas.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] Parâmetros Curriculares Nacionais - PCN, 2001.
- [2] Ostermann, F., Moreira, M. A., *Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: Um estudo da problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e na formação inicial de professores*, Cad. Cat. Ens. Fis., v. 18, nº. 2, ago., 2001.
- [3] Cardoso Dias, P. M., *A (Im)Pertinência da História ao Aprendizado da Física (um Estudo de Caso)*, Rev. Bra. Ens. Fis., v. 23, nº. 2, jun., 2001.
- [4] Luiz, A. M., *Aplicações de supercondutividade*, Livro editado por Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP, 1992.
- [5] Resnick, R., Halliday, D., *Fundamentos de Física - Eletromagnetismo*, 4ª Ed., Liv. Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1996.
- [6] Guimarães, L. A., Fonte Boa, M., *Eleticidade e Ondas*, Ed. Harbra, São Paulo, 1998.
- [7] Sampaio, J. L., Calçada, C. S., *Universo da Física 3*, Saraiva SA. Livreiros Editores, São Paulo, 2001.
- [8] Bardeen, J., Cooper, L. N. e Schrieffer, J. R., *Theory of superconductivity*, Phys. Rev., v. 108, p. 1175, 1957.
- [9] <http://imr.chem.binghamton.edu/labs/super/superc.html>.
- [10] Early, E. A., Seaman, C. L., Yang, K. N., Maple, M. B., *Demonstrating superconductivity at liquid nitrogen temperatures*, American Journal of Physics, v. 56, p. 617 - 620, 1988.