

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

**Supercondutividade, um estudo sobre os seus 100 anos.  
Elementos para sua Divulgação Científica.**

**Daniel Fonseca de Souza**

**Manaus-AM  
2012**

**Supercondutividade, um estudo sobre os seus 100 anos.  
Elementos para sua Divulgação Científica.**

**Daniel Fonseca de Souza**

Dissertação apresentada ao  
Departamento de Física da  
Universidade Federal do Amazonas,  
como parte dos requisitos básicos  
para obtenção do título de mestre  
em Física.

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Angsula Ghosh -  
Orientadora**

**Manaus-AM  
2012**

**Supercondutividade, um estudo sobre os seus 100 anos.  
Elementos para sua Divulgação Científica.**

Souza, Daniel Fonseca de.

Supercondutividade, um estudo sobre os seus 100 anos. Elementos para a sua divulgação científica/ Daniel Fonseca de Souza, 2012.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Angsula Ghosh

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós Graduação em Física, Manaus, 2012

**Banca Examinadora**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Angsula Ghosh - Orientadora (UFAM)

Prof. Dr. Jose Anglada Rivera - Membro Externo (IFAM)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Daniela Menegon Triches - Membro Interno (UFAM)

Manaus-AM

2012

Feliz é o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire entendimento; pois melhor é o lucro que ela dá do que o lucro da prata, e a sua renda do que o ouro. Mais preciosa é do que as joias, e nada do que possas desejar é comparável a ela. Pr. 3.13-15

# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumo</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Características dos supercondutores convencionais</b>	<b>8</b>
2.1 Resistência elétrica . . . . .	9
2.2 Efeito Meissner . . . . .	11
2.3 Corrente persistente . . . . .	13
2.4 Calor Específico . . . . .	14
2.4.1 Calor específico acima de $T_c$ . . . . .	14
2.4.2 Descontinuidade sobre $T_c$ . . . . .	14
2.4.3 Calor específico abaixo de $T_c$ . . . . .	15
2.5 Efeito isotópico . . . . .	16
2.6 Campo magnético crítico . . . . .	17
2.7 Classificação dos materiais supercondutores . . . . .	18
2.7.1 Supercondutores do tipo I . . . . .	18
2.7.2 Supercondutores do tipo II . . . . .	19
2.8 Junções Josephson . . . . .	21

2.9	Teorias da Supercondutividade . . . . .	22
2.9.1	Teoria de London . . . . .	22
2.9.2	Teoria de Ginsburg Landau . . . . .	25
2.9.3	Teoria BCS . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Supercondutores de alta temperatura crítica</b>	<b>35</b>
3.1	Materiais supercondutores de alta temperatura crítica . . . . .	37
3.2	Estrutura do YBCO . . . . .	37
3.3	Efeitos da dopagem nos supercondutores de alta temperatura crítica . . .	38
3.4	Propriedades dos cupratos . . . . .	39
3.5	Prováveis teorias microscópicas . . . . .	40
3.5.1	Crossover da BCS para BEC . . . . .	41
3.5.2	Modelo de Hubbard . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Aplicações tecnológicas da supercondutividade</b>	<b>44</b>
4.1	Aplicações em pequena escala . . . . .	44
4.1.1	SQUIDS . . . . .	44
4.1.2	Aplicações na eletrônica . . . . .	46
4.1.3	Aplicações na computação . . . . .	46
4.2	Aplicações em Grande Escala . . . . .	47
4.2.1	Fios supercondutores de alta temperatura crítica . . . . .	47
4.2.2	Os eletroímãs supercondutores . . . . .	49
4.2.3	Levitação magnética . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Pressupostos Teóricos</b>	<b>57</b>
5.1	Objeto da aprendizagem . . . . .	57
5.2	Modelo teórico da pesquisa . . . . .	59
5.2.1	Métodos e Técnicas da Pesquisa . . . . .	61
5.3	Proposta do curso de intervenção . . . . .	64

5.4	Descrição das aulas . . . . .	68
5.5	Discussão dos resultados . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>92</b>
<b>A</b>	<b>Aprendizagem significativa</b>	<b>95</b>
A.1	Organizadores Prévios . . . . .	97
<b>B</b>	<b>Questionário inicial</b>	<b>100</b>
<b>C</b>	<b>Questionário final</b>	<b>102</b>
<b>D</b>	<b>Texto introdutório ao curso de atualização</b>	<b>105</b>

# Lista de Figuras

2-1	Gráfico obtido por K. Onnes para a resistência do mercúrio em função da temperatura. Fonte: Onnes. 1911[1] . . . . .	10
2-2	Técnica para produzir uma corrente persistente num anel supercondutor. Fonte: Luiz. 1992 [14] . . . . .	13
2-3	Salto do calor específico no supercondutor Al. Fonte: Poole. 2000 [23] . .	16
2-4	Campo crítico em função da temperatura. Fonte: Tinkam. 1975 [12] . . .	18
2-5	Diagrama de fase H-T para supercondutores tipo I e II. Fonte: Costa. 2012 [19] . . . . .	18
2-6	Estrutura de um vórtice de Abrikosov. Fonte: Ostermann. 2005 [25] . .	20
2-7	Interação entre dois vórtices. Fonte: Ostermann. 2005 [25] . . . . .	20
2-8	Rede hexagonal de vórtices de Abrikosov no estado misto. Fonte: Ostermann. 2005 [25] . . . . .	21
2-9	Exemplo de junção Josephson. Fonte: Costa 2012 [19] . . . . .	21
2-10	Penetração do fluxo magnético no interior de um supercondutor. Fonte: Costa. 2012 [19] . . . . .	25
2-11	Diagrama esquemático mostrando a polarização da rede por um elétron. Fonte: Oliveira. 2005 [24] . . . . .	29
2-12	Diagrama de energia de um supercondutor BCS. Fonte: Oliveira. 2005 [24]	32
3-1	A evolução cronológica do recorde de temperatura crítica dos materiais supercondutores. Fonte: Ostermann. 2005 [25] . . . . .	36
3-2	Estrutura Cristalográfica do <i>YBCO</i> . Fonte: Motta. 2009 [38] . . . . .	38



3-3	Diagrama de fases do conforme a estequiometria de oxigênio. Fonte: Motta. 2009 [38] . . . . .	39
3-4	Distribuição espacial da densidade do elétron para os cinco orbitais d. Fonte: Poole. 2007 [23] . . . . .	41
3-5	Orbitais usados para o modelo de três estados de planos Cu-O. Fonte: Poole. 2007 [23] . . . . .	42
4-1	(a) SQUID RF e DC. (b) Modulação da corrente elétrica num SQUID DC. Fonte: Ostermann. 2005 [25] . . . . .	45
4-2	Representação esquemática de magnetoencefalografia usando detectores SQUID. Fonte: Ostermann. 2005 [25] . . . . .	46
4-3	Estrutura do maior cabo supercondutor. Fonte: <nexans.com.br> . . . . .	48
4-4	Imagem por ressonância nuclear magnética. Fonte: <epilepsia-cirurgia.com.br> . . . . .	49
4-5	Ressonância nuclear magnética pré-operatória. Fonte: <portaldaradiologia.com> . . . . .	50
4-6	Princípio da levitação magnética. Fonte: <tansportes.ime.eb.br> . . . . .	51
4-7	Princípio da orientação lateral. Fonte: <tansportes.ime.eb.br> . . . . .	52
4-8	Suporte de sustentação do trem. Fonte: <tansportes.ime.eb.br> . . . . .	52
4-9	Esquema da cadeia de Halbach. Fonte: <tansportes.ime.eb.br> . . . . .	53
4-10	Linha de 30 m em escala reduzida. Fonte: <maglevcobra.com.br> . . . . .	54
4-11	Maglev-Cobra com capacidade de 240 passageiros. Fonte: <maglevcobra.com.br> . . . . .	55
4-12	Anéis do Maglev-Cobra com bancos no sentido transversal. Fonte: <maglevcobra.com.br> . . . . .	55
4-13	Base de Levitação do Maglev-Cobra. Fonte: <maglevcobra.com.br> . . . . .	56
5-1	Estrutura da pesquisa desenvolvida pelo autor da dissertação. . . . .	60
5-2	Grau de escolaridade dos participantes do Curso . . . . .	68

5-3	Onde estudou sobre o tema? . . . . .	69
5-4	Acerca do conhecimento sobre supercondutividade . . . . .	70
5-5	A que área da Física deve pertencer a supercondutividade? . . . . .	70
5-6	Grau de importância dos objetos da aprendizagem . . . . .	71
5-7	Avaliação do Curso . . . . .	76
5-8	Grau de aprimoramento do conhecimento . . . . .	77
5-9	O quanto o curso foi estimulante para a inserção dos objetos da aprendizagem em sala de aula? . . . . .	78

# Agradecimentos

Primeiramente à Deus, pois acredito que foi ele que me conduziu até aqui. À minha esposa Leiziane pela paciência e por estar sempre ao meu lado nas minhas escolhas. À minha mãe Zenilda e ao meu pai Antonio, por me criarem nos caminhos corretos. Aos meus irmãos Augusto e Rosana pelos incentivos. Aos meus amigos Alexandre e Helton, pela amizade verdadeira. Ao Pastor Elânio, e o Francisco pela palavra de motivação que sempre tiveram. À Professora Angsula pela orientação acadêmica, ao Professor Yuri por acreditar no projeto e por me ensinar a pesquisar nessa área. A todos os Professores da UFAM e que contribuíram direta ou indiretamente para essa realização, e a todos os meus colegas da UFAM, Emanuel, Carlos, Adalberto, Elcivan, Adlas, Ane, Cláudio, Quezia, Madson, Israel, Bruno, Celso, entre outros que sempre me ajudaram quando precisei.

# Resumo

Em 2011 fora comemorado os 100 anos da descoberta do fenômeno da supercondutividade. Pois em 1911 H. K. Onnes ao resfriar o Mercúrio usando Hélio líquido observou que para valores de temperatura menor que 4,2 K, a resistência elétrica caía abruptamente até um valor de resistência elétrica mensurável igual a zero. A partir desse momento os cientistas começaram a procurar novos materiais que apresentam essa característica à temperaturas elevadas. Os supercondutores, todavia, não são um simples condutor ideal, pois apresentam um comportamento bem característico conhecido como Efeito Meissner, que é a expulsão do fluxo magnético do interior do material. As primeiras tentativas para explicar esse fenômeno foram de natureza fenomenológica: como a teoria de London e de Ginsburg-Landau, porém a teoria que explicou a princípio satisfatoriamente a supercondutividade fora à teoria desenvolvida por Bardeen, Cooper e Schrieffer (BCS). No entanto, mais recentemente em 1986, fora descoberto a supercondutividade em compostos cerâmicos feitos de óxidos de bário e lantânio, onde a teoria BCS não é capaz de explicar satisfatoriamente o mecanismo responsável pela supercondutividade nos supercondutores de alta temperatura crítica, fazendo portanto necessário o desenvolvimento de uma teoria microscópica que explique os novos supercondutores. Os cientistas atuais buscam encontrar supercondutores à temperatura ambiente, o que acarretaria segundo especialistas em uma nova revolução industrial, com impactos na eletrônica, na geração e armazenamento de energia elétrica, entre outros. Portanto, é de suma importância que esse conhecimento seja divulgado aos acadêmicos de Física. Preparando-os para que posteriormente levem esse conhecimento aos seus respectivos alunos. Todavia, para auxiliar nessa tarefa tem-se os objetos da aprendizagem, que demonstra ser uma ferramenta muito importante, na divulgação científica do conteúdo.

# Abstract

In 2011 the scientific community celebrated the 100th anniversary of the discovery of the phenomenon of superconductivity. In 1911 H. K. Onnes observed for the first time that the electrical resistance of mercury drops abruptly to zero when cooled below 4.2 K . From that moment the scientists began to look for new materials that exhibit the above characteristic at higher temperatures. Superconductors, however, are not a simple ideal conductor because it presents a characteristic known as the Meissner Effect, which is the expulsion of the magnetic flux from the material. The first few attempts to explain this phenomenon were phenomenological: theory of London and theory of Ginsburg-Landau, but the microscopic theory that satisfactorily explained the superconductivity was the theory developed by Bardeen, Cooper and Schrieffer (BCS). However, very recently in 1986, superconductivity was discovered in compounds made of ceramic oxides of barium and lanthanum. Moreover, the BCS theory can not satisfactorily explain the mechanism responsible for superconductivity in high temperature superconductors. Hence the development of a microscopic theory is essential that explains the new superconductors. Scientists today seek to find superconductors at room temperature, which experts say would bring a new industrial revolution, with high impacts in electronics, generation and storage of electrical energy, among others. Therefore, it is of utmost importance to propagate the above knowledge to the students and the physics community in general. Hence, we employ the means of learning that have been a very important tool in revealing science and technology.

# Capítulo 1

## Introdução

O ano de 1911 marca o início dos estudos relacionados à supercondutividade, pois nesse ano H. Karmeligh Onnes junto com Gilles Holst um pesquisador associado de Onnes da Universidade de Leiden, ao estudarem as propriedades do mercúrio em baixas temperaturas observaram que a 4,2 K ( $-268,8^{\circ}C$ ) sua resistividade elétrica desaparece de forma abrupta e aparentemente por completo [1]. Dois anos depois verificou-se que o chumbo se tornava supercondutor abaixo de uma temperatura crítica de 7,2 K. Em 1914, H. K. Onnes notou que a supercondutividade pode ser destruída por um campo magnético  $H$  maior do que um certo campo magnético crítico  $H_c$  e, como os valores de  $H_c$  medidos por H. K. Onnes eram relativamente pequenos tornavam os primeiros supercondutores inviáveis para uma possível aplicação tecnológica.

Durante 22 anos os pesquisadores acreditavam que as previsões feitas sobre o comportamento magnético de um condutor perfeito eram verdadeiras para um supercondutor, no entanto, em 1933 é descoberto pelo físico alemão Walther Meissner, outra característica que o diferencia de um condutor perfeito, a expulsão do fluxo magnético do interior da parte maciça de um supercondutor que ficou conhecido como Efeito Meissner [2]. Dois anos depois é desenvolvida por dois alemães: os irmãos London, uma teoria fenomenológica que explica o Efeito Meissner e, também indica a presença de um parâmetro considerado fundamental: o comprimento de penetração de London [3]. Essa teoria

é ampliada e refinada pelos russos Ginzburg e Landau que desenvolveram uma teoria também fenomenológica para explicar as propriedades termodinâmicas da transição do estado normal para o supercondutor e, através deste introduziu uma nova grandeza no universo da supercondutividade: o comprimento de coerência, o qual mede a variação espacial do parâmetro de ordem [4]. No entanto, a primeira teoria microscópica só foi proposta quarenta e seis anos após a descoberta de Onnes e Holst, por: Jon Bardeen, Leon Cooper e Robert Shrieffer [5]. Essa teoria descreveu satisfatoriamente dados experimentais observado nos supercondutores alcançando rapidamente a aceitação da comunidade científica e, fundamenta a teoria na atração entre elétrons via deformação da rede. Em 1962 com base na teoria BCS, o físico inglês Brian D. Josephson supôs que a junção de dois materiais supercondutores apresenta propriedades particulares, o que foi comprovado posteriormente a veracidade dessa informação através de experimentos, esse efeito ficou conhecido como Efeito Josephson [6].

O valor da temperatura crítica cresceu pouco nos primeiros anos da descoberta do fenômeno, a mais alta temperatura crítica conhecida era 23,2 K, num composto metálico de nióbio e germânio, esse recorde permaneceu até 1986, quando Bednorz e Muller descobriram o composto  $LaBaCuO$ , com temperatura crítica de 30 K [7]. Um ano depois os físicos americanos Paul Chu e Maw Kuen Wu descobriram o composto  $YBaCuO$ , com temperatura crítica de 93 K, atualmente temos supercondutividade num composto de  $HgBaCaCu$ , com temperatura crítica de 135 K [8]. Outros dois compostos que tem sido bastante estudo como o diboreto de magnésio ( $MgB_2$ ) com temperatura crítica de 40 K, descoberto por Jun Akimitsu em 2001 [9] e o composto de ferro que apresenta temperatura crítica de 55 K , descoberto em 2006 por Hideo Hosono [10], apesar de não apresentarem temperatura crítica elevada, esses compostos apresentam excelentes propriedades mecânicas .

Apesar do avanço nessa área de pesquisa, ainda não há consenso com relação ao mecanismo que causa alta temperatura crítica, sendo assim a procura por novos supercondutores tem sido feita de maneira totalmente empírica. A teoria BCS prevê no

máximo uma temperatura crítica de 40 K. No entanto, como já foi comentando existem vários compostos que apresentam o fenômeno à temperatura muito maior que o limite estabelecido pela teoria. Portanto, algumas outras teorias têm sido propostas, porém os resultados experimentais que se tem não são suficientemente precisos para confirmar ou refutar essas teorias.

Diante desse cenário, muitos trabalhos têm sido publicados acerca dessa temática e também têm sido grande os esforços de cientistas com intuito de criar meios facilitadores ao ensino dessa parte da física que está sendo largamente divulgado por revistas e pela mídia como o futuro da tecnologia podendo até acarretar uma revolução tecnológica, e através da utilização dessa temática deseja-se promover uma aprendizagem significativa.

Seguindo este raciocínio neste trabalho pretende-se propor uma solução ao problema científico: Quais elementos estratégicos precisam-se para divulgar cientificamente a supercondutividade mediada pelos objetos da aprendizagem?

Há mais 25 anos tenta-se comprovar a eficácia do uso da tecnologia no ensino, e tem sido frequente a pergunta: usar a tecnologia para ensinar faz com que os alunos aprendam mais? Dois estudos inéditos demonstram como a tecnologia ajudou a melhorar as notas de alunos da rede pública, a primeira pesquisa foi realizada pela Fundação Carlos Chagas (FCC) <sup>1</sup> que ao avaliar as escolas públicas do município de José de Freitas, no interior do Piauí, que desde o início de 2009 estudam com o apoio de lousas interativas, laptops individuais e softwares educativos, o estudo mostrou que a média dos alunos em matemática melhorou em 8,3 pontos, enquanto os que não usaram a tecnologia avançaram apenas 0,2 ponto. A UNESCO<sup>2</sup> divulgou uma pesquisa recente avaliando o desempenho de alunos de escolas públicas de Hortolândia, em São Paulo, que usaram salas de aula com lousa digital e um computador por aluno, o resultado mostrou uma melhora de duas a sete vezes maior em relação às aulas comuns.

Diante de tamanha importância da inserção dessa tecnologia na sala de aula, o Min-

---

<sup>1</sup>Disponível em: <<http://www.fcc.org.br>> Acesso em: 08/09/2011

<sup>2</sup>Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/pt/brasil>> Acesso em: 10/09/2011



istério da Educação tem investido em projetos voltados para as novas tecnologias de informação e comunicação (TIC), a fim de que sua utilização seja uma ferramenta facilitadora do processo ensino aprendizagem, como por exemplo, o programa *Um Computador por Aluno* (UCA), um projeto que integra as ações para o uso de novas TIC nas escolas, por meio da distribuição de computadores portáteis aos alunos da rede pública de ensino<sup>3</sup>. No ano de 2011, o governo aprovou uma série de isenções fiscais, a fim de incentivar a aquisição de Tablets pela população e em algumas Universidades particulares os alunos no ato da matrícula ganham um Tablet. Essa realidade traz um novo desafio aos professores que precisam ter uma nova postura na forma de ensinar, rompendo de certa forma com o ensino tradicionalista que de acordo com as pesquisas em ensino precisam passar por profundas mudanças.

Neste trabalho se estudará a supercondutividade cuja pesquisa se desenvolverá no campo de ação da Física Contemporânea, que segundo Spohr [11] desperta grande interesse dos alunos, principalmente devido as suas aplicações tecnológicas. Entre os vários atrativos pode-se destacar: uma ênfase curricular importante no ensino de Física, que trata da educação sobre ciência e que está expressa em muitos aspectos das Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN)<sup>4</sup>.

A pesquisa surge pela experiência do autor ao cursar, o módulo das disciplinas obrigatórias do mestrado em física teórica que lhe demonstrou a carência de se ensinar esse conteúdo físico nos diferentes níveis de ensino através de uma metodologia que favoreça aprendizagem significativa. Tomaremos como referências principais: o livro *Introdução a supercondutividade* de Michael Tinkam [12], o artigo *Um Tópico de Física Contemporânea no Ensino Médio: um texto para professores sobre supercondutividade* de Fernanda Ostermann [13], o livro do Doutor Adir Moysés Luiz [14] *Aplicações da supercondutividade*, o artigo *Objetos da aprendizagem no ensino de física: usando simulações de física*, Alessandra Arantes [15] e o artigo *O tema da supercondutividade no ensino médio: uma exper-*

---

<sup>3</sup>Disponível em: <<http://www.mec.org.br/>> Acesso em: 11/12/2011

<sup>4</sup>Disponível em: <[http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/book\\_volume\\_02\\_internet.pdf](http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/book_volume_02_internet.pdf)> Acesso em: 13/12/2011

*iência didática centrada no uso de material hipermídia*, de Carla Spohr [11] e também as simulações do grupo phet, entre outros.

Com intuito de facilitar a aprendizagem dos alunos sobre a temática, será utilizada a aprendizagem significativa cujas idéias expressas simbolicamente interagem de maneira substantiva e não arbitrária com aquilo que o aprendiz já sabe [16]. Essa proposta baseia-se em ensinar o que o aluno já sabe identificando os conceitos organizadores básicos do que vai ser ensinado e utilizando os recursos e princípios que facilitem a aprendizagem de maneira significativa, pois segundo Ausubel [17] *“Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio educacional diria o seguinte: o fator mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Averigue isso e ensine-o de acordo”*. Ao professor que deseja que seus alunos aprendam significativamente é necessário que elabore e aplique atividades de ensino contextualizadas, objetivando promover a ação do aluno dentro ou fora de sala de aula, estimulando-o a participar de forma mais efetiva no processo de busca e compreensão de conhecimentos científicos e tecnológicos por meio de novas experiências de aprendizado.

Nesse sentido propõe-se o ensino de física moderna e contemporânea através do uso das novas tecnologias da informação e comunicação, pois acredita-se que é um recurso presente no cotidiano da maioria dos alunos das escolas brasileiras, afim de que a forma de ensinar não seja ultrapassada adequando às características dos alunos, permitindo assim ao aluno aprender de forma interativa, lúdica e criativa, podendo dinamizar e estimular o ensino.

Para responder ao problema científico estamos propondo alguns objetivos:

### **Objetivo Geral**

Propor um sistema de trabalho com ajuda das novas tecnologias da informação e comunicação para orientar o conhecimento de supercondutividade que favoreça a divulgação científica da supercondutividade além de possibilitar o desenvolvimento de aulas dinâmicas e potencialmente motivadoras.

## **Objetivos específicos**

Estudar os principais acontecimentos científicos que ocorreram nos 100 anos da supercondutividade.

Propor a estrutura metodológica.

Mostrar os objetos da aprendizagem que poderão ser utilizados na divulgação científica do tema.

Elaborar projeto de curso de atualização dos elementos mais importantes do fenômeno da supercondutividade para alunos da graduação em licenciatura em Física bem como para professores de Física do ensino médio.

A hipótese considerada para solucionar o problema é:

Se for proposto um sistema de trabalho na qual a divulgação científica da supercondutividade seja mediado pelos objetos da aprendizagem, obtém-se aulas significativas do conteúdo além de contribuir para um conhecimento atual da Física.

## **Tarefas de pesquisa**

- Selecionar, analisar e estudar o referencial bibliográfico que permita estruturar o marco teórico além das metodologias para sua implementação.

- Verificar quais são os objetos da aprendizagem disponíveis na rede para relacioná-los com o tema em questão.

- Analisar os resultados de outras pesquisas relacionadas com o campo de ação.

- Elaborar o plano de ensino para um curso de atualização em supercondutividade sendo o público alvo alunos da licenciatura em Física da Universidade Federal do Amazonas e professores de Física do ensino médio.

- Ministrando curso de atualização.

- Analisar os resultados obtidos na coleta de dados, durante o curso de atualização.

- Apresentar o relatório da pesquisa à academia

O relatório de pesquisa está estruturado em 5 capítulos.

No capítulo II será realizado um estudo sobre a supercondutividade, suas propriedades, características, teorias e dos supercondutores convencionais.

No capítulo III será discutido os supercondutores de alta temperatura, suas teorias.

No capítulo IV será mostrado as aplicações tecnológicas da supercondutividade

No capítulo V são apresentados os fundamentos teóricos acerca dos objetos da aprendizagem, além da metodologia utilizada na pesquisa e no curso de atualização, o qual será analisado a partir dos dados coletados.

## Capítulo 2

# Características dos supercondutores convencionais

Em meados do século XX havia uma disputa entre Heike Karmeligh Onnes e o físico britânico James Dewar para atingir o zero absoluto, usando a liquefação dos gases. Em 1908, H. K. Onnes ganhou a disputa após liquefazer o Hélio líquido, no laboratório de Leiden (na Holanda) possibilitando a realização de experimentos de física à baixas temperaturas. O atual recorde da temperatura é cerca de  $10^{-15}K$  [18], embora termodinamicamente seja impossível de obter o zero absoluto. Mas o objetivo não era apenas alcançar baixas temperaturas, mas também conhecer as propriedades dos materiais, particularmente a condutividade elétrica, em condições criogênicas.

Com o avanço dos estudos da eletricidade em relação à resistência dos condutores surgia uma questão, o que aconteceria com a resistência de um metal imerso no recém-descoberto Hélio líquido?

Os físicos tinham três principais suposições: a primeira é que haveria uma queda contínua da resistência se anulando a zero Kelvin; a segunda é que a condutividade se saturaria a um baixo valor, pois haveria sempre algumas impurezas além dos elétrons se dissiparem; a terceira e mais popular idéia era que os elétrons eventualmente seriam capturados, levando a uma resistência infinita. Mas antes de alguém ter certeza, os

pesquisadores precisariam de uma amostra de metal muito puro. [18]

## 2.1 Resistência elétrica

Em 1911 H. K. Onnes e seu orientando G. Holst ao resfriar uma amostra de mercúrio<sup>5</sup>, usando o hélio líquido, verificou que a  $4,2K$  ( $-268,8^\circ C$ ) sua resistividade elétrica desaparece de forma abrupta e aparentemente por completo, chamando este estado de supercondutividade [1]. Por conseguir obter hélio na forma líquida, impulsionando o desenvolvimento da física a baixas temperaturas, recebeu em 1913 o prêmio Nobel de Física.

A resistência elétrica num material pode ser gerada por pelo menos dois fatores: a primeira são as imperfeições na rede cristalina, causada por impurezas ou lacunas, onde um átomo está ausente na rede e a colisão dos elétrons com essas imperfeições gera uma dissipação de energia. A segunda são as vibrações da rede, pois sabe-se que os íons da rede vibram a uma temperatura maior do que o zero absoluto, esse movimento espalha-se por toda a rede transmitida por fônons [19].

A Figura 2-1 mostra o resultado experimental obtido por Onnes e Holst através da medida da resistência elétrica em função da temperatura do mercúrio, onde pode-se observar que há uma queda brusca da resistência elétrica em  $T_c = 4,2K$  indicando a passagem para o estado supercondutor a essa temperatura de transição denominamos temperatura crítica ( $T_c$ ) [1].

No decorrer do desenvolvimento da dissertação surgiu uma questão, será que realmente a resistência elétrica é nula?

H. K. Onnes e Holst realizaram diversas tentativas para medir a resistência elétrica de um supercondutor, mas esbarrou nas limitações dos métodos experimentais disponíveis.

---

<sup>5</sup>O mercúrio foi um dos metais selecionados por ser mais fácil de obtê-lo com elevado grau de pureza.

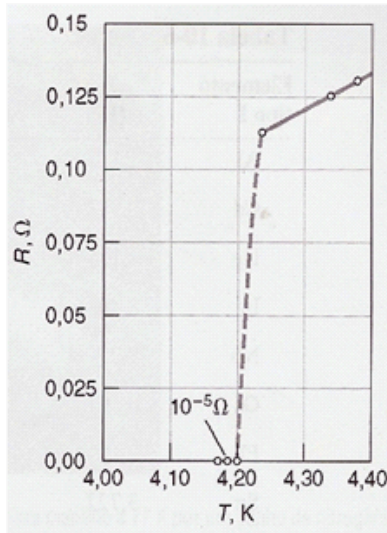


Figura 2-1: Gráfico obtido por K. Onnes para a resistência do mercúrio em função da temperatura. Fonte: Onnes. 1911[1]

Para investigar essa questão, Quinn e Ittner [20] fizeram uma corrente persistente<sup>6</sup> circular num cilindro supercondutor oco com  $L = 1,4 \times 10^{-13} H$ , e como resultado verificaram que a corrente elétrica decaía menos do que 2% em 7 horas e que a resistência elétrica do referido supercondutor deveria ser menor que  $4 \times 10^{-25} \Omega.cm$ , esse valor corresponde aproximadamente  $10^{17}$  vezes menor que a resistência do cobre que é considerado um bom condutor.

No livro de Michael Tinkham [12], há um relato de uma experiência feita usando técnicas de ressonância nuclear para medir o campo magnético produzido por uma corrente persistente, onde se conclui que o tempo característico para o decaimento dessa corrente seria da ordem de  $10^5$  anos.

Portanto, como os valores de resistência elétrica são extremamente pequenos podemos considerar que um supercondutor apresenta resistência nula.

---

<sup>6</sup>uma pequena corrente elétrica que flui naturalmente, de forma incessante ao longo de anéis metálicos, mesmo na ausência de qualquer fonte externa de energia.

## 2.2 Efeito Meissner

Da definição da indução magnética  $B$ , no Sistema Internacional (SI), temos:

$$B = \mu H \tag{2.1}$$

Onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio e  $H$  é a intensidade do campo magnético.

Um material é considerado diamagnético quando  $\mu$  for menor do que a permeabilidade magnética no vácuo ( $\mu_0$ ), ou seja, um material é diamagnético quando a razão  $\mu/\mu_0$  for menor que um. Para um campo  $B = 0$ , temos que  $\mu = 0$ , portanto pode-se concluir que um supercondutor comporta-se como um material diamagnético ideal.

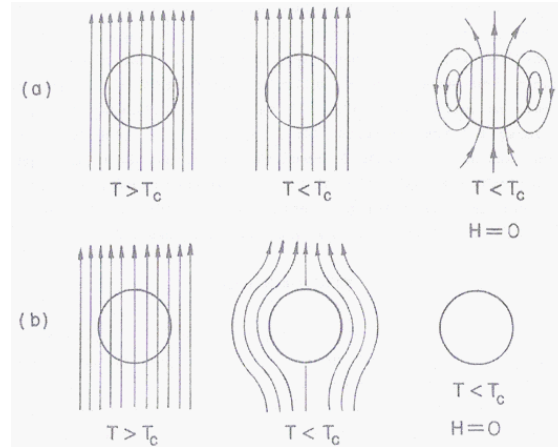
Por muitos anos acreditava-se, que bastava que um material apresentasse resistência nula para ser considerado supercondutor. No entanto, em 1933 os físicos alemães Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram uma característica peculiar e importante do estado supercondutor que ficou conhecido como Efeito Meissner, em homenagem ao seu descobridor [2].

Eles descobriram que a distribuição do campo magnético no interior de um supercondutor era sempre nulo, independente das condições iniciais, ou seja, mesmo que haja um campo magnético aplicado inicialmente a uma amostra. A figura 2.2 (a) mostra que num condutor ideal quando o campo magnético externo é eliminado, surge uma corrente induzida permanente que cria um fluxo magnético interno igual ao fluxo magnético externo. No entanto, quando um supercondutor 2.2 (b) é submetido a um campo magnético externo, se  $T > T_c$ , o material encontra-se num estado condutor normal e consequentemente o fluxo magnético penetra no material, acontece que se  $T < T_c$ , o material se torna supercondutor expulsando o fluxo magnético do seu interior, além disso depois de eliminar o campo externo, não existirá mais nenhuma corrente ou fluxo magnético no material [21].

Logo, um condutor ideal é caracterizado por possuir uma condutividade infinita,



porém não exhibe o efeito Meissner. Em temperaturas próximas a  $0K$  a resistência elétrica é nula, porém ele não sofre transição de fase. Quando se diminui a temperatura de um condutor ideal a resistência vai tendendo a zero suavemente, enquanto que para um supercondutor a resistência elétrica tende à zero bruscamente [14].



(a) Condutor ideal. (b) Uma esfera supercondutora. Fonte: Luiz. 1992 [14]

Para ausência de um campo elétrico, usando as equações de Maxwell, temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (2.2)$$

onde  $\vec{J}$  é a densidade de corrente elétrica e, para  $\vec{B}$  nulo, temos que a densidade de corrente elétrica  $\vec{J}$  é sempre nula no interior de supercondutor maciço. Então, pode-se concluir que só existem correntes superficiais fluindo num supercondutor maciço.

No entanto, uma explicação qualitativa do efeito Meissner foi feita por London e será analisado na seção 2.2.1.

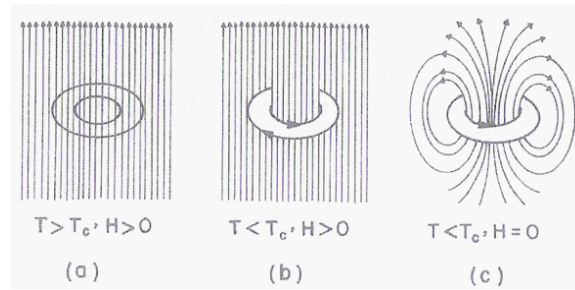


Figura 2-2: Técnica para produzir uma corrente persistente num anel supercondutor. Fonte: Luiz. 1992 [14]

## 2.3 Corrente persistente

A corrente persistente é aquela que permanece em um material mesmo após a eliminação de um campo magnético externo [14], então surge uma pergunta como é possível produzir uma corrente persistente num anel supercondutor?

Uma técnica utilizada para essa finalidade consiste em aplicar um campo magnético externo em um anel supercondutor ainda na fase condutora, ou seja, com temperatura superior a  $T_c$ . Nesse caso, haverá uma penetração do fluxo magnético na parte maciça do anel, porém ao esfriar o mesmo a uma temperatura inferior à  $T_c$ , o anel passa a fase supercondutora. No entanto, como existia fluxo magnético no espaço vazio do buraco do anel, este fluxo deverá continuar a existir, mesmo que se elimine o campo magnético externo, conforme representado na Figura 2-2.

Logo, deve existir uma corrente superficial fluindo na parte externa do anel supercondutor contrária ao sentido da corrente superficial fluindo na parte interna do anel, Figura 2-2 (b), ao se retirar o campo magnético externo,  $H = 0$ , a corrente superficial que estava fluindo na parte externa do anel supercondutor deverá se anular, mas a corrente superficial fluindo na parte interna do anel supercondutor permanece inalterada, conforme Figura.2-2 (c) [14].

Uma consequência importante relacionado à corrente persistente é que ela não dissipa energia sob forma de calor, efeito Joule, se considerarmos resistência nula, nem sob forma

de ondas eletromagnéticas pois o supercondutor está num estado quântico estacionário <sup>7</sup> [14].

## 2.4 Calor Específico

O calor específico é uma das propriedades mais estudadas dos supercondutores. Pois representa uma característica comum a toda a amostra [22].

### 2.4.1 Calor específico acima de $T_c$

Acima da  $T_c$ , o calor específico dos supercondutores de temperatura elevada tende a seguir o modelo descrito por Debye na qual a contribuição do fônon para o calor específico assume que a velocidade do som é isotrópica e independente da frequência e, que a máxima frequência de vibração  $\omega_D$  chamada frequência de Debye está associada com a temperatura de Debye  $\Theta_D$  [23].

O calor específico de um metal normal abaixo da temperatura de Debye  $\Theta_D$  é a soma do termo linear  $C_e = \gamma T$  proveniente dos elétrons de condução e um termo relacionado com a vibração da rede ou fônon  $C_f = AT^3$  [23].

$$C_n = \gamma T + AT^3 \quad (2.3)$$

A maioria dos supercondutores à baixa temperatura, apresenta  $T_c$  abaixo da temperatura de Debye de modo que o termo eletrônico do calor específico é de magnitude apreciável, e por vezes dominantes [22].

### 2.4.2 Descontinuidade sobre $T_c$

O calor específico eletrônico de um supercondutor apresenta uma anomalia em  $T_c$ . Este comportamento constitui-se numa evidência experimental contundente da ocorrência de

---

<sup>7</sup>Num estado estacionário o átomo não emite radiação e sua eletrosfera mantém-se estável.

um fenômeno de transição de fase<sup>8</sup> em  $T_c$ , pois o calor específico é uma propriedade de equilíbrio termodinâmico.

Numa transição de fase de primeira ordem, embora a energia livre de Gibbs  $G$  seja contínua na transição, a derivada  $d(G)/dT$  não é contínua. A ordem  $n$  da derivada  $d^n G/dT^n$  indica a ordem da transição de fase considerada. Por exemplo, se  $d(G)/dT$  for contínua através da transição, mas  $d^2 G/dT^2$  for descontínua dizemos que se trata de uma transição de fase de segunda ordem.

A transição de fase do estado normal para o estado supercondutor na ausência de campo é de segunda ordem, ou seja, tanto a energia livre de Gibbs e sua derivada são contínuas na transição[23]:

$$G_s(T_c) = G_n(T_c) \quad (2.4)$$

$$\frac{dG_s(T_c)}{dT} = \frac{dG_n(T_c)}{dT} \quad (2.5)$$

havendo descontinuidade apenas na derivada segunda da energia livre. Isso significa que não há calor latente envolvido. A Figura 2-3 mostra o comportamento do calor específico, onde pode-se observar que sobre  $T_c$  há um salto do calor específico num material supercondutor.

### 2.4.3 Calor específico abaixo de $T_c$

Num supercondutor, o intervalo proibido ocorre em energias próximas ao nível de Fermi. As excitações de elétrons através do gap dá origem ao comportamento exponencial do calor específico no estado supercondutor em temperaturas bem inferiores a  $T_c$ .

Para  $T \ll T_c$  a teoria BCS prevê uma contribuição para o calor específico dependente exponencial da temperatura.

---

<sup>8</sup>Uma transição de fase ocorre quando há uma singularidade na energia livre ou em uma de suas derivadas e é caracterizada por uma mudança abrupta nas propriedades de uma substância.

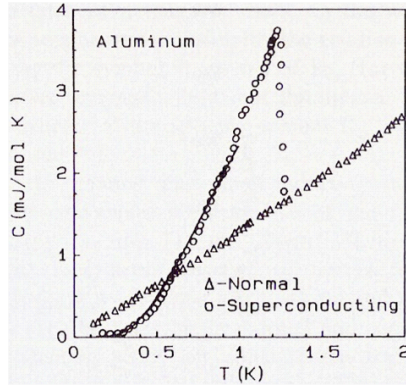


Figura 2-3: Salto do calor específico no supercondutor Al. Fonte: Poole. 2000 [23]

$$C_s \sim a \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right) \quad (2.6)$$

onde  $2\Delta$  é o gap de energia do estado supercondutor [22]. Tanto a experiência quanto a teoria mostram que a largura do gap é dependente da temperatura e se anula em  $T_c$ .

## 2.5 Efeito isotópico

Resultados experimentais indicam que a temperatura crítica dos supercondutores varia com a massa isotópica. Por exemplo, ao se aumentar a massa atômica do mercúrio de 199,5 para 203,4 *u.m.a* a temperatura crítica varia de 4,185 K a 4,146 K, obedecendo à relação [24]

$$T_c = \text{cont.} \times M^{-\alpha} \quad (2.7)$$

Onde o parâmetro  $\alpha$  varia em torno de 0,5. Por exemplo,  $\alpha = 0,45 \pm 0,05$  para o Zn, e  $\alpha = 0,49 \pm 0,02$  para o Pb.

Esse resultado é fundamental para a formulação de uma teoria quântica da supercondutividade, pois mostram a importância dos íons da rede para o fenômeno da supercon-

ductividade.

## 2.6 Campo magnético crítico

A existência de um Efeito Meissner reversível implica que a supercondutividade é destruída para um campo magnético crítico  $H_c$ , que de acordo com a termodinâmica está relacionado com a diferença entre a energia livre de um estado normal e um estado supercondutor a campo nulo e é denominado de energia de condensação do estado supercondutor. Mais precisamente, para a termodinâmica, o campo crítico  $H_c$  é determinado pela equação de energia  $H^2/8\pi$  por unidade de volume, associando a manutenção do campo externo e pressão com a energia de condensação, temos:

$$\frac{H_c^2(T)}{8\pi} = f_n(T) - f_s(T) \quad (2.8)$$

onde  $f_n$  e  $f_s$  são energias livre de Helmholtz por unidade de volume para as respectivas fases e campo nulo. Mostrou-se empiricamente que  $H_c$  tem uma boa aproximação para uma lei parabólica da forma:

$$H_c(T) \approx H_c(0) [1 - (T/T_c)^2] \quad (2.9)$$

Analisando a Figura 2-4, observa-se que a temperatura crítica diminui mediante a aplicação de um campo magnético no material e para valores do campo magnético maior que o campo crítico  $H_c$ , o fenômeno da supercondutividade deixa de existir. Além disso, a transição de fase a campo nulo é de segunda ordem. No entanto, se a transição ocorrer na presença de um campo esta será de primeira ordem apresentando uma transição descontínua no estado termodinâmico e a esse sistema está associado um calor latente [12].

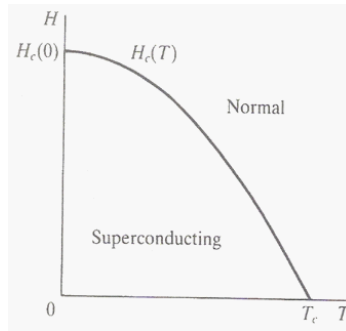


Figura 2-4: Campo crítico em função da temperatura. Fonte: Tinkam. 1975 [12]

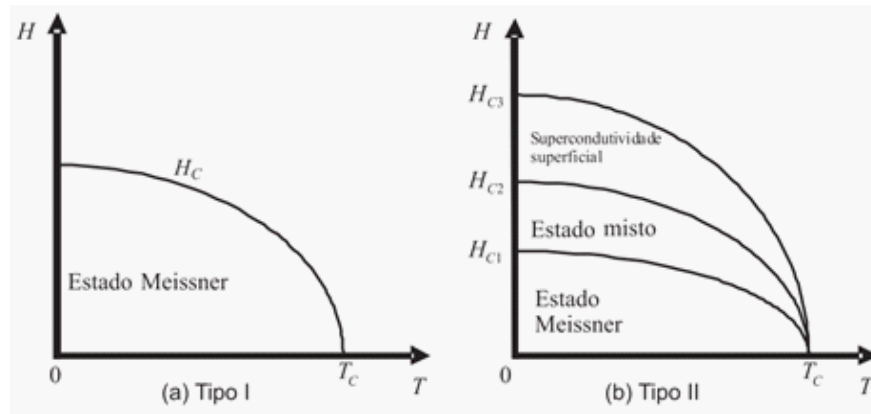


Figura 2-5: Diagrama de fase H-T para supercondutores tipo I e II. Fonte: Costa. 2012 [19]

## 2.7 Classificação dos materiais supercondutores

Dependendo da resposta do material ao campo magnético aplicado podem-se ter dois tipos de supercondutores tipo I e tipo II, conforme ilustrado na Figura 2-5 [19].

### 2.7.1 Supercondutores do tipo I

Para os supercondutores do tipo I quando o material é submetido a um campo magnético inferior ao campo crítico, o fluxo do campo magnético não penetra no interior do

material supercondutor, estado Meissner, e para valores de campo maiores que o campo magnético crítico o material apresenta estado normal. Os materiais que apresentam essa característica são: metais e algumas ligas, que a temperatura ambiente é condutora. Observa-se que a transição para o estado supercondutor acontece aparentemente de maneira brusca, conforme Figura 2-5 (a). Além disso, os campos críticos nos sistemas tipo I são relativamente fracos e, portanto não possuem aplicação técnica útil [25].

## 2.7.2 Supercondutores do tipo II

Os supercondutores do tipo II na presença de um campo magnético apresentam dois tipos de campos críticos, o primeiro é o campo abaixo da qual ocorre o efeito Meissner, com a expulsão total do campo no interior do material  $H_{c1}$ , já entre  $H_{c1}$  e o campo  $H_{c2}$ , há uma penetração parcial do fluxo do campo magnético no interior do material, mas ainda há o estado supercondutor, essas regiões mistas são chamadas de estado de vórtices. No entanto, para valores de campo maiores que  $H_{c2}$ , a supercondutividade é destruída, ou seja, comporta-se como um material normal, conforme verificamos na Figura 2-5 (b). A maior parte destes materiais são ligas metálicas ou metais que no estado normal apresentam resistividade relativamente alta [19].

Os materiais supercondutores do tipo II representam a maioria dos supercondutores e são os mais utilizados pelas indústrias. Ao se aplicar um campo magnético entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ , nota-se a presença de um estado misto onde parte do fluxo do campo magnético penetra no material, porém as propriedades dos supercondutores permanecem inalteradas. Essa região fica dividida em duas partes: uma normal e outra supercondutora - a normal é formada por finos filamentos que atravessam a amostra, por onde passa o fluxo do campo magnético.

Os filamentos formados no estado misto possuem uma estrutura cilíndrica orientada paralelamente à linha de indução magnética, o diâmetro desse filamento é comparado à de um par de Cooper (entre 10 e 100 nm), e em sua volta circulam supercorrentes que blindam o campo magnético em regiões afastadas da casca cilíndrica, conforme Figura



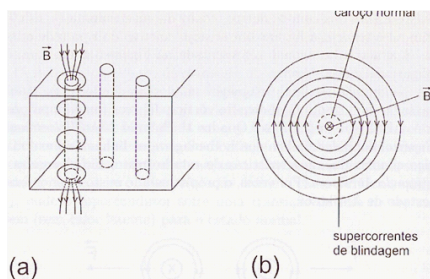


Figura 2-6: Estrutura de um vórtice de Abrikosov. Fonte: Ostermann. 2005 [25]

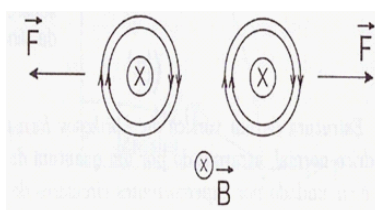


Figura 2-7: Interação entre dois vórtices. Fonte: Ostermann. 2005 [25]

2-6. Essa estrutura é conhecida como vórtices em analogia ao escoamento de fluidos turbulentos. Portanto, cada vórtice é uma estrutura quântica que se manifesta em escala macroscópica [25].

Cada vórtice citado acima é quantizado, ou seja, é atravessado por um quantum de fluxo magnético e entre os vórtices existe uma força de repulsão que se deve às correntes de blindagem, que são antiparalelas na região entre os vórtices conforme esquematizado na Figura 2-7.

A grande maioria das configurações dos vórtices é em forma de uma rede hexagonal, pois representa o menor gasto de energia, Figura 2-8.

Em 1957 A. Abrikosov propôs que o fluxo magnético atravessa um material através de um arranjo periódico de vórtices, por isso as linhas de fluxo magnético quantizada é conhecida como vórtice de Abrikosov [26].

Se aumentarmos o campo magnético na amostra supercondutora do tipo II cresce o número de vórtices e conseqüentemente a distância entre os vórtices na rede torna-se

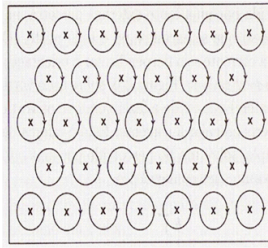


Figura 2-8: Rede hexagonal de vórtices de Abrikosov no estado misto. Fonte: Ostermann. 2005 [25]

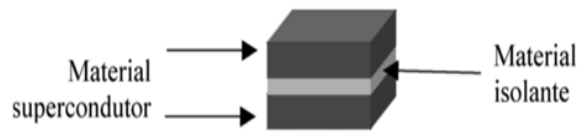


Figura 2-9: Exemplo de junção Josephson. Fonte: Costa 2012 [19]

menor até o limite de  $H_{c2}$ , onde ocorre a transição de fase para o estado normal [25].

## 2.8 Junções Josephson

Em 1962 Brian Josephson propôs uma teoria em que dois supercondutores separados por uma fina camada de material isolante, formavam uma junção, conhecida como junção Josephson [6], ver Figura 2-9, de acordo com essa junção os pares de Cooper podem passar de um supercondutor para outro, por essa descoberta Josephson ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1973 [27].

Ligando a junção Josephson a uma fonte de corrente, sem aplicar-lhe uma diferença de potencial na junção, verifica-se que para dois supercondutores separados por uma distância menor que  $10\overset{0}{\text{Å}}$  uma corrente contínua de pares de Cooper atravessa o dispositivo sem nenhuma resistência, dada pela equação:

$$i = i_0 \text{sen}(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.10)$$

Para haver tunelamento dos pares de Cooper é necessário que a corrente externa não ultrapasse o limite  $i_0$ . Este efeito é conhecido como efeito Josephson DC [25].

Porém, se além da corrente externa for aplicado uma diferença de potencial à junção será criada uma corrente alternada que obedece a relação:

$$i = i_0 \text{sen}\left(\Delta\theta - \frac{2eVt}{\hbar}\right) \quad (2.11)$$

Onde  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$  e  $V$  é a diferença de potencial aplicada. E a corrente criada oscilará com frequência  $f = 2eV/h$ , esse efeito é conhecido como efeito Josephson AC [25].

Então, observa-se que o efeito Josephson é aplicado para vários tipos de dispositivos eletrônicos, tanto para geração quanto para a detecção de oscilações eletromagnéticas e também pode ser utilizada para medir com precisão a constante fundamental  $\phi_0 = h/2e$ .

No próximo capítulo será estudado as principais teorias utilizadas para entender os supercondutores convencionais.

## 2.9 Teorias da Supercondutividade

### 2.9.1 Teoria de London

As primeiras teorias desenvolvidas com intuito de explicar o fenômeno da supercondutividade foram de natureza fenomenológica. Em 1935 os irmãos F. London e H. London ao explicar o efeito Meissner basearam-se no modelo de dois fluidos, no qual supõe que para  $T < T_c$ , apenas uma fração dos elétrons de condução se encontra no estado de supercondução. Segundo esta teoria alguns elétrons, no material, comportam-se de maneira normal, enquanto outros exibem comportamento “anômalo” (os superelétrons).

A densidade de superelétrons  $n_s(T)$  é zero quando  $T$  se eleva para  $T_c$ , ou seja,  $n_s(T_c) = 0$  e se aproxima da densidade eletrônica total  $n$  quando  $T$  cai muito abaixo de  $T_c$  e, para  $T = 0$ , temos  $n_s(0) = n$ . O restante dos elétrons  $n - n_s$  permanecerá praticamente inerte [3].

Portanto segundo essa teoria nos materiais supercondutores alguns elétrons se comportam de maneira normal, elétrons livres, enquanto outros, os superelétrons, não são espalhados nem por impurezas ou vibrações da rede, portanto não contribui com resistividade [28].

Como nos superelétrons não há nenhuma força contrária ao deslocamento dos portadores de corrente, ao se aplicar um campo elétrico em um supercondutor os superelétrons serão acelerados com velocidade média  $v_s$  que de acordo com segunda lei de Newton é dada por:

$$m \left( \frac{d\vec{v}_s}{dt} \right) = e\vec{E} \quad (2.12)$$

Se há  $n_s$  superelétrons por unidade de volume, movendo-se com velocidade  $v_s$ , então podemos escrever a densidade de corrente da seguinte forma:

$$\vec{J}_s = ne\vec{v}_s \quad (2.13)$$

Derivando a equação 2.13, temos:

$$\frac{d}{dt} \vec{J}_s = n_s e \frac{d}{dt} \vec{v}_s \quad (2.14)$$

Usando a equação 2.12, temos:

$$\frac{d}{dt} \vec{J}_s = \frac{n_s e^2}{m} \vec{E} \quad (2.15)$$

que é conhecida como 1ª equação de London, que explica a propriedade da resistência nula nos supercondutores, pois só há campo elétrico se houver variação da densidade

corrente [13].

Aplicando o rotacional nos dois lados da equação 2.15, e utilizando a lei de Faraday, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \vec{\nabla} \times \vec{J}_s + \frac{n_s e^2}{m} \vec{B} \right] = 0 \quad (2.16)$$

No caso dos materiais supercondutores, em que a corrente de blindagem surge independente de uma variação temporal do campo aplicado (Efeito Meissner), admite-se que a equação possa ser escrita da forma [29].

$$\vec{\nabla} \times \vec{J}_s + \frac{n_s e^2}{m} \vec{B} = 0 \quad (2.17)$$

que é a 2ª equação de London. Usando a lei de Ampère, desconsiderando as correntes de deslocamento, temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} + (\mu_0 n_s e^2 / m) \vec{B} = 0 \quad (2.18)$$

usando a identidade vetorial  $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{\nabla}^2 \vec{B} + \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B})$  e como não há monopolo magnético, temos  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ , portanto:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{\nabla}^2 \vec{B} \quad (2.19)$$

Substituindo 2.19 em 2.18, temos:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{B} \quad (2.20)$$

onde  $\lambda_L$  é conhecido como comprimento de penetração de London, medindo o quanto o campo magnético penetra no interior do material supercondutor e é dado por:

$$\lambda_L = \left( \frac{m}{\mu_0 n_s e^2} \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

Para um caso unidimensional, temos:

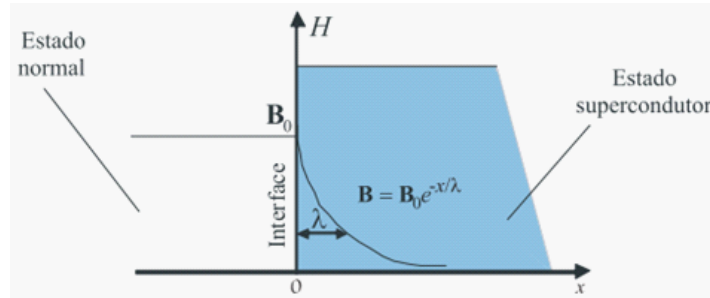


Figura 2-10: Penetração do fluxo magnético no interior de um supercondutor. Fonte: Costa. 2012 [19]

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \vec{B} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{B} \quad (2.22)$$

que possui solução do tipo:

$$B = B_0 e^{-x/\lambda_L} \quad (2.23)$$

Essa resultado leva diretamente ao efeito Meissner, pois a 2ª equação de London indica que o campo tende à zero no interior da amostra [28], conforme representado Figura 2-10.

## 2.9.2 Teoria de Ginsburg Landau

Com intuito de explicar as propriedades termodinâmicas da transição do estado normal para o estado supercondutor, em 1950 os russos Vitaly Lazarevich Ginzburg e Lev Davidovich Landau formularam também uma teoria fenomenológica, só que agora usando fundamentos da mecânica quântica para descrever o efeito do campo magnético.

Partindo da hipótese de que os supercondutores contêm uma densidade de super-elétrons  $n_s$  e densidade de elétrons normais  $n - n_s$ , e que o comportamento dos super-elétrons é descrito por um parâmetro de ordem <sup>9</sup> ou função de onda quântica  $\psi(\vec{r})$  que

---

<sup>9</sup>Todo sistema físico, que apresenta transições de fase, pode ser caracterizado por um parâmetro de ordem.

descreve o centro de massa dos superelétrons num supercondutor. Acima da  $T_c$  a função de onda  $\psi(\vec{r})$  se anula e abaixo da  $T_c$  a função de onda  $\psi(\vec{r}) \neq 0$  [4], ou seja:

$$\begin{aligned}\psi &= 0 \text{ se } T > T_c \\ \psi &\neq 0 \text{ se } T < T_c\end{aligned}\tag{2.24}$$

A função de onda  $\psi(\vec{r})$  restringe-se a fenômenos que não alteram significativamente as distâncias entre os elétrons e o centro de massa, então podemos escrever a densidade de corrente supercondutora através da expressão quântica [29]:

$$\vec{J} = -\frac{iQ\hbar}{2m} [\psi^* \nabla \psi - (\nabla \psi^*) \psi] - \frac{Q^2}{m} \vec{A} |\psi|^2\tag{2.25}$$

onde  $Q = -2e$  é a carga de um par de Cooper,  $m = 2m_e$  é a massa de um par de Cooper e  $\vec{A}$  é um possível potencial vetor magnético agindo sobre o supercondutor.

Considerando  $\psi(\vec{r}) = |\psi(\vec{r})| e^{i\phi}$ , temos:

$$\begin{aligned}\nabla \psi &= \nabla (|\psi| e^{i\phi}) \\ \nabla \psi &= i |\psi| e^{i\phi} \nabla(\phi)\end{aligned}\tag{2.26}$$

Analogamente:

$$\begin{aligned}\nabla \psi^* &= \nabla (|\psi| e^{-i\phi}) \\ \nabla \psi^* &= -i |\psi| e^{-i\phi} \nabla(\phi) \\ \nabla \psi^* &= -i \psi^* \nabla(\phi)\end{aligned}\tag{2.27}$$

Substituindo na equação 2.25, temos:

$$\begin{aligned}
\vec{J} &= \frac{-2ei\hbar}{4m_e} [\psi^* i\psi \nabla\phi + i\psi^* \nabla\phi\psi] - \frac{(-2e)^2}{2m_e} \vec{A} |\psi|^2 \\
\vec{J} &= \frac{-e\hbar}{2m_e} [|\psi|^2 \nabla\phi + |\psi|^2 \nabla\phi] - \frac{2e^2}{m_e} \vec{A} |\psi|^2 \\
\vec{J} &= \frac{-e\hbar}{m_e} |\psi|^2 \nabla\phi - \frac{2e^2}{m_e} \vec{A} |\psi|^2 \\
\vec{J} &= - \left[ \frac{e\hbar}{m_e} \nabla\phi - \frac{2e^2}{m_e} \vec{A} \right] |\psi|^2
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Aplicando o rotacional, temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{J} = - \left[ \frac{e\hbar}{m_e} \vec{\nabla} \times (\nabla\phi) - \frac{2e^2}{m_e} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] |\psi|^2 \tag{2.29}$$

Sabendo que  $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$  e que  $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla}\phi) = 0$ , obtemos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{J} = - \frac{2|\psi|^2 e^2}{m_e} \vec{B} \tag{2.30}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{J} + \frac{2|\psi|^2 e^2}{m_e} \vec{B} = 0 \tag{2.31}$$

Pode-se interpretar  $|\psi|^2$  como sendo o número de pares de Cooper por unidade de volume, o número de elétrons por unidade de volume será  $2|\psi|^2$ , resultando na 2ª equação de London.

Portanto, a teoria de Ginsburg-Landau permite deduzir a restrição de London através da suposição de um parâmetro de ordem que descreve um dos pares de Cooper do material supercondutor [29].

Além disso, a teoria de Ginsburg-Landau sugere outra grandeza relacionada com a supercondutividade o comprimento de coerência  $\xi$ . Minimizando a energia livre a campo nulo em relação ao parâmetro de ordem, chega-se a uma expressão unidimensional o que



leva à definição de  $\xi$  [13].

$$\xi^2(T) = \frac{\hbar^2}{2m |\alpha|} \quad (2.32)$$

O comprimento de coerência<sup>10</sup> é uma medida da distância ao longo da qual a concentração de elétrons no interior de um supercondutor não pode mudar bruscamente na presença de um campo magnético não uniforme. Da relação entre o comprimento de coerência e o de penetração surge o parâmetro de Ginsburg-Landau, dado por  $\kappa = \lambda/\xi$ , o qual permite a classificação dos supercondutores do tipo I ( $\kappa < 1/\sqrt{2}$ ) e tipo II ( $\kappa > 1/\sqrt{2}$ ) [4].

### 2.9.3 Teoria BCS

Diante de novos fenômenos da supercondutividade, cientistas observaram que o modelo fenomenológico usado para explicar a supercondutividade deixava várias questões sem resposta. No entanto, apenas em 1957, 46 anos após a descoberta da supercondutividade, é que surgiu uma teoria microscópica (quântica) da supercondutividade, formulada pelos norte-americanos John Bardeen, Leon Cooper, John Schrieffer, que recebeu o nome de teoria BCS devido às iniciais dos sobrenomes dos seus descobridores, o que lhes rendeu em 1972 o prêmio Nobel de Física [5].

Em uma rede cristalina a interação elétron-íons cria uma deformação local na estrutura periódica, conforme a Figura 2-11, quando o elétron se propaga pelo cristal a deformação o acompanha, resultando em um acúmulo de cargas positivas que acaba por atrair outro elétron. Assim, dois elétrons podem se atrair via deformação local, intermediada por um fônon associado à deformação da rede - esse fônon cria uma espécie de estado ligado entre dois elétrons que se chama par de Cooper [5]. Uma vez que a velocidade do elétron é muito maior que a do fônon, há um atraso na deformação da

---

<sup>10</sup>É também uma medida da espessura mínima da camada de transição entre um material normal e um supercondutor.

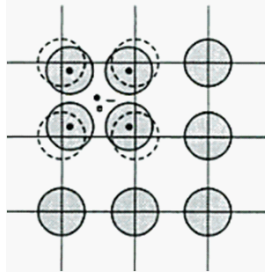


Figura 2-11: Diagrama esquemático mostrando a polarização da rede por um elétron. Fonte: Oliveira. 2005 [24]

propagação em relação ao elétron tornando-os correlacionados a grande distância, da ordem de  $1000\text{\AA}$  para supercondutores do tipo I, que é uma distância maior que o alcance da interação repulsiva coulombiana e comparável ao comprimento de coerência a  $T = 0$ , para a Teoria de Ginsburg-Landau [24].

A possibilidade dos elétrons formarem pares ligados segundo Cooper é provável pela influência dos  $N - 2$  elétrons remanescentes nos pares de interações pelo princípio da exclusão de Pauli. Ele considerou que a interação atrativa é fraca demais se dois elétrons estiverem isolados. No entanto, em uma esfera de Fermi de elétrons adicionais, devido ao princípio da exclusão, um estado ligado é formado mesmo se a atração for fraca. Além disso, seus cálculos mostraram o quanto a temperatura de transição de supercondução poderia ser tão baixa em comparação a outras dos sólidos. Esse resultado se aplica a um único par de elétrons na presença de uma distribuição de Fermi normal de elétrons adicionais [28].

Segundo a teoria BCS o par de Cooper é formado com maior probabilidade entre elétrons em estados com vetores de onda e spins opostos, e para um estado  $(k \uparrow, -k \downarrow)$ , a função de onda do par é expressa por:

$$\psi(r_1 - r_2) = \frac{1}{L^3} \sum_k g(k) e^{i[k \cdot (r_1 - r_2)]} \quad (2.33)$$

onde  $|g(k)|^2$  representa a probabilidade de o par ser encontrado no estado  $(k \uparrow, -k \downarrow)$ .

Usando o conhecido hamiltoniano de pares ou hamiltoniano reduzido:

$$H = \sum_{k\sigma} \epsilon_k n_{k\sigma} + \sum_{kl} V_{kl} c_{k\uparrow}^* c_{-k\downarrow}^* c_{-l\downarrow} c_{l\uparrow} \quad (2.34)$$

A notação  $c_{k\uparrow}^*$  fornece os operadores de criação de um elétron com momento  $k$  e spin up, e  $c_{k\uparrow}$  é o correspondente operador aniquilação,  $|u_k|^2$  é a probabilidade do par  $(k \uparrow, -k \downarrow)$  estar desocupado e  $|\nu_k|^2$  é a probabilidade do par estar ocupado. Admitindo que 2.34 contenha os termos decisivos da supercondutividade [12]. O ajuste da média do número de partículas  $\bar{N}$  inclui o termo  $-\mu N_{op}$ , onde  $\mu$  é o potencial químico (ou energia de Fermi,  $E_F$ ) e  $N_{op}$  é o operador número de partículas. Minimizando o valor esperado da soma definido:

$$\delta \langle \psi_G | H - \mu N_{op} | \psi_G \rangle = 0 \quad (2.35)$$

A inclusão do termo  $-\mu N_{op}$  é equivalente matematicamente a escrever zero a energia cinética para  $\mu$  (ou  $E_F$ ).

$$\delta \left\langle \psi_G \left| \sum_k \xi_k n_{k\sigma} + \sum_{kl} V_{kl} c_{k\uparrow}^* c_{-kl}^* c_{-l\downarrow} c_{l\uparrow} \right| \psi_G \right\rangle = 0 \quad (2.36)$$

onde:

$$\sum_{k\sigma} \epsilon_k n_{k\sigma} - \mu N_{op} = \sum_{k\sigma} (\epsilon_k - \mu) n_{k\sigma} = \sum_k \xi_k n_{k\sigma} \quad (2.37)$$

onde,  $\xi_k = \epsilon_k - \mu$  é a energia de uma simples partícula relativa a energia de Fermi.

Da condição de normalização temos:  $|u_k|^2 + |v_k|^2 = 1$  e por simplicidade considera-se  $u_k$  e  $v_k$  real. Então combinando o termo  $\langle KE - \mu N \rangle = 2 \sum_k \xi_k |\nu_k|^2$  com o termo de interação  $\langle V \rangle = \sum_{kl} V_{kl} u_k v_k^* u_l^* v_l$ , resulta:

$$\langle \psi_G | H - \mu N_{op} | \psi_G \rangle = 2 \sum_k \xi_k |\nu_k|^2 + \sum_{kl} V_{kl} u_k v_k u_l v_l \quad (2.38)$$

A restrição é convenientemente imposta de tal forma que:  $u_k = \sin \theta_k$  e  $v_k = \cos \theta_k$ . Então, usando as identidades trigonométricas na parte direita da equação 2.38, pode-se escrever:

$$\sum_k \xi_k (1 + \cos \theta_k) + \frac{1}{4} \sum_{kl} V_{kl} \sin 2\theta_k \sin 2\theta_l \quad (2.39)$$

derivando em relação a  $\theta_k$ .

$$\frac{\partial}{\partial \theta_k} \langle \psi_G | H - \mu N_{op} | \psi_G \rangle = 0 \quad (2.40)$$

$$-2\xi_k \sin 2\theta_k + \sum_l V_{kl} \sin 2\theta_k \sin 2\theta_l = 0 \quad (2.41)$$

$$\tan 2\theta_k = \frac{\sum_l V_{kl} \sin 2\theta_l}{2\xi_k} \quad (2.42)$$

Então, pode-se definir a quantidade:

$$\Delta_k = -\sum_l V_{kl} u_l v_l = -\frac{1}{2} \sum_l V_{kl} \sin 2\theta_l \quad (2.43)$$

e

$$E_k = (\Delta_k^2 + \xi_k^2)^{1/2} \quad (2.44)$$

então, pode-se escrever:

$$\tan 2\theta_k = -\frac{\Delta_k}{\xi_k} \quad (2.45)$$

$$2u_k v_k = \sin 2\theta_k = \frac{\Delta_k}{E_k} \quad (2.46)$$

e

$$v_k^2 - u_k^2 = \cos 2\theta_k = -\frac{\xi_k}{E_k} \quad (2.47)$$

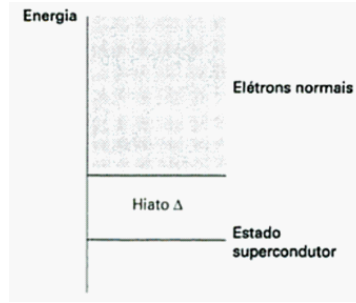


Figura 2-12: Diagrama de energia de um supercondutor BCS. Fonte: Oliveira. 2005 [24]

Substituindo 2.46 em 2.43, tem-se:

$$\Delta_k = -\frac{1}{2} \sum_l \frac{\Delta_l}{E_l} V_{kl} = -\frac{1}{2} \sum_l \frac{\Delta_l}{(\Delta_l^2 + \xi_l^2)^{1/2}} V_{kl} \quad (2.48)$$

Além disso, a teoria mostra que no estado fundamental todos os pares de Cooper ocupam o mesmo estado de energia e que o primeiro estado excitado acima do estado fundamental se encontra a uma distância (em energia), representado por  $2\Delta$ , e corresponde ao estado de elétrons independentes [24], ver Figura 2-12. Quanto menor a temperatura, maior o gap, sendo máximo a zero Kelvin, pois não há vibrações da rede devido a flutuações térmicas. Quando dois elétrons estiverem ligados formando um par de Cooper a interação com outros átomos da rede só será possível se a energia trocada for igual ou maior que a energia do gap. Mesmo que o par de Cooper se choque com átomos da rede, não haverá troca de energia entre eles. Só poderá haver troca de energia se o gap for vencido [19].

Um importante resultado obtido pelo cálculo variacional sobre  $\psi_{BCS}$  mostra que a faixa espacial  $\xi_0$  do par da função de onda é muito grande em relação ao espaçamento entre elétrons  $r_s$ . Portanto, em uma região ocupada por determinado par serão encontrados os centros de milhões de pares, o que contribui para uma correlação no movimento de todos os pares, podendo-se dizer que os efeitos quânticos do gás de Fermi representam os efeitos quânticos numa escala macroscópica [24]. Um gás de Fermi é um sistema de

partículas idênticas não interagentes sujeitas ao princípio da exclusão de Pauli. O estado coletivo pode ser entendido como um gás de Fermi “condensado” em uma “macromolécula” que inclui um sistema de supercondutividade inteiro. O que implica dizer que a macromolécula permanece no estado supercondutor mesmo que o gap de energia seja superado [30].

O estado supercondutor representa uma fase assim como o sólido, líquido e gasoso. Em uma transição de fase, o estado supercondutor torna-se mais favorável correspondendo ao estado de menor energia. Por outro lado, quando um material supercondutor é aquecido o calor serve para quebrar um par de Cooper antes de aumentar a temperatura do material. O que explica o “salto” no calor específico quando a amostra passa do estado supercondutor para o estado normal [30].

Segundo a teoria BCS o salto do calor específico eletrônico do estado normal  $C_e = \gamma T$  para o estado supercondutor  $C_s$  é dado por [23]

$$\frac{C_s - \gamma T_c}{\gamma T_c} = 1.43 \quad (2.49)$$

Na aproximação dos elétrons livres o coeficiente do calor específico eletrônico  $\gamma$  depende da temperatura de Fermi  $T_F$  e da constante do gás  $R$  através da expressão [23]:

$$\gamma = \frac{\pi^2 R}{2T_F} \quad (2.50)$$

E abaixo de  $T_c$ , a teoria BCS prevê um calor específico  $C_s(T)$  dependente exponencialmente do inverso da temperatura:

$$C_s(T) \sim a \exp(-\Delta/k_B T) \quad (2.51)$$

onde  $\Delta = 1.76k_B T$  e  $a$  é uma constante.

Além disso, é importante observar que o estado variacional não contém um número fixo de partículas, uma vez que somente as probabilidades do estado de ocupação é especificada, representando uma limitação do formalismo. Embora Leggett [31], por

exemplo, tenha indicado que as amostras supercondutoras são geralmente percorridas por correntes, assim o número de elétrons nele contido é verdadeiramente variável.

## Capítulo 3

# Supercondutores de alta temperatura crítica

Até 1986 o supercondutor com maior  $T_c$  era o  $Nb_3Ge$  com  $T_c = 23,2 K$ , além disso, a comunidade científica acreditava que  $T_c$  poderia subir no máximo dois graus. Durante 56 anos o nióbio e seus componentes eram os principais responsáveis pela supercondutividade, podendo chamar o período de 1930 e 1986 como Era dos Supercondutores de Nióbio.

Em 1986, K. A. Muller e J. G. Bednorz, em Zurique na Suíça, anunciaram à comunidade científica a descoberta de um composto contendo lantânio, bário, cobre e oxigênio, ( $La - Ba - Cu - O$ ) com temperatura crítica de  $35K$  [7], mas a princípio eles não se preocuparam em verificar a ocorrência do efeito Meissner, o que mais tarde foi verificada em laboratório. A partir da publicação desse artigo de Bednorz e Muller, inicia-se um novo período com o peróxido de cobre, pois a presença de cobre e oxigênio tem sido essencial, com raras exceções para  $T_c$  maior que  $40 K$  [32].

Em 1987, um ano depois da descoberta de Muller e Bednorz, Paul Chu da Universidade Houston, em colaboração com MagKang Wu da Universidade do Alabama [8] descobriram um composto simples e de baixo custo de fabricação, o  $YBCO$  ou  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , que possuía temperatura crítica de  $92K$ , valor acima da barreira tecnológica devido à



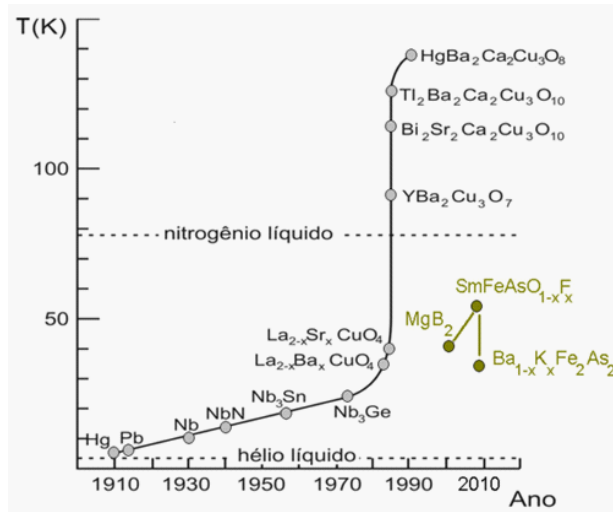


Figura 3-1: A evolução cronológica do recorde de temperatura crítica dos materiais supercondutores. Fonte: Ostermann. 2005 [25]

temperatura de ebulição do nitrogênio líquido ( $77K$ ). Nessa estrutura pode-se trocar o  $Y$  (Ítrio) por muitos elementos terra-raras  $La$ ,  $Nd$ ,  $Sm$ ,  $Eu$ ,  $Gd$ ,  $Ho$ ,  $Er$  e  $Lu$ , obtém-se também alta  $T_c$ . O aumento da pressão nos cupratos à base de  $La$  aumenta a  $T_c$ , e, portanto, seria razoável supor que átomos de terra-raras, com pequeno raio iônico, pudessem exercer pressão química desejada na rede dos cupratos [30].

O desvendamento dos supercondutores de alta temperatura crítica causou um otimismo na comunidade científica que depois descobriu um sistema  $BSCCO$  (óxido de bismuto, estrôncio, cálcio e cobre.) [33] a  $T_c = 110K$ , um sistema  $TBCCO$  (óxido de tálio, bário, cálcio e cobre) [34] a  $T_c = 125K$ , um sistema  $Hg - 1223$  com  $T_c = 133K$  e sob pressão o sistema  $Hg - 1223$  atinge  $T_c = 164K$ , metade da temperatura ambiente [35]. Na Figura 3-1 temos um diagrama que mostra a evolução da  $T_c$  desde a descoberta da supercondutividade em 1911.

## 3.1 Materiais supercondutores de alta temperatura crítica

Desde 1986, foram descobertos aproximadamente 100 tipos diferentes de cupratos. A Tabela abaixo mostra alguns cupratos supercondutores com a sua respectiva temperatura crítica.

Tabela 1 Materias supercondutores de alta temperatura crítica

Material	Abreviação	$T_c(K)$
$La_{1.85}Sr_{0.18}CuO_4$	<i>LSCO</i>	40
$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$	<i>YBCO</i> ; <i>YBCO</i> – 123; <i>Y</i> – 123	92
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	<i>BSCCO</i> ; <i>BSCCO</i> – 2223; <i>Bi</i> – 2223	110
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	<i>TBCCO</i> ; <i>TBCCO</i> – 2223; <i>Tl</i> – 2223	122
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	<i>HBCCO</i> ; <i>HBCCO</i> – 1223; <i>Hg</i> – 1223	133

Fonte: Ghosh. 1999 [30]

Nos supercondutores de alta temperatura crítica não é observado o efeito isotópico, indicando que os fônons não estariam envolvidos no mecanismo de emparelhamento desses materiais e, quase todos os materiais supercondutores de alta  $T_c$  apresentam um ponto em comum que é a presença de planos de  $Cu$  e  $O$  separados por outros materiais. No composto *LSCO* cada plano de  $CuO$  está separado de seu vizinho próximo por  $\approx 6,6 \text{ \AA}$ , que é uma distância relativamente grande para cristais. Além disso entre os dois planos vizinhos de  $CuO$  existem dois planos de  $La - O$  [30].

## 3.2 Estrutura do YBCO

O composto *YBCO* apresenta uma estrutura cristalográfica formada por um empilhamento de três células unitárias com o átomo de ítrio no centro da célula central e o de bário no centro das células mais externas. Os átomos de cobre situam-se em dois sítios

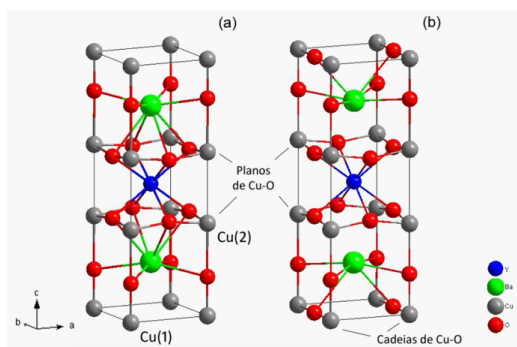


Figura 3-2: Estrutura Cristalográfica do *YBCO*. Fonte: Motta. 2009 [38]

distintos, separados pelo plano de bário-oxigênio. Em um dos lados, situa-se a posição planar  $Cu(2)$  que forma o plano de  $Cu - O$  presente na maioria dos outros supercondutores de alta temperatura crítica e entre os dois planos de  $Cu - O$  encontra-se o átomo de Ítrio ( $Y$ ). Além disso, observa-se que no lado oposto ao plano  $Ba - O$  encontra-se o sítio  $Cu(1)$  que, dependendo da estequiometria de oxigênio, pode ter coordenação linear "dois" ou "quatro", conforme Figura 3-2 (a) e (b) respectivamente [36].

### 3.3 Efeitos da dopagem nos supercondutores de alta temperatura crítica

Muitos cupratos permitem a substituição de átomos no composto, estes são conhecidos como materiais dopados. Por exemplo, a substituição de  $Sr$  bivalente por  $La$  no isolante antiferromagnético  $La_2CuO$  produz supercondutividade no  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  com  $T_c \approx 40 K$  em  $x = 0,17$ . Outro exemplo é a substituição de  $Ce$  por  $Nd$  no composto  $Nd_2CuO_4$  resulta no  $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-\delta}$ .

Dependendo da quantidade de oxigênio presente no material pode-se ter distintas coordenações dos átomos do sítio  $Cu(1)$ . Na fase do *YBCO*, a estequiometria do oxigênio pode variar de 6,0 a 7,0, sendo representado por  $7 - \delta$ . Se  $0,7 < \delta < 0$ , o material apresenta estrutura ortorrômbica (parâmetro de rede  $a \neq b$ ). Para uma faixa de 0,7 a

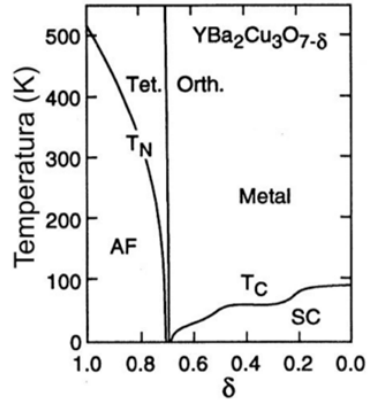


Figura 3-3: Diagrama de fases do conforme a estequiometria de oxigênio. Fonte: Motta. 2009 [38]

1,0 a coordenação de  $Cu(1)$  apresenta vacância de oxigênio ao longo de  $b$ , resultando numa estrutura tetragonal ( $a = b$ ). Portanto, dependendo da variação estequiometria de oxigênio ( $\delta$ ) pode-se ter uma transição de fase cristalográfica, além de fazer variar os valores da temperatura crítica do material, conforme Figura 3-3 [37].

### 3.4 Propriedades dos cupratos

Os cupratos apresentam uma forte anisotropia, pois o campo magnético e a densidade de corrente crítica são bastante diferentes em relação ao plano  $a, b$  e a direção  $c$ . Nos materiais policristalinos a medida está relacionada à média das propriedades, pois os grãos estão orientados aleatoriamente. Essa anisotropia está relacionada com a ausência de elétrons na última camada do cobre, conhecido como mecanismo de lacunas. A flutuação da valência do cobre faz com que essa lacuna se movimente mais facilmente dentro do mesmo plano de  $Cu - O$ , por apresentar distância menor que entre os outros planos de  $Cu - O$  [38].

Os supercondutores de alta temperatura crítica apresentam uma temperatura crítica maior do que  $30K$ , valor máximo previsto pela teoria BCS [23], e também apresenta um comprimento de coerência  $\xi_0$  muito pequeno em comparação com os supercondutores

usuais descritos pela teoria BCS. Enquanto que num supercondutor convencional a  $T_c \sim 10K$  o comprimento de coerência é da ordem de  $\xi_0 \sim 5000\text{\AA}$ , nos supercondutores de alta temperatura crítica é observado que  $\xi_0 \sim 10\text{\AA}$ . Por isso, esses materiais do tipo II apresentam alto campo críticos e estão em um regime intermediário entre grandes pares de Cooper tipo BCS e o limite onde os férmions envolvidos estão fortemente ligados podendo ocasionar um condensado de Bose-Einstein, desses bósons efetivos. Surgindo então o interesse em estudar a evolução do condensado de Bose-Einstein, analisando as mudanças que ocorrem no sistema à medida que a interação entre os férmions passam do limite de acoplamentos fracos para acoplamentos fortes. Portanto, é necessário uma nova teoria ou uma adaptação na teoria BCS que englobe também os supercondutores de alta temperatura crítica.

### 3.5 Prováveis teorias microscópicas

Os novos supercondutores obedecem a mesma fenomenologia geral como os supercondutores clássicos, porém o estado normal dos novos supercondutores ainda não tem sido satisfatoriamente entendido, havendo controvérsias sobre o hamiltoniano microscópico apropriado, o mecanismo de emparelhamento e ainda sobre o parâmetro de gap [39]. Além da teoria fenomenológica de Ginsburg-Landau e a teoria microscópica BCS, outras abordagens têm sido usadas com intuito de explicar a presença da supercondutividade em algumas classes de compostos, assim como algumas propriedades individuais [22].

Muitas das mais interessantes propriedades dos materiais, tais como: ordenação magnética e supercondutividade requerem teorias que vão além da aproximação de elétrons independentes. Para entender estes fenômenos é necessário levar em consideração a correlação de elétrons. As configurações eletrônicas de diversos átomos que ocorrem comumente nos supercondutores de alta temperatura crítica são representadas através da notação  $nl^N$ , onde  $n$  é o número quântico principal, o número quântico orbital  $l$  é 0 para um estado  $s$ , 1 para um estado  $p$ , 2 para um estado  $d$ , e  $N$  é o número de elétrons para

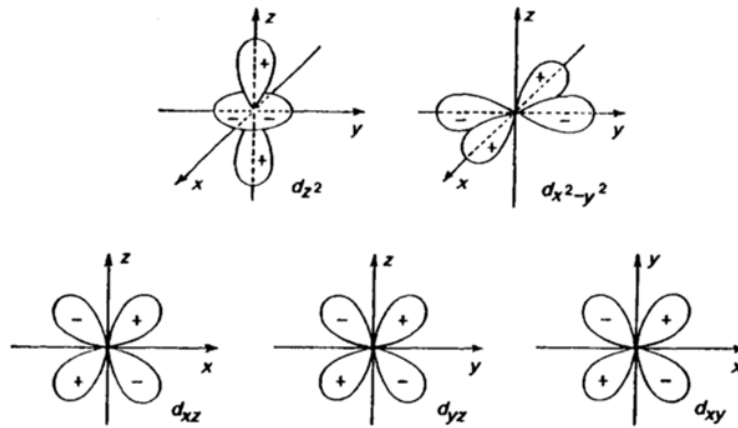


Figura 3-4: Distribuição espacial da densidade do elétron para os cinco orbitais  $d$ . Fonte: Poole. 2007 [23]

cada estado  $l$ . Um estado  $l$  completo contém  $2(2l + 1)$  elétrons, correspondendo a 2, 6 e 10, para o estado  $s$ ,  $p$  e  $d$ , respectivamente. O íon  $Cu^{2+}(3d^9)$  pode ser observado numa estrutura completa  $d(3d^{10})$  mais um buraco ( $3d$ ), e nos cupratos esse buraco é um orbital  $d_{x^2-y^2}$  nos planos dos cupratos  $CuO_2$ . As várias funções de ondas  $s$ ,  $p$  e  $d$  são também chamadas orbitais. A distribuição eletrônica dos orbitais  $d$  é esboçado na Figura 3-4, o sinal de cada “lobe” representa o sinal da função de onda. A Figura 3-5 representa um esboço dos planos de  $CuO_2$  para supercondutores de alta temperatura crítica e também mostra o sigma ( $\sigma$ ) entre a ligação do oxigênio orbital  $p_x$  e  $p_y$  e orbitais de pares  $d_{x^2-y^2}$  entre os planos de cupratos  $CuO_2$ .

### 3.5.1 Crossover da BCS para BEC

Alguns cientistas defendem o uso da teoria BCS para explicar os novos supercondutores devido à descrição da teoria BCS para os elétrons no estado de supercondução e valor do gap de energia relacionado à  $T_c$ . Os novos materiais além de possuírem altas  $T_c$ , apresentam um pequeno  $\xi$ , sugerindo que a fase supercondutora pode ser entendida como um regime intermediário entre o limite do grande overlap dos pares de Cooper e a con-

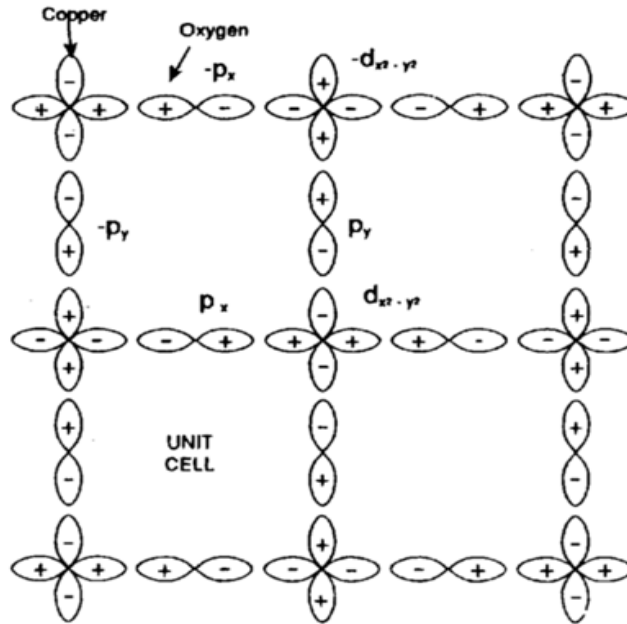


Figura 3-5: Orbitais usados para o modelo de três estados de planos Cu-O. Fonte: Poole, 2007 [23]

densação de bósons<sup>11</sup> que consiste de pares de férmions fortemente ligados [40]. Legget [31] enfatizou a importância do problema de crossover da supercondutividade BCS para a condensação de Bose. Ele demonstrou que a equação de Schroedinger para moléculas diatômicas são os dois limites do mesmo sistema. O problema do crossover tem sido estudado pela variação do potencial: onde o acoplamento fraco indica o regime BCS e a região de Bose pode ser atacada pelo acréscimo da força do acoplamento.

A estrutura de muitos cupratos são similares à camadas bidimensionais de portadores sugerindo o uso de modelos bidimensionais. No entanto, existem também evidências de supercondutores tridimensionais como nos compostos de metais alcalinos fulleride. Algumas propriedades dos supercondutores de alta  $T_c$  podem ser explicadas pela equação BCS de onda  $d$  para o acoplamento médio [30].

<sup>11</sup>O Condensado de Bose-Einstein é uma fase da matéria formada por bósons a uma temperatura muito próxima do zero absoluto. Nestas condições, uma grande fração de átomos atinge o mais baixo estado quântico, e nestas condições os efeitos quânticos podem ser observados à escala macroscópica.

### 3.5.2 Modelo de Hubbard

O modelo mais simples de elétrons correlacionados é o modelo de estado único de Hubbard (1963,1964). No modelo de Hubbard há um elétron no orbital por célula unitária. Para construir o modelo começa-se com elétrons localizados no estado atômico com posições  $R$  dos átomos, o qual assumimos que há apenas um orbital de valência por átomos e cada átomo pode acomodar 0, 1 ou 2 elétrons [22].

O Hamiltoniano consiste de um termo de energia cinética proporcional a um “salto na amplitude” para  $t > 0$  que representa uma correlação de elétrons; um termo  $-\mu\hat{N}$ , onde  $\mu$  é o potencial químico e  $\hat{N}$  é o número total de elétrons; e um termo de repulsão Coulombiana,  $U > 0$ . Assim temos:

$$H = -t \sum_{R,R',\sigma} [a_{\sigma}^{\dagger}(R)a_{\sigma}(R') + a_{\sigma}^{\dagger}(R')a_{\sigma}(R)] - \mu \sum_{R,\sigma} a_{\sigma}^{\dagger}(R)a_{\sigma}(R) + U \sum_{R} n_{+}(R)n_{-}(R) \quad (3.1)$$

O potencial químico  $\mu$  leva em consideração mudanças no número de elétrons. O salto na amplitude  $t$  pode ser escrito na forma integral,  $t = \frac{\hbar^2}{2m} \int d^3r \nabla W^*(r - R) \cdot \nabla W(r - R')$  que é a medida da contribuição do salto do elétron de um sítio para outro sítio vizinho. Este hamiltoniano exibe uma simetria elétron-buraco, tal simetria é considerada importante porque muitos supercondutores de alta temperatura crítica são tipos buraco com cerca da metade da banda de condução [23].



# Capítulo 4

## Aplicações tecnológicas da supercondutividade

As pesquisas em supercondutividade tem se tornado um dos campos mais intensos em pesquisas físicas, principalmente no que diz respeito às aplicações tecnológicas. Neste tópico serão apresentados alguns tipos de aplicações da supercondutividade.

### 4.1 Aplicações em pequena escala

As aplicações dos supercondutores em pequena escala em geral estão relacionadas à construções de dispositivos para circuitos eletrônicos, porém sua aplicação industrial ainda é escassa, pois alguns fatores ainda dificultam sua utilização como: dificuldade de reprodução, pouca confiabilidade, os altos custos na produção das ligas supercondutoras, a complexidade das técnicas de resfriamento entre outros.

#### 4.1.1 SQUIDS

Essa sigla são as iniciais de “Superconducting Quantum Interference Device”, ou seja, dispositivo supercondutor de interferência quântica. Esse equipamento eletrônico é

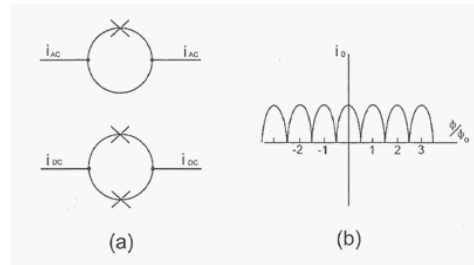


Figura 4-1: (a) SQUID RF e DC. (b) Modulação da corrente elétrica num SQUID DC. Fonte: Ostermann. 2005 [25]

constituído de um anel supercondutor conectado a um circuito elétrico, conforme Figura 4-1.

Ao percorrer o anel supercondutor a corrente cria um fluxo magnético, que atravessará a área delimitada do anel, e quando é aplicado um campo magnético externo a corrente denominada crítica é modulada com período equivalente a um quantum de fluxo magnético [25].

O dispositivo SQUID é utilizado principalmente para detectar a presença de pequenos campos magnéticos e sua aplicação inclui dispositivos lógicos ultra-rápidos, ressonância nuclear magnética (RNM), computação quântica entre outros.

Na medicina o SQUID pode ser usado em equipamentos eletrônicos para detectar os campos magnéticos gerados pela corrente elétrica durante a atividade elétrica cerebral, ver Figura 4-2, ou até mesmo usados para detectar atividades patológicas do coração [25].

Essa técnica permite localizar regiões funcionais do córtex cerebral, camada mais externa do cérebro, com uma resolução parcial superior a da eletroencefalografia e também avalia a integridade das vias de transmissões dos sinais. Com relação às aplicações clínicas, se destacam a localização funcional pré-cirúrgica e a localização da atividade epilética [41].

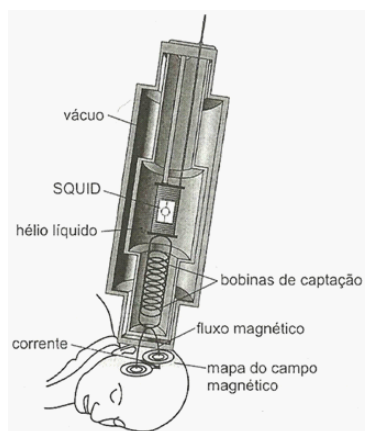


Figura 4-2: Representação esquemática de magnetoencefalografia usando detectores SQUID. Fonte: Ostermann. 2005 [25]

### 4.1.2 Aplicações na eletrônica

A eletrônica convencional (com semicondutores e ferromagnéticos) já atingiu um nível bastante satisfatório de sofisticação. No entanto, certos problemas especiais só podem ser resolvidos com o uso de um SQUID ou de junções Josephson. O acoplamento entre um circuito com supercondutores e um circuito com semicondutores nem sempre é possível, principalmente por causa da incompatibilidade térmica entre estes dois tipos de materiais e também pelo acoplamento de impedâncias que é um fator que limita as possibilidades da utilização mista de circuitos com semicondutores e circuitos com supercondutores. No entanto, para diversas aplicações especiais da chamada Microeletrônica é conveniente usar supercondutores, ainda que pagando o preço da liquefação do hélio ou do nitrogênio [41].

### 4.1.3 Aplicações na computação

Uma das possíveis aplicações mais importantes da eletrônica supercondutora é para o projeto de um supercomputador digital com velocidade das operações elementares muito maior que os computadores convencionais. Esse projeto se justifica pelo fato de que

em muitas áreas são necessárias uma grande velocidade do processamento eletrônico do computador como na Física Nuclear e na Biofísica (que necessitam de um grande número de cálculos na solução numérica das equações envolvidas nestas pesquisas) [14].

Os atuais computadores permitem realizar, em média, cerca de 1 milhão de operações elementares por segundo, um computador digital supercondutor, segundo Matisso [42], poderia executar cerca de 1 bilhão de operações elementares por segundo. Isso seria possível mediante a utilização de chaves com junções Josephson, além de outros dispositivos supercondutores como: fios, conectores e “chips” com interconexões feitas com películas supercondutoras.

## 4.2 Aplicações em Grande Escala

Nas aplicações em grande escala destacam-se: os fios supercondutores de alta temperatura crítica e os eletroímãs magnéticos, entre outros.

### 4.2.1 Fios supercondutores de alta temperatura crítica

A conformação dos cupratos supercondutores é feita mediante a técnica PIT, *powder in tube*, o processo é feito reduzindo o material a pó e embutindo o mesmo num tubo metálico que será extrusado <sup>12</sup> na forma de um fio. Em seguida a amostra passa por um processo de recozimento em alta temperatura. Porém devido à ligações fracas entre os grãos e a aleatoriedade orientacional degradam a corrente crítica, tornando os cupratos supercondutores pouco atraentes para as aplicações tecnológicas [25].

O composto  $MgB_2$  tem sido o mais promissor com relação às aplicações tecnológicas, pois os efeitos da granularidade não diminuem tanto a densidade de correntes elétrica. Além desse, ainda hoje são usados os fios supercondutores de  $Nb_3Sn$ ,  $NbZr$  e  $NbTi$  nos

---

<sup>12</sup>Passagem forçada de um metal ou de um plástico através dum orifício, visando a conseguir uma forma alongada ou filamentosa

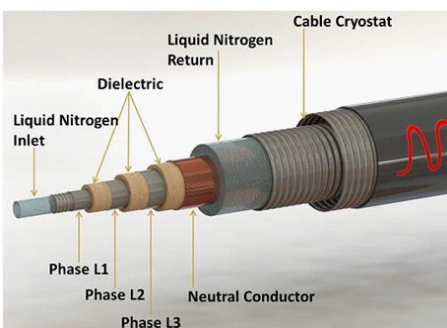


Figura 4-3: Estrutura do maior cabo supercondutor. Fonte: <nexans.com.br>

equipamentos de ressonância magnética de laboratório de pesquisa e de hospitais entre outros [43].

O maior cabo supercondutor do mundo está prestes a ser instalado na Alemanha unindo duas subestações da cidade de Essen. O cabo supercondutor terá  $1\text{km}$  de extensão e foi projetado para uma capacidade de transmissão de  $40\text{MW}$  e será formado por seções concêntricas operando a  $10\text{kV}$ , conforme Figura 4-3. Esta instalação também será a primeira a usar um sistema de proteção contra sobrecargas com um limitador de corrente. Os custos do projeto e da pesquisa são de aproximadamente de 13,5 milhões de Euros.

Embora necessite de um resfriamento a  $-200^{\circ}\text{C}$ , toda essa malha de distribuição de energia de alta eficiência exige muito menos espaço do que as redes elétricas atuais, o que é importante em áreas densamente ocupadas, como as regiões centrais das grandes cidades. Além disso, a possibilidade de falhas e a necessidade de manutenção, segundo os engenheiros alemães, são muito menores <sup>13</sup>.

Segundo os engenheiros responsáveis pelo projeto essa é uma solução mais barata do que usar cabos de cobre de média tensão, pois o menor custo do cobre é cancelado pela queda ôhmica na rede, que é muito maior. Para a mesma espessura, o cabo supercondutor transfere 100 vezes mais energia do que o cobre, virtualmente sem perda de energia.

<sup>13</sup>Disponível em: <<http://nexans.com.br>> Acesso em: 02 de Abril 2012



Figura 4-4: Imagem por ressonância nuclear magnética. Fonte: <epilepsia-cirurgia.com.br>

### 4.2.2 Os eletroímãs supercondutores

A fabricação de um forte eletroímã supercondutor foi uma das primeiras aplicações da supercondutividade imaginadas por H.K. Onnes. No entanto, como os primeiros supercondutores descobertos foram do tipo I apresentando pequeno  $H_c$  e  $J_c$ , os fortes eletroímãs supercondutores só começaram a ser produzidos a partir de 1930 com a descoberta dos supercondutores do tipo II [14].

Esse tipo de equipamento é usado na geração de campos magnéticos extremamente elevados, podendo chegar a mais de  $20T$ . Sua aplicação está principalmente ligada ao sistema de imagem por ressonância nuclear magnética (RNM).

#### Imagem por ressonância magnética

Esse método de diagnóstico consiste em colocar a pessoa em um campo magnético e realizar exames de imagem de alta complexidade que podem mostrar detalhes não vistos nos exames de radiologia geral, ver Figura 4-4. A RNM detecta a localização dos núcleos de hidrogênio em diferentes tecidos do corpo humano usando campos magnéticos com valores entre  $0,5T$  a  $2T$  <sup>14</sup>.

Um dos tratamentos que utilizam o RNM é o tratamento cirúrgico das epilepsias parciais, visto que é de extrema importância a localização exata da área do cérebro

---

<sup>14</sup>Disponível em: <[http:// epilepsia-cirurgia.com.br](http://epilepsia-cirurgia.com.br)> Acesso em: 10 de outubro 2011



Figura 4-5: Ressonância nuclear magnética pré-operatória. Fonte: <portaldaradiologia.com>

afetada para que se retire o foco epileptico sem afetar outras áreas, a Figura 4-5 mostra a imagem da ressonância nuclear magnética para auxiliar a remoção do foco epileptico <sup>15</sup>.

Além disso, os avanços continuam segundo uma pesquisa realizada na Universidade de Columbia, em Nova York, a imagem por ressonância magnética pode ajudar no futuro a diagnosticar casos de autismo. Além de diagnosticar doenças, as imagens por ressonância magnética podem até determinar as futuras ações de uma pessoa segundo uma pesquisa feita na Universidade de Western Ontario, no Canadá e publicada no periódico especializado *Journal of Neuroscience* <sup>16</sup>.

### 4.2.3 Levitação magnética

Por volta dos anos 60 Gordon T. Danby e James R.Powell do Laboratório Nacional de Brookhaven mostraram à comunidade científica bobinas supercondutoras que poderiam ser usadas na produção de campo magnético afim de levantar trens. No entanto, apenas dez anos depois começaram a ser produzidos os primeiros protótipos de trens maglev, *magnetic levitacion*, na Alemanha e no Japão, e como o projeto já estava bastante avançado tornou-se inviável para aquele momento utilizar os materiais supercondutores.

<sup>15</sup>Disponível em: <<http://portaldaradiologia.com>> Acesso em: 10 de outubro 2011

<sup>16</sup>Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/>> Acesso em: 10 de outubro 2011

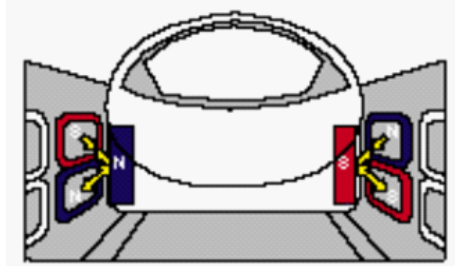


Figura 4-6: Princípio da levitação magnética. Fonte: < tansportes.ime.eb.br>

Atualmente existem quatro tipos de levitação magnética: por repulsão magnética, atração magnética, indução magnética e a supercondutora.

### **Levitação por repulsão magnética**

Para seu funcionamento utiliza-se bobinas supercondutoras em formato de "8" que são instaladas nas laterais dos corredores, conforme a Figura 4-6. Quando as bobinas ou ímãs supercondutores encontra-se com velocidade elevada, dentro da bobina é induzida uma corrente elétrica que passa a agir como um eletroímã criando uma força que empurrará o ímã supercondutor para cima e com o auxílio da força gerada pela configuração 8 da bobina causará a levitação do trem MAGLEV <sup>17</sup>.

Com objetivo de manter o trem MAGLEV movimentando-se no centro do trilho, são instaladas bobinas nas laterais do corredor que ao serem conectadas formam uma espécie de loop, como mostra a Figura 4-7. Quando o trem em movimento se aproximar de um dos lados do corredor, cria-se uma corrente elétrica através do loop e, conseqüentemente uma força de repulsão na bobina de levitação. No outro lado do corredor haverá o processo inverso, ou seja, uma força de atração na bobina de levitação.

---

<sup>17</sup>Disponível em: <<http://www.tansportes.ime.eb.br>> Acesso em: 05 de Julho 2011



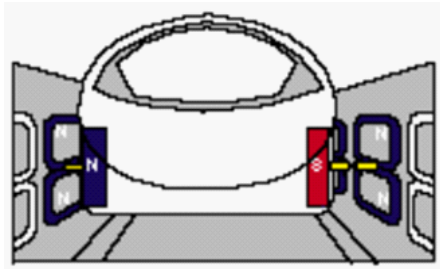


Figura 4-7: Princípio da orientação lateral. Fonte: <[tansportes.ime.eb.br](http://tansportes.ime.eb.br)>

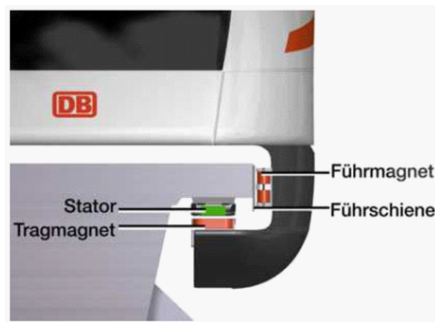


Figura 4-8: Suporte de sustentação do trem. Fonte: <[tansportes.ime.eb.br](http://tansportes.ime.eb.br)>

### **Levitação por atração magnética**

Nesse sistema são utilizados potentes eletroímãs, os quais são instalados no trem por um suporte encurvado para baixo do trilho e também em barras ferromagnéticas localizadas abaixo das guias do trilho, ver Figura 4-8. Esses eletroímãs sofrerão atração magnética, fazendo com que o trem levite. Além disso, outros eletroímãs são instalados lateralmente para manter o trem em movimentando no centro dos trilhos <sup>18</sup>.

### **Levitação por indução magnética**

O funcionamento baseia-se na utilização de potentes ímãs permanentes colocados abaixo de cada vagão em uma configuração chamada de cadeia de Halbach. Essa con-

<sup>18</sup>Disponível em: <<http://www.tansportes.ime.eb.br>> Acesso em: 05 de Julho 2011

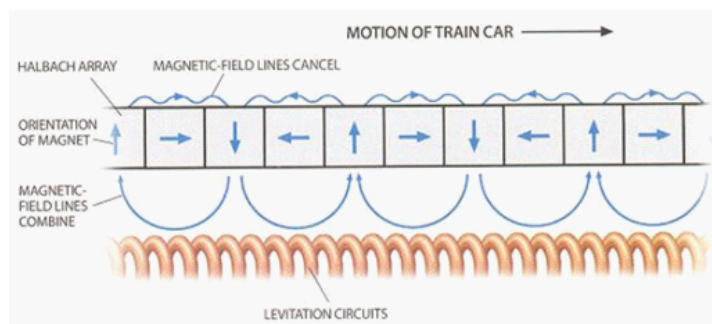


Figura 4-9: Esquema da cadeia de Halbach. Fonte: <tansportes.ime.eb.br>

figuração faz com que o campo magnético abaixo do veículo seja intenso e acima nulo, conforme Figura 4-9. Para que o trem levite - são instaladas abaixo do trem bobinas isoladas entre si afim de que seja induzida nessas bobinas corrente elétrica que por sua vez criará um campo magnético de sentido contrário ao induzido, aparecendo então uma força de repulsão fazendo o trem levantar <sup>19</sup>.

### Levitação Supercondutora

Este tipo de levitação só pode ser devidamente explorado a partir do final do século XX com o advento de novos materiais magnéticos e pastilhas supercondutoras de alta temperatura crítica, como o *YBCO*. Nesta ocasião, os projetos japonês e alemão mencionados anteriormente estavam muito avançados para serem redirecionados. Os novos supercondutores de alta temperatura crítica podem ser resfriados com nitrogênio líquido (cuja temperatura de ebulição é de  $77K$ ) o que tornava o custo da refrigeração muito oneroso. Por se tratar da tecnologia mais recente, ainda não existe linha de teste em escala real. No Brasil, construíram-se linhas em modelo reduzido - o protótipo brasileiro possui formato oval com 30 metros de extensão e guia linear formada por ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro (*NdFeB*) compondo o circuito magnético (interagindo

<sup>19</sup>Disponível em: <<http://www.tansportes.ime.eb.br>> Acesso em: 05 de Julho 2011

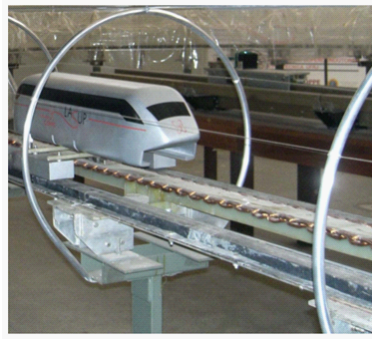


Figura 4-10: Linha de 30 m em escala reduzida. Fonte: <maglevcobra.com.br>

com os supercondutores) para levitação (Figura 4-10) <sup>20</sup>.

1. Em termos gerais, podemos dizer que o sistema Maglev Cobra é baseado em inovações em três campos fundamentais para uma composição ferroviária:
  - Inovações tecnológicas: sistema de levitação magnético supercondutor;
  - Inovações técnicas: sistema leve permite redução nos custos de engenharia e arquitetura;
  - Inovações em design: revolucionário sistema de trem modular, multiarticulado, permite curvas mais fechadas e foi planejado para a realidade brasileira, usando as medidas corporais dos brasileiros.

As Figuras 4-11 e 4-12 demonstram as possibilidades deste conceito, com o veículo sendo formado por vários anéis interligados através de juntas flexíveis, como se fossem as articulações de uma serpente, daí a sua denominação: Maglev-Cobra.

A capacidade de cada trem cresce com a adição de anéis, ajustando-se à demanda. Módulos que contêm as portas podem ser montados em diversas disposições ao longo do veículo, pois cada anel representa uma estrutura independente, assim como o posicionamento dos bancos: transversal ou longitudinal.

---

<sup>20</sup>Disponível em: <<http://maglevcobra.com.br>> Acesso em: 05 de janeiro 2012



Figura 4-11: Maglev-Cobra com capacidade de 240 passageiros. Fonte: < [maglevcobra.com.br](http://maglevcobra.com.br)>



Figura 4-12: Anéis do Maglev-Cobra com bancos no sentido transversal. Fonte: < [maglevcobra.com.br](http://maglevcobra.com.br)>

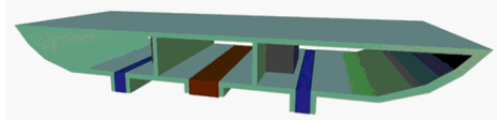


Figura 4-13: Base de Levitação do Maglev-Cobra. Fonte: <maglevcobra.com.br>

O componente fundamental do veículo é a “base de levitação”, onde se apoiam os módulos de passageiros e estão situados os criostatos (em azul), mostrado na Figura 4-13, no interior dos quais se encontram os supercondutores, refrigerados com nitrogênio em estado líquido ( $-196^{\circ}C$ ). Na parte central encontram-se as bobinas que são alimentadas com energia elétrica e permite a movimentação do veículo através de um motor linear instalado na via.

# Capítulo 5

## Pressupostos Teóricos

### 5.1 Objeto da aprendizagem

O avanço da informática tem ocasionado mudança em diversos setores da sociedade e em particular na Educação. Onde pode-se destacar os materiais didáticos de apoio à aprendizagem, que recebem o nome de Objetos da aprendizagem (OA). Wiley [44] define os OA como sendo qualquer fonte digital que pode ser reutilizada para a aprendizagem, através dessa definição pode-se incluir imagens, fotos, clips de vídeos, animações, páginas na web e etc. Outra definição é dada por Nash [45], o qual diz que os OA são como blocos de informação que estão à disposição do professor para que este os conecte da maneira que achar mais eficiente.

Entre os OA mais utilizados estão as simulações computacionais de experimentos de física que apresentam inúmeras vantagens entre elas tornar possível alterar diversos parâmetros do experimento além de poder ser repetido várias vezes e por fim permitir visualização dos conceitos abstratos da física através das representações presentes nas simulações. Segundo Arantes [15] as simulações possuem grande utilidade como organizadores prévios no contexto da teoria da aprendizagem significativa, ver Apêndice A.

Apesar da importância da simulação esta não substitui a realização de atividades experimentais reais, servindo apenas como uma ferramenta para facilitar a aprendizagem.

Segundo Dorneles [46], quando os alunos trabalham inicialmente com o computador se mostram mais capazes para integrar teoria e experimento.

No entanto, a utilização dos OA requer um planejamento, organização e conhecimento de diferentes modelos pedagógicos [44]. Arantes [15] cita as características que um OA deve apresentar:

- Acessibilidade: facilmente acessível via internet;
- Atualizável: através do uso de metadados (literalmente “dados de dados”) torna-se fácil fazer atualizações;
- Interoperabilidade: capacidade de operar através de uma variedade de hardware, sistemas operacionais e buscadores;
- Granularidade: quanto mais granular for um OA maior será o seu grau de reutilização;
- Adaptabilidade: adaptável a qualquer ambiente de ensino;
- Flexibilidade: material criado para ser utilizado em múltiplos contextos, não sendo necessário ser reescrito para cada novo contexto;
- Reutilização/reusabilidade: várias vezes reutilizáveis em diversos ambientes de aprendizagem;
- Durabilidade: possibilidade de continuar a ser usado por longo período e, na medida do possível, independente da mudança da tecnologia.

No processo de produção dos OA Arantes [15] sugere que deve ser criada uma equipe multidisciplinar, na qual alunos e professores especialistas em áreas de conhecimentos trabalhem colaborativamente com pedagogos, professores de informática, programadores e web designers.

Para facilitar a disseminação dos objetos da aprendizagem foram criados repositórios que colocam a disposição do usuário na web, recursos educacionais podendo ser usados em qualquer modalidade de ensino. Além disso, organiza os OA em um mesmo endereço eletrônico, a fim de aperfeiçoar o processo de busca. Os principais repositórios são o

MERLOT, *Multimedia Educational Resource for Learning and Online Teaching* <sup>21</sup>, na área de física, é bem conhecido o PhET – sigla em inglês para Tecnologia Educacional em Física <sup>22</sup>, criado pela equipe de Carl Wieman, ganhador do Prêmio Nobel de Física de 2001, o portal compadre <sup>23</sup>, que disponibiliza os materiais digitais de excelentes e uso gratuito, a partir de diversas fontes confiáveis, e também o BIOE – *Banco Internacional de Objetos Educacionais* <sup>24</sup> que disponibiliza áudio, vídeo, animações e simulação relevantes e adequadas à realidade da comunidade educacional. Para criar meios que facilitem o acesso aos recursos digitais o MEC – *Ministério da Educação* criou em 2008 o portal do professor <sup>25</sup>.

## 5.2 Modelo teórico da pesquisa

Com intuito de estruturar em forma de sistema a pesquisa, elaborou-se um modelo teórico dividido em quatro níveis de estudo o que permite uma visão mais holística dos elementos a ter em conta para o seu desenvolvimento.

- No primeiro nível define-se o problema científico que será resolvido através da investigação científica.

- O segundo nível começa com a situação atual, ou seja, contexto em que está se desenvolvendo a pesquisa, seguido das justificativas do trabalho e do objetivo geral.

- Em um terceiro nível tem-se os objetivos específicos, objetos de investigação e os passos para se desenvolver a pesquisa, ou seja, as tarefas da pesquisa.

- E no quarto nível tem-se as aplicações e resultados.

A estrutura do modelo teórico inicia com o problema da pesquisa que versa sobre como os objetos da aprendizagem podem estimular ou auxiliar o entendimento ou a

---

<sup>21</sup>Disponível em: <<http://www.merlot.org>> Acesso em: 20 de janeiro 2012

<sup>22</sup>Disponível em: <[http://phet.colorado.edu/pt\\_BR](http://phet.colorado.edu/pt_BR)> Acesso em: 20 de janeiro 2012

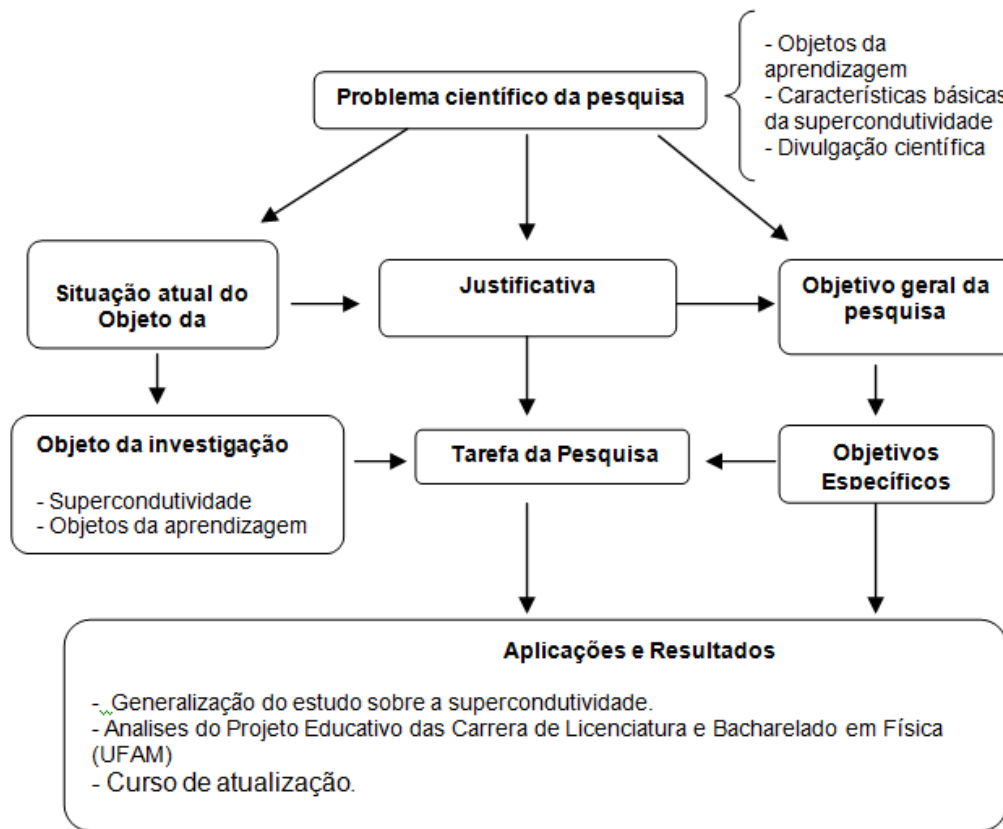
<sup>23</sup>Disponível em: <<http://www.comprade.org>> Acesso em: 20 de janeiro 2012

<sup>24</sup>Disponível em: <<http://objetoseducaionais2.mec.gov.br>> Acesso em: 21 de janeiro 2012

<sup>25</sup>Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br>> Acesso em: 21 de janeiro 2012



Figura 5-1: Estrutura da pesquisa desenvolvida pelo autor da dissertação.



divulgação científica da supercondutividade. Haja vista, que o ensino vigente ainda é tradicional e pouco utiliza as Tecnologias de Informação de Comunicação (TICs) como ferramentas de apoio à divulgação científica. Além disso, há desconhecimento do tema pela comunidade científica. A pesquisa nessa área de conhecimento se justifica pela utilização das TICs no cotidiano dos estudantes, por ser um tema atual da Física e, possuir inúmeras aplicações, além da necessidade de atualização docente. O objetivo geral é desenvolver um sistema de trabalho com auxílio das novas TICs que favoreça a divulgação científica da supercondutividade. Além de possibilitar o desenvolvimento de aulas dinâmicas e potencialmente motivadoras. Para isso, têm-se os objetivos específicos, estudar os 100 anos da supercondutividade, em seguida propor a estrutura metodológica, mostrar os objetos da aprendizagem disponíveis na rede, além de elaborar o projeto do curso de atualização. O objeto de investigação da pesquisa é a supercondutividade e os objetos da aprendizagem. As tarefas da pesquisa são: estruturar o referencial teórico e metodológico, verificar os OA disponíveis na rede. Em seguida, elaborar o plano de ensino para o curso de atualização, ministrar o curso, coletar e analisar os dados dos participantes e apresentar o relatório à academia. As aplicações e resultados são: o estudo sobre os 100 anos da supercondutividade, à análise do Projeto Educativo das Carreiras de Licenciatura e Bacharelado em Física (UFAM) seguido do curso de atualização.

### **5.2.1 Métodos e Técnicas da Pesquisa**

A pesquisa utilizada na elaboração do trabalho é a qualitativa, pois entende-se que a mesma pode fornecer uma descrição da complexidade de uma determinada situação, compreender e classificar processos dinâmicos e experimentos por diferentes grupos sociais, apresentar contribuições no processo de mudança de determinado grupo e permitir, em maior e menor grau de aprofundamento as particularidades dos comportamentos ou atitudes dos indivíduos [47].

A vantagem de se utilizar a pesquisa qualitativa no trabalho é que possibilita incorporar o que os participantes dizem de suas experiências, atitudes, crenças, pensamentos

e reflexões, expressa por eles mesmos. Além disso, a pesquisa qualitativa torna-se viável, pois apresenta como característica peculiar a diversidade metodológica, permitindo extrair dados da realidade a fim de ser contrastado a partir do método.

O autor desse trabalho concorda com que a escolha desse tipo de pesquisa também se fundamenta pelo fato de que o imaginário do sujeito não pode ser quantificado, pois seu universo de significados, motivos, aspirações, crenças, valores e atitudes correspondem a um espaço mais profundo de relações dos processos e dos fenômenos que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis [48].

Segundo Taylor e Bogdam [49], as principais características da pesquisa qualitativa, são:

- A pesquisa qualitativa é indutiva - possibilita aos pesquisadores seguirem um desenho de pesquisa flexível.
- Permite ao pesquisador vê o cenário e as pessoas a partir de uma perspectiva holística. Nesse sentido, estuda as pessoas no contexto de seu passado e das situações nas que se acham.
- Na pesquisa qualitativa os pesquisadores são sensíveis aos efeitos que eles mesmos causam sobre as pessoas que são objetos de seus estudos. Portanto interatuam com os informantes de um modo natural e não intrusivo.
- Possibilita aos pesquisadores conhecerem as pessoas dentro do marco de referência delas mesmas.
- Na pesquisa qualitativa o pesquisador suspende ou afasta suas próprias crenças, perspectivas e predisposições, vê as coisas como se estivessem ocorrendo pela primeira vez.
- Os pesquisadores qualitativos vêem todas as perspectivas valiosas, ou seja, procura um entendimento detalhado das perspectivas de outras pessoas.

## **Tipo de Pesquisa: Estudo de Caso**

A origem do estudo de caso está relacionada com as pesquisas nas áreas médicas e psicológicas, ao ser realizada uma análise de modo detalhado de um caso individual que explica a dinâmica e a patologia de uma doença dada. Porém, hoje em dia, pode-se verificar a sua presença nas diversas áreas do conhecimento como: caso clínico, técnica psicoterápica, metodologia didática ou modalidade de pesquisa.

Segundo Ventura [50] o estudo de caso como modalidade de pesquisa é entendido como uma metodologia ou como a escolha de um objeto de estudo definido pelo interesse em casos individuais. Para isso, visa à investigação de um caso específico, bem delimitado, contextualizado em tempo e lugar para que se possa realizar uma busca circunstanciada de informações.

Para a estruturação da pesquisa Gil [51] define quatro fases que mostram o seu delineamento:

- a) delimitação da unidade-caso;
- b) coleta de dados;
- c) seleção, análise e interpretação dos dados;
- d) elaboração do relatório.

Na primeira fase o autor se refere a uma delimitação da unidade que constitui o caso, exigindo dessa forma habilidades do pesquisador a fim de que perceba quais dados são suficientes para se chegar à compreensão do objeto como um todo.

Na segunda fase que é a coleta de dados em geral é realizada com vários procedimentos quantitativos e qualitativos: observação, análise de documentos, entrevista formal ou informal, história de vida, aplicação de questionário com perguntas fechadas, levantamentos de dados, análise de conteúdo etc., ou seja, existem diversos procedimentos que podem ser incorporados.

Na terceira fase tem-se a seleção, a análise e interpretação dos dados. Primeiramente, tem a seleção dos dados que deve considerar os objetivos da investigação, seus limites e um sistema de referências para avaliar quais dados serão úteis ou não. A fim de que após

serem selecionados sejam analisados. No próximo estágio é importante que o pesquisador já tenha definido de antemão o seu plano de análise e considerando as limitações dos dados obtidos, sobretudo no referente à qualidade da amostra, podendo dessa forma fazer generalizações a partir dos dados.

Na quarta fase tem-se a elaboração dos relatórios parciais e finais. Nesse estágio deve ficar explícito como foram coletados os dados, que teoria embasou a categorização dos mesmos e a demonstração da validade e da fidedignidade dos dados obtidos. Além disso, o relatório deve ser conciso.

Portanto, para se utilizar este tipo de investigação científica será necessário cumprir os seguintes passos:

- Caracterizar o problema;
- Avaliar a população afetada;
- Delinear a melhor prática de abordagem e estudo;
- Especificar uma metodologia de coleta de dados;
- Analisar os dados coletados estatisticamente ou comparativamente, de acordo com o universo de estudo;
- Propor um plano de ação.

## **5.3 Proposta do curso de intervenção**

### **1 Nome do Curso**

Um estudo sobre os 100 anos da supercondutividade.

### **2 Justificativa**

Diante da tamanha importância do tema abordado, torna-se necessário que o ensino de supercondutividade alcance os alunos do ensino médio das escolas brasileiras. Porém é importante que os professores de física estejam preparados para ensinar esse conteúdo. Para isso, o autor está propondo a criação de um curso de atualização docente, acerca do

conteúdo, a fim de que os professores devidamente treinados possam aplicar os métodos, estratégias e habilidades adquiridas em suas respectivas salas de aulas alcançando dessa forma uma maior quantidade de alunos, quando comparado ao alcance que teria se o próprio autor do projeto entrevistasse em sala de aula de determinadas escolas. No entanto, sabe-se que quando é abordado o tema Física Moderna e Contemporânea, os alunos associam logo aos avanços tecnológicos, então, essa proposta será implantada através da utilização das novas tecnologias da informação, para que a forma de ensinar não seja ultrapassada adequando às características dos alunos desses professores, a fim de que os mesmos possam ensinar de forma interativa, lúdica e criativa, podendo dinamizar e estimular o ensino.

### **3 Antecedentes**

Para desenvolver esse curso serão utilizados os livros de física do estado sólido usado nas disciplinas de mestrado, o livro de Introdução a supercondutividade de Michael Tinkham, os trabalhos da Professora Fernanda Ostermann com o tema Um Tópico de Física Contemporânea no Ensino Médio: um texto para professores sobre supercondutividade, o trabalho do Professor Adir Moysés Luiz, com o tema A supercondutividade e suas aplicações: um tema para aulas de física moderna no ensino médio, e também as simulações do grupo phet, entre outros.

### **4 Caracterização do público alvo**

Este curso será voltado para os alunos de Física da Graduação e Pós-Graduação, bem como os docentes de Física que atuam nas escolas do ensino médio do estado do Amazonas.

### **5 Condições de trabalho**

O curso será ministrado em sala de aula, haja vista que os participantes posteriormente aplicarão os conhecimentos adquiridos em geral, na sala de aula de uma escola ou universidade, e também a forma de ensino dar-se-á através dos objetos da aprendizagem.

### **6 Impacto Social**

As habilidades adquiridas pelos participantes do curso poderão ser estendidas a outros

conteúdos e utilizadas na solução de diversos tipos de problemas científicos possibilitando o desenvolvimento profissional dos mesmos. Em relação à atividade docente, o curso poderá ser de grande importância para a sociedade, haja vista, que as aulas desses docentes serão motivadoras aos alunos, estimulando a curiosidade e o espírito investigativo dos mesmos.

### **7 Formas de Avaliação**

Os participantes do curso de intervenção serão avaliados a partir da sua participação, assiduidade e interesse. E ao final do curso os mesmos serão estimulados a desenvolver um texto científico para ser colocado em uma página na web criada para esse fim.

Após os participantes criarem o seu texto, a próxima etapa será fazer uma análise crítica dos outros textos elaborados.

### **8 Recursos didáticos**

Para servir como um material introdutório será entregue aos participantes no início do curso um texto didático para que os mesmos saibam o que estava acontecendo naquela época, ou seja, um texto contextualizado a fim de mostrar como começou a pesquisa na área da supercondutividade. Além disso, foi elaborado um Blog para que os alunos possam colocar seus materiais de estudo, assim como estimular a leitura e a discussão dos textos. Este material foi resultado de um artigo científico apresentado na I Jornada Científica Provincial de Informática Médica realizada em Santiago de Cuba. Para a atividade a ser desenvolvida no último dia do curso cada participante deverá levar seu notebook.

### **9 Utilização dos objetos da aprendizagem**

Neste curso estará sendo utilizadas as simulações do grupo Phet, animações e vídeos da LUDOTECA da USP como também os sites desenvolvidos para ensinarem supercondutividade pela web.

No site da USP <sup>26</sup>, pode-se encontrar diversos artigos científicos como também animações e vídeos sobre supercondutividade. Nesse curso será utilizado a animação com o

---

<sup>26</sup>Disponível em: <<http://www.cienciamao.usp.br>> Acesso em: 22 de janeiro 2012

título "A cerâmica ", na qual um jovem visita o Laboratório de Física dos Materiais de uma universidade com o intuito de estudar o fenômeno da supercondutividade. Através das explicações do professor e com seus conhecimentos sobre números de oxidação, este aluno precisa reconhecer a fórmula química de um material supercondutor. Nesses vídeos, verifica-se a utilização da interdisciplinaridade que é um dos objetivos das componentes curriculares do ensino médio segundo as orientações curriculares do Ministério da Educação.

Outro site que será utilizado é <sup>27</sup> que possui uma página na web destinada ao ensino da supercondutividade, sendo construída a partir de resultados alcançados durante um curso de introdução a Física Moderna e Contemporânea na escola Frederico Jorge Logemann, localizada no município de Horizontina – RS.

#### **10 Conteúdos a serem abordados no curso de atualização**

O curso deve ser ministrado a partir da exploração das datas que marcaram os 100 anos da supercondutividade. A execução do curso deve abordar os seguintes conteúdos.

1. Características dos supercondutores.
2. Classificação dos supercondutores.
3. Teoria de London.
4. Teoria de Ginsburg-Landau.
5. Teoria BCS.
6. Efeito Josephson
7. Supercondutores de alta temperatura crítica.
8. Aplicações tecnológicas da supercondutividade

---

<sup>27</sup>Disponível em: <<http://www.inf.ufrgs.br/>> Acesso em: 22 de janeiro 2012



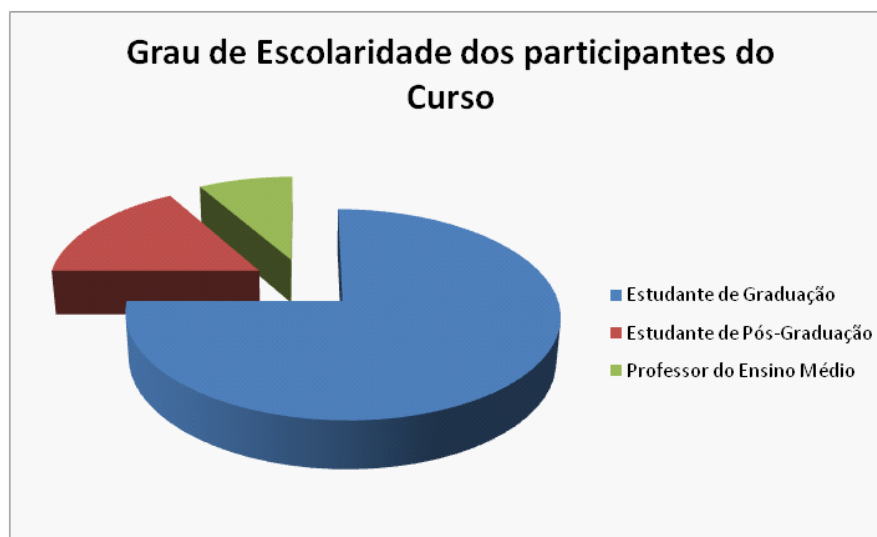


Figura 5-2: Grau de escolaridade dos participantes do Curso

## 5.4 Descrição das aulas

O curso de atualização foi voltado para alunos da Graduação e Pós-Graduação, assim como professores de Física do Ensino Médio e, possui carga horária de 9 horas. No total se inscreveram 32 alunos, no entanto, no primeiro dia de aula só estavam presentes 24 alunos, com os seguintes graus de instrução, veja o Gráfico 5-2.

De acordo com o Gráfico 1, observa-se que a maioria dos participantes, ou seja, 75% são alunos de Graduação em Física, sendo outros 4 de Pós-Graduação e apenas 2 Professores de Física do Ensino Médio.

As aulas foram ministradas na sala de Prática de Ensino de Física, na Universidade Federal do Amazonas, contendo 24 participantes.

**Primeira Aula** (3 horas-aula no dia 11 de Julho): Iniciou-se o curso de atualização com aplicação de um questionário com perguntas abertas e fechadas com intuito de verificar o conhecimento prévio dos alunos sobre o tema em questão, Apêndice B. Na primeira questão do questionário foi perguntado ao participante onde estudou sobre a supercondutividade, podendo o mesmo marcar mais de uma resposta. Ficando distribuída

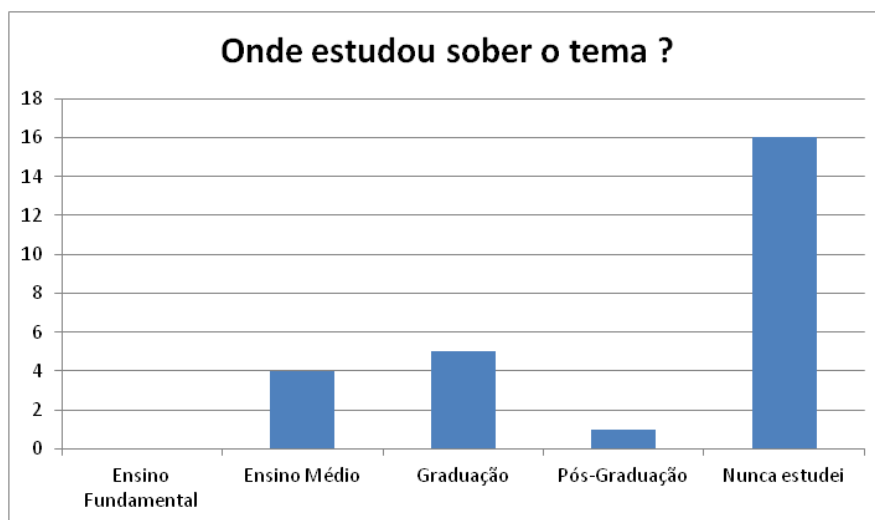


Figura 5-3: Onde estudou sobre o tema?

as respostas de acordo com o gráfico 5-3.

De acordo com o Gráfico 5-3 acima, fica evidente que a maioria dos participantes, aproximadamente 67%, nunca estudou sobre o tema da supercondutividade, e também alguns dos alunos marcaram resposta dupla alegando que estudaram sobre o tema tanto no Ensino Médio quanto na Graduação em Física.

A segunda pergunta foi relacionada aos seus respectivos conhecimentos acerca da supercondutividade, a resposta está expressa no Gráfico 5-4.

Com base nas respostas dadas pelos participantes pode-se observar que a maioria dos participantes (20 alunos) consideram seus conhecimentos sobre a supercondutividade insuficiente, 3 consideraram regular, 1 considerou bom e nenhum considerou ótimo. Ao comparar o Gráfico 5-3 com o Gráfico 5-4, pode-se notar que apesar de alguns alunos terem estudados sobre supercondutividade no Ensino Médio, Graduação ou Pós-Graduação eles consideram esse conhecimento adquirido insuficiente.

Na terceira pergunta fechada feita aos alunos, perguntou-se a que área da Física deve pertencer a supercondutividade e as respostas estão representadas no Gráfico 5-5.

Conforme o Gráfico 5-5 constata-se que 67% acreditam que a supercondutividade

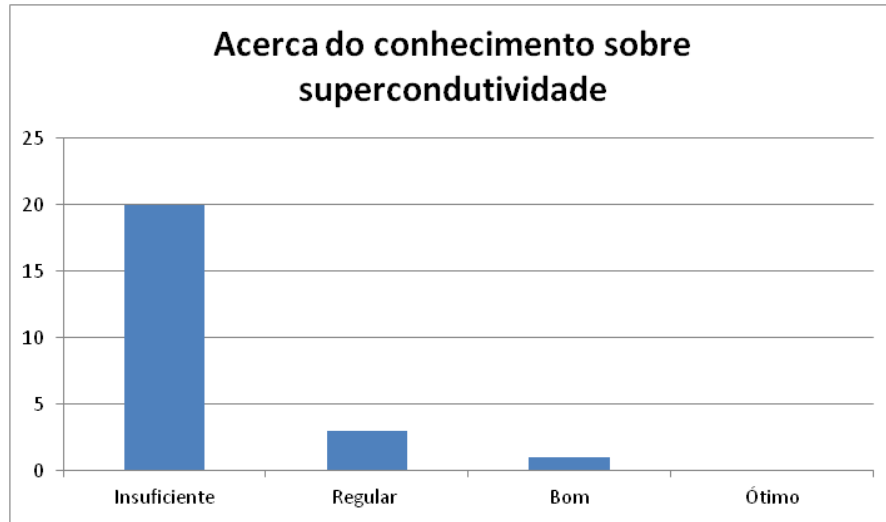


Figura 5-4: Acerca do conhecimento sobre supercondutividade



Figura 5-5: A que área da Física deve pertencer a supercondutividade?

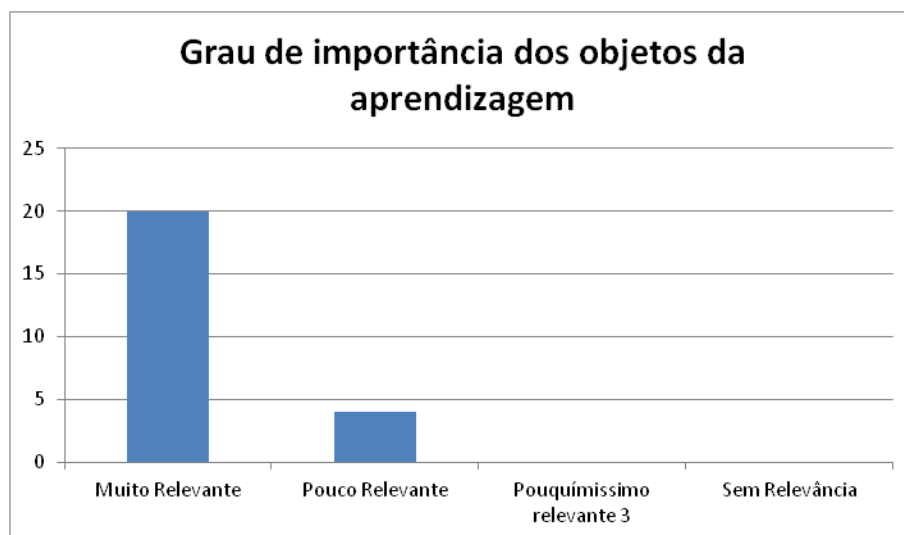


Figura 5-6: Grao de importância dos objetos da aprendizagem

pertence à da área da Física Moderna e Contemporânea. Enquanto que alguns participantes acreditam que essa está relacionada com o eletromagnetismo. Sendo que, ninguém respondeu sobre Cinemática e nem Termodinâmica.

A quarta pergunta foi relacionada ao grau de importância dos objetos da aprendizagem para a execução de uma aula, as respostas estão expressas no Gráfico 5-6. Na qual constatou-se que 20 participantes julgaram muito importante os objetos da aprendizagem para a execução de uma aula. Enquanto que 4 participantes julgaram pouco relevante, não havendo nenhum aluno que julgasse pouquíssimo ou sem relevância. Portanto, observa-se que pela análise das respostas coletadas o grau de importância dos objetos da aprendizagem para a execução de uma aula. Enfatizando que seria de suma importância utilizar essas ferramentas no curso de atualização.

As outras três perguntas são abertas, na qual se questionou acerca da concepção dos alunos sobre o fenômeno da supercondutividade com a pergunta: o que é a supercondutividade para você? Observou-se que 11 participantes, corresponde aproximadamente 46% dos alunos, os quais deixaram a questão em branco ou colocaram não sei. Os outros estudantes associadas à aplicações como: “*Economia de energia e avanço tecnológico*”

e “*Tecnologia inovadora para desenvolver um futuro promissor*” outra resposta foi dada com relação ao nome supercondutividade: “*Como próprio nome já indica está associado a materiais condutores com grande facilidade em conduzir elétrons (corrente)*”, a maioria dos que responderam associaram a supercondutividade com a resistência elétrica: “*Materiais que conduzem eletricidade sem resistência*”, “*São os materiais que podem conduzir, eletricidade (talvez) com uma resistência muito pequena*”, “*É uma característica de alguns materiais que não oferecem tanta resistência*”, “*São fenômenos nos quais a resistência elétrica tende à zero*” e “*Um material que a baixa temperatura possui resistência nula*”, também algumas respostas mais completas como “*Está relacionado com condutividade elétrica, e estuda as propriedades em temperaturas baixas*” e “*Fenômenos físicos em que os materiais supercondutores, quando submetidos a temperaturas críticas muito baixas, tendem a expulsar o campo magnético interno do material com resistência considerada nula*”. Portanto, pode-se observar que os alunos que responderam a essa questão realmente possuíam um conhecimento bastante superficial do fenômeno da supercondutividade.

A próxima pergunta aberta foi: quais as principais características dos supercondutores? Nessa pergunta 12 participantes, que corresponde a 50% dos alunos deixaram a pergunta em branco ou escreveram não sei. Daquelas que responderam, alguns relacionaram ao movimento do elétron: “*A grande facilidade que o elétron tem de se desprender quando tá orbitando o núcleo (elétrons livres)*” e “*Possuem facilidade no movimento dos elétrons*” outro participante associou apenas com a baixa temperatura “*Funcionam a baixas temperaturas*” outros associaram com a perda de energia “*Não existe perda de energia do sistema para o meio, ou seja, não há dissipação de energia elétrica*” e “*Não ocorre perda e efeito Joule*”, porém a maioria dos que responderam associaram apenas a resistência nula, “*Resistência nula ou aproximadamente nula*”, “*Não tem resistência*” e “*Onde as cargas podem se mover, sem resistência*”.

A última pergunta aberta do questionário inicial foi: quais as principais aplicações tecnológicas da supercondutividade? Em relação a essa pergunta 13 alunos, que corre-

sponde 54% dos participantes responderam que não sabiam ou deixaram em branco. Os demais indicaram as aplicações relacionadas ao trem Meglev e computadores ultra-rápidos “*Tavez seja muito utilizados em equipamentos: computadores(como peças)*”, “*Transporte Coletivo*”, “*Supercomputador, trens*”, “*Meglev, Supercomputadores e etc.*” e “*Aplicação nos trens, onde é aplicado um resfriamento, causando uma repulsão, assim, permitindo o trem se locomover nos (trilhos), de maneira que não haverá o contato, ou seja, a flutuação do trem*”, outros associaram a outras aplicações como “*Em eletroímãs, em química dos materiais*”, “*Na distribuição de eletricidade, construção de softwares mais avançados*”, “*Biomedicina, Ressonância Magnética funcional nuclear e trem Meglev*”, “*Aparelhos eletrônicos mais modernos*” e “*Conservação de energia elétrica e ressonância magnética*”. Após a análise das respostas pode-se notar que a aplicação mais conhecida da supercondutividade é o trem Meglev, o que demonstra o desconhecimento pelos participantes das aplicações mais modernas da Física.

Após analisar o grau de conhecimento dos participantes sobre o tema em questão, foi distribuído um texto didático para servir como material introdutório e contextualizar a pesquisa na área da supercondutividade. O material de apoio está no Apêndice D da dissertação. Após a leitura do material, iniciou-se o curso com a exposição dos objetivos e do conteúdo que seria abordado. Neste primeiro dia procurou-se abordar os principais acontecimentos relacionados com a supercondutividade que ocorreram entre os anos de 1911 a 1957. Para servir como ferramenta importante na aprendizagem do assunto usou-se os objetos da aprendizagem relacionados com tema, onde pode-se destacar imagens, animações e vídeos extraídos da rede mundial de computadores. Além disso, procurou-se no decorrer da aula uma forma de ensino que privilegiasse a interação com os participantes propiciando vários questionamentos acerca do conteúdo e, quando solicitado houve a uma nova discussão sobre os conteúdos. Iniciou-se o curso abordando a descoberta que marca o início das pesquisas na área da supercondutividade que é a resistência nula (1911), para facilitar o entendimento dos cursistas mostrou-se uma animação <sup>28</sup>, posteriormente

---

<sup>28</sup>Disponível em: <<http://www.emergentuniverse.org>> Acesso em: 23 de janeiro 2012

destacou-se a descoberta do Chumbo a  $T_c = 7,2K$  (1913) e, através da Tabela Periódica mostrou-se os outros elementos que em condições normais apresentam o fenômeno da supercondutividade, ao todo 29 elementos químicos. Em seguida abordou-se através de um gráfico a observação feita por Onnes em 1914, a qual supercondutividade pode ser destruída por um campo magnético, depois procurou-se trazer a discussão se realmente a resistência era nula, e se esse fato não contrariava os princípios da Física Básica. Após esse estudo resaltou-se a outra propriedade dos supercondutores: o Efeito Meissner, nesse momento um aluno perguntou como era formado o campo magnético induzido no efeito Meissner. Depois de dialogar sobre as características dos supercondutores, começou-se a falar das Teorias que tentaram explicar o fenômeno, onde pode-se destacar três, a Teoria de London (1935), a Teoria de Ginsburg-Landau (1950) e a mais conhecida Teoria BCS (1957). Procurou-se descrever os principais objetivos e alcance de cada teoria. No caso da Teoria de London foi feita uma análise quantitativa. Durante a exposição da Teoria BCS, um participante indagou o que era os férmions e bósons. E em seguida finalizou-se a atividade do primeiro dia do curso.

**Segunda Aula** (3 horas-aula no dia 12 de Julho): iniciou-se o segundo dia do curso abordando os principais acontecimentos da supercondutividade entre os anos de 1958 a 2011. Primeiro foi discutido as limitações das teorias fenomenológicas da supercondutividade, em especial a teoria BCS, diante dos novos supercondutores de alta temperatura crítica. Em seguida foi, foi analisado o Efeito Josephson (1962) e, também foram debatidos os supercondutores de alta temperatura crítica (1986 e 1987). Durante o curso enfatizou-se que a área da supercondutividade é um campo aberto, que não existe uma teoria completa que explique todos os supercondutores de alta temperatura crítica, e que aquele cientista que conseguir formular a teoria provavelmente ganhará o prêmio Nobel de Física, bem como aquele que conseguir obter um composto supercondutor à temperatura ambiente. Posteriormente, analisou-se o composto  $MgB_2$  (2001) e as principais aplicações da supercondutividade onde pode-se destacar: Ressonância magnética,

---

dispositivo SQUIDS, LHC, Trem Meglev e, principalmente o projeto da criação do Trem Maglev Cobra, no campos da UFRJ, entre outros. Observou-se, desde o início do curso que a parte que os cursistas estavam mais interessados era nas aplicações tecnológicas em especial a do trem Maglev, aproveitando esse entusiasmo explanou-se as aplicações utilizando imagens, animações e vídeos. Durante a explicação do funcionamento do Trem Meglev com intuito de facilitar a compreensão dos participantes foram mostrados vídeos que exploram o princípio de funcionamento dos trens meglev. Nesse momento houve várias perguntas dos cursistas, como: “Qual o mecanismo que utilizam para colocar o trem em movimento?”. Ainda na explicação dos Trens foi discutido acerca do Projeto do Trem Meglev Cobra mostrando as suas vantagens e desvantagens de sua implantação e, para conhecer melhor o projeto acessou-se o site da COPPE, o qual contem artigos e vídeos sobre o empreendimento. Após a exposição e discussão do conteúdo dividiu-se a turma em grupos 5 grupos de 4 pessoas, pois neste dia só compareceram 20 participantes e, então foi ratificado a atividade do terceiro dia de curso. A partir daí nessa atividade houve um sorteio de 5 temas relacionados à supercondutividade:

Resistência nula

Efeito Meissner

Teoria BCS

Trem Meglev Cobra

Imagem por Ressonância Magnética

Ficando cada grupo responsável por pesquisar e estudar o tema sorteado. E então, encerrou-se o segundo dia do curso de atualização.

**Terceiro Aula** (3 horas-aula no dia 13 de Julho): iniciou-se o terceiro dia do curso reunindo as equipes para pós discussão sobre o tema de suas respectivas pesquisas: escrever um texto didático sobre o tema sorteado que posteriormente deveria ser postado em um Blog, especificamente criado para divulgar o resultado do curso de atualização. Nesse momento, observou-se a motivação dos participantes, uma vez que os seus respectivos textos estariam na rede mundial de computadores podendo ser acessado por outros



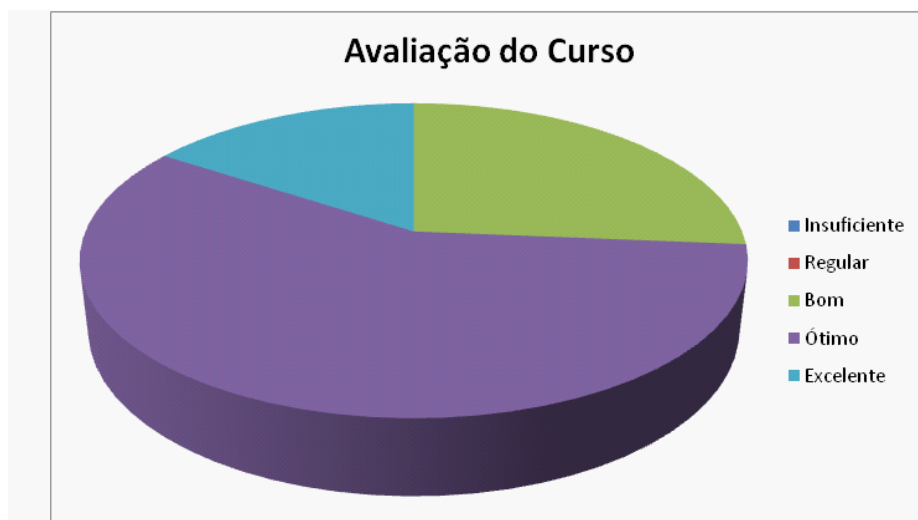


Figura 5-7: Avaliação do Curso

alunos e professores de qualquer lugar do mundo. Foi nítida a interatividade entre os integrantes da equipe e também com o Professor Ministrante. Após cada equipe concluir seu trabalho de pesquisa, foi postado os seus respectivos trabalhos no Blog do curso. Na próxima fase cada equipe deveria acessar o Blog para analisar e comentar os textos dos outros grupos. Em seguida, foi exposto a importância dos objetos da aprendizagem para o ensino de Física, especificamente o da supercondutividade, o qual foi mostrado vários sites de universidades e empresas acerca do tema em estudo. E então aplicou-se o questionário final com 12 perguntas entre abertas e fechadas, Apendice C, com o objetivo de avaliar o curso ministrado e a aprendizagem do participante.

Na primeira pergunta questionou-se como o participante avaliou o curso. Neste dia esteve presente 18 alunos, cuja resposta está exposta conforme Gráfico 5-7., no qual observa-se que a maioria dos participantes (10) responderam que o curso foi ótimo. Enquanto que (5) disseram que foi Bom (5), (3) responderam Excelente e ninguém respondeu insuficiente ou regular. Portanto esses resultados indicam que o curso de atualização obteve uma avaliação entre Bom e Ótimo.

A segunda pergunta do questionário foi com relação ao grau de aprimoramento do

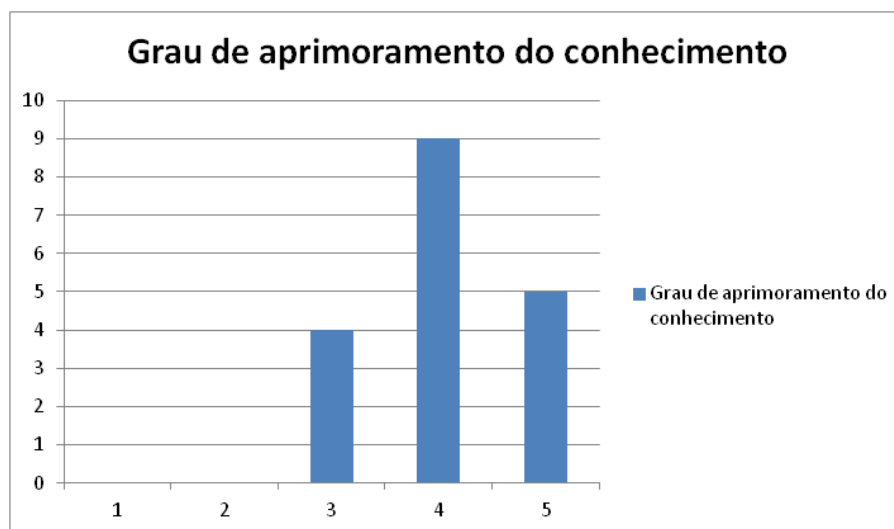


Figura 5-8: Grau de aprimoramento do conhecimento

conhecimento sobre supercondutividade, possibilitando que os participantes fizessem uma autoavaliação de quanto o curso acrescentou para o aprimorar o conhecimento sobre o tema, variando numa escala de 1 (Pouco acrescentou) até 5 (Acrescentou bastante).

De acordo com o Gráfico 5-8, é possível observar que a maioria dos participantes avaliaram o grau de aprimoramento do conhecimento entre 4 e 5 que correspondendo a 78%,. Outros 4 cursistas colocaram grau 3, não havendo nenhum aluno colocando grau 1 e 2.

Após uma análise dos Gráficos 5-7 e 5-8, é possível notar o sucesso deste curso, pois segundo as opiniões dos entrevistados o curso foi ótimo além de acrescentar ou aprimorar os seus respectivos conhecimentos na área da supercondutividade, que faz parte da Física Moderna e Contemporânea.

A terceira pergunta foi acerca dos objetos da aprendizagem: o quanto o curso foi estimulante para utilizarem os OA em suas respectivas aulas? De acordo com o gráfico 5-9 observa-se que os objetos da aprendizagem utilizados no curso de atualização estimularam bastante os alunos participantes a utilizarem os objetos da aprendizagem como ferramentas de apoio à divulgação científica, onde pode-se destacar a área da supercon-

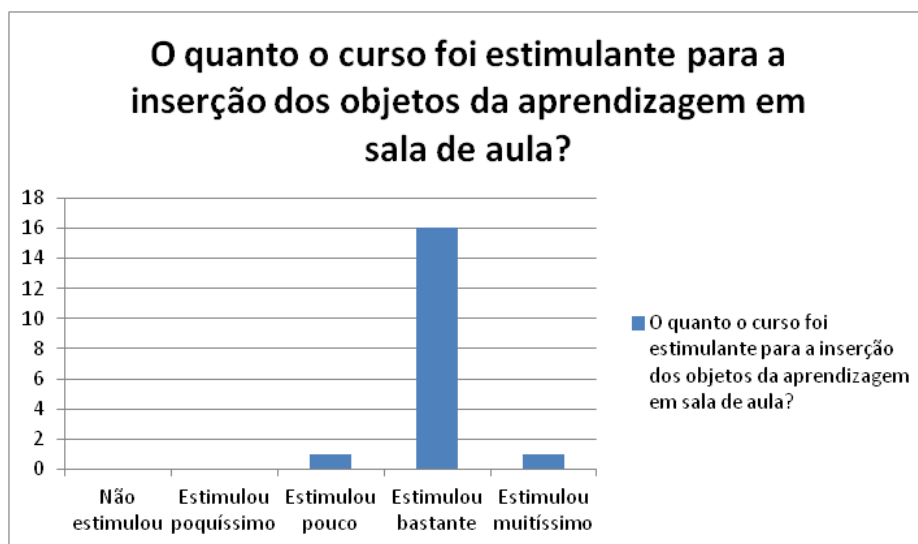


Figura 5-9: O quanto o curso foi estimulante para a inserção dos objetos da aprendizagem em sala de aula?

atividade. Outros cursistas responderam que o curso estimulou pouco (1) e muitíssimo (1)

A quarta pergunta foi aberta e foram questionados os pontos que eles consideraram como positivos para o curso. Nessa questão houve diversos tipos de respostas como a didática utilizada no curso: *“Fácil entendimento, na análise qualitativa do assunto abordado, visando atingir o público em geral”*, *“O minicurso foi bastante dinâmico”*, *“A forma de apresentação, didática utilizada”*, *“Boa didática, explicação, inovação tecnológicas que utilizam supercondutores”*, *“Então foi a forma objetiva de passar o assunto de maneira que nós alunos de graduação entendesse de maneira clara”* e *“Foi bem dinâmico”*. Comentaram também acerca dos objetos da aprendizagem utilizados: *“Bom desenvolvimento do programa, utilização de vídeos, realização de atividades”*, *“Utilização de vídeos e aplicações do supercondutor”*, *“Curso foi bem ministrado com vídeos e com o professor preparado”*, para alguns participantes o ponto positivo foi as aplicações da supercondutividade: *“Conhecer as aplicações de supercondutividade, assim como sua história e como ela influenciou a ciência com o passar dos anos”*, *“Todos relaciona-*

dos a supercondutividade e suas aplicações” e “A utilização dos aparelhos feitos com o uso de supercondutores”. Outros argumentaram que o mais importante foi o conteúdo abordado: “Explicação e esclarecimento sobre a linha de pesquisa a seguir (no meu caso é claro!)”, “Dá pra saber as características dos supercondutores”, “O conhecimento de uma matéria pouco difundida na graduação”, “Adquirir conhecimentos básicos na área ministrada, aplicações conhecidas através do assunto abordado” e “Foi um aumento de conhecimento, sobre o assunto abordado”, um dos participantes até solicitou que esse curso fosse novamente ministrado: “Foi muito bom! Apresente novamente em outra oportunidade”.

A quinta pergunta foi acerca das sugestões para a melhoria do curso ministrado, onde tiveram várias sugestões desde a melhor dinâmica e explicação do conteúdo: “Gráficos melhores explicados”, “Expandir detalhar mais os assuntos da supercondutividade”, “Acrescentar mais atividades dinâmicas”, “Está bom do jeito que foi apresentado, mas para a melhoria, ter tempo para trabalhar dinâmica dentro do assunto” e “Depois da teoria e os vídeos somente uma simulação real em maquete”, elogios sobre o curso: “Não tenho o que reclamar, na realidade eu não entendia o assunto, pois agora melhorou um pouco” e “O curso está ótimo!” mas uma sugestão é que continue assim e também sempre motive os ouvintes a pesquisar sobre o que está sendo apresentado (como a atividade de pesquisa em grupo), porém a maioria das sugestão foi acerca da utilização de um experimento sobre o tema: “Utilização de experimentos ou simulações, melhoria a visualização do fenômeno”, “Então mostrar experimentos”, “Mais aplicação visível, ou seja, que possamos ver o fenômeno”, “Experiências básicas em sala de aula”, “Trazer um experimento que mostra a supercondutividade” e “Experimento”. No entanto, aproximadamente 28% dos participantes deixaram em branco a pergunta ou escreveram nenhuma.

A sexta pergunta aberta foi: o que é a supercondutividade? Nessa, tiveram várias respostas como relacionadas com o avanço científico acarretado pelo avanço da supercondutividade: “Um avanço científico que pode mudar e muito o ‘estado da matéria’ que conhecemos, é um passo para o futuro da ‘ficção científica’” e “É um fenômeno natural,

que uma vez compreendido quase que totalmente pelo ser humano possa ser utilizado para o benefício da sociedade”. No entanto, a maioria das respostas focaram nas propriedades dos materiais supercondutores: “Fenômeno físico em que a resistência é nula em materiais supercondutores macios e duros”, “Ocorre em matérias, com resistência nula a corrente gerada”, “Onde ocorre passagem de corrente por um material, na qual possui resistência pequena”, “Os matérias supercondutores conduzem energia sem resistência, o que permite várias aplicações”, “Fenômeno que ocorre a uma certa temperatura nos materiais”, “Materiais supercondutores onde a corrente elétrica tem pouquíssima resistência a passagem.”, “Apresentam resistência nula a passagem de corrente elétrica, com uma temperatura baixa”, “Quando um certo material tem uma temperatura abaixo da temperatura crítica ele tem resistência nula”, “A supercondutividade é uma propriedade intrínseca do material, tem haver também com determinada temperatura e etc.”, “Supercondutividade é o fenômeno que alguns materiais realizam ao serem expostos a certas temperaturas onde a resistência elétrica é nula”, “Supercondutividade é desprezível a resistência ou nula” e “Supercondutividade é o fenômeno que alguns materiais apresentam (ou mistura de dois materiais) quando resfriados a temperaturas muito baixas, o que acarreta na resistividade do material ser nula”. Ainda tiveram 4 participantes que corresponde aproximadamente 22% dos cursistas, que não responderam essa pergunta.

A sétima pergunta também aberta, foi perguntado: as principais características dos supercondutores? As respostas dos mesmos foram relacionadas com a energia: “Resistência elétrica quase nula, excelente economia de energia”, “não apresentam perdas de energia para o meio”, porém a maioria das respostas foi relacionada com a resistência elétrica e temperatura crítica: “Resistência nula, temperatura crítica muito baixa (K)”, “Resistência elétrica nula, baixíssimas temperaturas”, “Resistência elétrica quase nula”, “Resistência elétrica nula a  $T < T_c$ ”, “Resistência pequena, custo financeiro, transporte de corrente altas”, “Aplicar uma corrente sem perdas, sem resistência”, “Resistência nula e temperaturas baixas”, “Resistência nula”, “Resistência elétrica nula”, “Resistência, metal puro”, “Resistência nula na passagem da corrente elétrica” e “A

*primeira característica é a resistência nula e baixa condutividade*” ainda outros relacionaram com o Efeito Meissner: “*Resistência nula, Efeito Meissner*” e “*Resistência nula, Efeito Meissner e baixa temperatura*”. Apenas dois participantes, que corresponde a aproximadamente 11%, não responderam a questão.

Ao analisar as questões 5, 6 e 7, observa-se que a questão na qual a maioria dos participantes responderam foi a sétima pergunta, na qual se questionava acerca das características do material supercondutor. Alguns participantes deixaram a pergunta 5 e (ou) 6 sem resposta, mas respondeu à questão 7, o que mostra a evolução dos alunos, pois pode-se verificar que já conseguem identificar as características principais dos materiais supercondutores.

A oitava pergunta é fechada e foi questionado a respeito do Efeito Meissner, o qual foram colocadas cinco afirmativas para o aluno verificar qual estava correta:

a) Ocorre quando aplicamos um campo magnético menor que o campo crítico  $H_c$  em um material supercondutor que esteja a uma temperatura menor que a temperatura crítica. (12)

b) No efeito Meissner o campo magnético entra normalmente no material sem sofrer nenhuma interferência. (2)

c) Ocorre tanto com materiais supercondutores como qualquer outro tipo de materiais. (0)

d) Pode ocorrer o efeito Meissner mesmo que não seja aplicado campo magnético sobre o material. (0)

e) É uma característica de metais comuns. (0)

RESULTADO: A alternativa certa é a letra “a”, 2 alunos erraram e 4 deixaram em branco. O que demonstra que a maioria dos participantes entenderam o conceito do Efeito Meissner.

A nona pergunta foi a respeito das propriedades dos materiais supercondutores, também com cinco alternativas sendo apenas uma correta:

a) Podem ser resfriados abaixo de 77 K. (0)

b) Apresentam resistência elétrica nula à temperatura maior que 77 K. (0)

c) Permitem a entrada do campo magnético em seu interior a uma temperatura acima da temperatura crítica. (0)

d) Apresentam resistência nula à passagem de corrente elétrica, se o material estiver a uma temperatura abaixo da temperatura crítica. (16)

e) Possuem resistência elétrica igual a zero acima da temperatura crítica. (2)

RESULTADO: A alternativa correta é a letra “d”. Dois alunos erraram (aproximadamente 11%), pois confundiram que o estado supercondutor ocorre abaixo da temperatura crítica. O que demonstra que foi satisfatória a compreensão das propriedades básicas dos supercondutores.

A décima questão também fechada, foi acerca dos pares de Cooper, onde é solicitado aos participantes que julgue três afirmativas e indique quais são corretas:

I. Os elétrons no estado supercondutor organizam-se em pares.

II. A força entre os elétrons no estado supercondutor é de repulsão.

III. A força entre elétrons no estado supercondutor é de atração.

Está (ao) correto a(s) afirmativas:

a) I (0)

b) II (0)

c) III (0)

d) I e II (2)

e) I e III (16)

RESULTADO: A alternativa correta é a letra “e”. Dois alunos erraram (aproximadamente 11%), que ficaram com dúvida em relação a força entre os elétrons se seria de atração ou repulsão e acabaram colocando repulsão. No entanto, se a força fosse de repulsão não seria possível formar um par de Cooper. Porém, a maioria dos participantes responderam corretamente essa questão, mostrando que o conceito de par de Cooper foi bem assimilado pela turma.

A décima primeira questão foi aberta e foi questionado sobre as principais aplicações

tecnológicas da supercondutividade. As respostas foram relacionadas principalmente à levitação magnética e o trem Maglev: “*Levitação Magnética, Ressonância Magnética e Conservação de energia elétrica*”, “*A supercondutividade tem varias utilidade. Ex: construção de trens que levita sobre os trilhos, fazendo com que os transportes possa se tornar mais barato e acessível*”, “*Uma das maiores aplicações é nos trens e etc.*”, “*Nos trens e trilhos, como por exemplo os trens maglev e maglev cobra*”, “*Em métodos para transporte urbano sem que haja poluição, e desenvolvimentos de softwares*”, “*No tren Maglev cobra*”, “*Trens Maglevs e eletroímãs*”, “*Um exemplo que vi na aula foi do ‘ter’. Achei muito bom.*”, outras respostas estavam associadas as aplicações na medicina: “*Construção de ‘trens’, aparelhos para uso em hospitais, eletroímãs, etc.*”, “*Os trens Maglev e no meu caso, as pesquisas iniciadas sobre vedes neurais, um trabalho desenvolvido em parceria entre um físico (Leon Cooper), um biólogo (Gary Leach) e um filósofo (Patricia Churchland)*”, “*Na ressonância magnética, ou seja, na física médica*”, “*Teve uma grande contribuição para a medicina com a ressonância magnética, e em um futuro próximo nos transportes (Maglev)*”, “*Aplicações no transporte (trens Maglev), medicina*”, e “*Construção de trem maglev, aparelhos médicos, parte da rede elétrica*”, outros ainda relacionaram com o desenvolvimento da informática: “*Ressonância magnética, trem maglev, computadores super rápidos, estações de energia sem perda. Essas aplicações tem custo bem baixo de manutenção e construção*”, além de relacionarem com a indústria em geral: “*Processos industriais que necessitam de percas mínimas de energia elétrica, transporte coletivo*” e “*Principalmente a industria, tecnologia da informação e áreas afins*”. Apenas 1 participante deixou a questão sem resposta. Esses dados nos mostram que os alunos compreenderam as características dos supercondutores e já conseguem relacionar com aplicações tecnológicas e industriais.

A última questão 12, foi acerca da importância da supercondutividade para se trabalhar no Ensino Médio e, de que forma seria possível fazer uma divulgação científica desse conteúdo nas escolas brasileira. As respostas foram com relação à inovação no ensino, motivação aos alunos, evolução da Física: “*Através dos professores é possível ensinar*



*este conteúdo de Física ao Ensino Médio que acrescentará novas informações”, “É importante a fim de que o professor possa motivar os alunos do ensino médio a terem mais curiosidades sobre o assunto e a divulgação pode ser feita utilizando-se das aplicações da supercondutividade”, “É importante abordar esse assunto em sala de aula, para que os alunos conheça o avanço da física nos últimos tempos, e que a física é importante para que surjam novas tecnologias”, “Vejo que nenhuma área do conhecimento deva ser restrita. É muito importante sim trabalhar supercondutores no Ensino Médio, estimular a sede de conhecimento, pois trata-se de um assunto muito fascinante. É possível fazer começando a explicar sobre o assunto para os responsáveis pela elaboração do colendário e os beneficiários que acompanham o assunto”, “Com esse conhecimento o professor pode abordar a física de forma diferenciada, saindo assim das aulas monotas, estimulando o interesse do aluno pela disciplina de física”, “Seria bom pois assim o aluno teria um conhecimento a mais”, “É muito importante pois é uma área que ainda está em desenvolvimento” e “Na minha opinião a importância é máxima se for comparada aos assuntos que os professores exigem em sala de aula, pois poderia contribuir com o interesse dos alunos. A divulgação inicialmente poderia ser em forma de pesquisa sobre como a supercondutividade pode mudar tecnologicamente o mundo”, outros sugeriram trabalhar a divulgação científica com vídeos e experimentos: “Trabalhado com o ensino de supercondutividade, nas bases gerais, e é claro com o auxílio experimental, tanto real como virtual”, “Então como o professor de Física deve passar através de vídeos encontrado na internet e explicar o fenômeno”, “É de muita importância, pois estimula os alunos a buscarem entender um pouco mais sobre o assunto, é um assunto atual. A divulgação seria possível por meio de ciclo de palestras, experimentos e vídeos na escolas”, “É importante na troca de conhecimento entre o professor e aluno. Em relação à divulgação seria possível mostrando vídeos e como a supercondutividade evoluiu nos últimos 100 anos. Mostrando também como a supercondutividade pode contribuir para a sociedade através de suas aplicações” e “Através de vídeos nas aulas, e através da experimentação”.*

Alguns sugeriram que a divulgação científica seja feita utilizando as aplicações tec-

nológicas da supercondutividade: “Feiras de ciências amostra de como se usa equipamentos científicos, a melhoria da ciência na tecnologia, o que o aluno usa diariamente que teve influência da física”, “O conhecimento sobre supercondutividade para o professor de ensino médio é importante, porque os alunos quando vê a aplicação desse tipo no transporte (trens) eles vão querer saber como funciona, e o professor terá que dar uma explicação” e “O professor pode explicar sobre a evoluções tecnológicas envolvendo a Física, como no Maglev”, outros focaram na analogia com o cotidiano e também no entendimento do conteúdo: “Em artigos fáceis de ler, que podem ser entendidos, fazendo uma analogia com algo no cotidiano” e “É muito importante mesmo, bom pra mim foi uma ótima ideia deste curso, que serviu pra entender pelo menos pra clarear sobre o assunto”. A partir dos comentários dos participantes do curso foi possível verificar que todos consideram importante que esse conhecimento seja divulgado para os alunos do ensino médio das escolas brasileira, o qual venha contribuir para a divulgação de um conhecimento atual da Física, podendo despertar nesses alunos interesse pelas ciências e em particular a Física.

## 5.5 Discussão dos resultados

O curso de atualização foi ministrado em três dias consecutivos, nas dependências do Campus da UFAM. Através do questionário inicial, ver Apêndice B, aplicado no primeiro dia do curso de atualização 100 anos da supercondutividade, foi possível caracterizar os participantes do curso, onde se pode observar que 75% dos participantes eram alunos de Graduação de Física e, em relação à turma observou-se que aproximadamente 67% nunca estudaram sobre o tema. Isso reflete o ensino tradicional vigente e a forma como vem sendo tratado o assunto por Professores do Ensino Básico, Técnico e Superior. Em relação ao conhecimento adquirido sobre o tema, observou-se que 83% consideram seus conhecimentos sobre supercondutividade insuficiente. A partir desses resultados, observa-se o grau de entendimento do assunto pelos graduandos em Física, mesmo o tema sendo

amplamente divulgado nos jornais e revistas os formandos em Física ainda não têm segurança para ensinar ou debater esse tema atual da Física, ou seja, os alunos que estão sendo formados em pleno século XXI, ainda não tem conhecimento da Física do século passado possuindo apenas um conhecimento científico de no máximo do século XIX. Portanto, alguma ação deve ser tomada para que esse conhecimento esteja ao alcance dos graduandos.

No entanto, ao serem perguntados sobre a que área do conhecimento pertence a supercondutividade aproximadamente 67% afirmam que a supercondutividade pertence à Física Moderna e Contemporânea, o que demonstra que os alunos apesar de não conhecerem sobre o assunto sabem que é um conteúdo atual, pertencendo a essa área do conhecimento.

Ao serem questionados se os objetos da aprendizagem eram importantes para a execução de uma aula, 83% responderam que é muito importante ou relevante para uma aula, palestra, minicurso e etc. fazer uso dos OA. Isso evidencia o fato de que os jovens da sociedade atual vivem em contato com as novas TICs. Sendo importante que, os novos professores façam uso dessas novas tecnologias para ministrar uma aula prazerosa e potencialmente motivadora aos alunos.

Através das perguntas anteriores já foi possível concluir que os alunos não possuíam domínio do assunto (supercondutividade) e nas outras três questões abertas, vários participantes deixaram sem resposta, dentre as quais algumas conceitualmente erradas e confusas. Ao serem perguntados sobre o que é supercondutividade? Um participante respondeu: *“seria algo para melhorar todo o mundo, que utiliza direta ou indiretamente”*, outro respondeu: *“a supercondutividade tem haver com condução”*. Na próxima pergunta quanto às características dos supercondutores, 50 % deixaram a questão sem resposta, enquanto outros responderam de forma errada ou confusa: *“A grande facilidade que o elétron tem de se desprender quando tá orbitando o núcleo (elétrons livres)”* ou *“Inovação, evolução e progresso”*. E na última pergunta 54% dos participantes não responderam a questão, ou demais se limitaram a falar dos trens Maglev: *“Transporte Coletivo”* ou

*“Supercomputador, trens”*.

A partir da análise do perfil dessa turma fica evidente a necessidade de aprender os conteúdos e, para auxiliar no desenvolvimento do conhecimento será de grande importância à utilização dos objetos da aprendizagem, principalmente porque os experimentos sobre o tema são caros ou difíceis de se encontrar. Além disso, esses formandos, posteriormente estarão lecionando a Física na Graduação ou no Ensino Médio, onde possivelmente serão questionados acerca do tema. Portanto, faz-se necessário uma divulgação científica acerca dessa temática.

O curso foi ministrado usando uma linguagem simples e acessível a todos os participantes. Evitou-se utilizar equações complexas, procurando-se trabalhar os principais conceitos relacionados aos 100 anos da supercondutividade e como ferramenta à divulgação científica utilizou-se os objetos da aprendizagem, que se mostrou muito útil permitindo aos alunos visualizarem fenômenos físicos complexos e difíceis de serem observados a “olho nu”. Além disso, estimulou-se a leitura desde o início do curso com leitura de apoio, Apêndice D, assim como, na elaboração de um texto didático pelos participantes do curso. Uma ferramenta que se mostrou muito útil foi à criação do Blog viabilizando aos alunos a postagem de seus respectivos textos, o qual possibilita melhor interação entre os participantes. Além de ser uma forma de desenvolver a aprendizagem - pois permite ao mesmo ler e comenta os trabalhos dos seus colegas propiciando com que aprendam, amadureçam, permitindo-os confirmar ou refutar uma idéia.

Ao final do curso os alunos responderam um questionário final, ver Apêndice C, que foi utilizado com objetivo de verificar a qualidade do curso, além de avaliar o quanto aqueles evoluíram ou aprenderam durante todo esse processo aproximadamente, 83,3% dos participantes avaliaram o curso com o conceito entre Bom e Ótimo. E numa escala de 1 a 5 sobre o quanto o curso aprimorou o conhecimento sobre supercondutividade constatou-se que 78% responderam entre 4 e 5, o qual demonstra que o curso alcançou os objetivos esperados e contribui para a divulgação científica do tema. Além disso, aproximadamente 89% dos participantes responderam que o curso estimulou bastante

o uso dos objetos da aprendizagem em suas aulas, o qual permite concluir que essa ferramenta é muito importante para a divulgação científica da supercondutividade.

Em relação aos pontos positivos do curso foi mencionado a didática, ou seja, a forma como foi abordado o assunto. Para melhorar a qualidade do curso, os alunos sugeriram a utilização de um experimento que possibilite a observar da ocorrência fenômeno da supercondutividade.

Após serem feitas questões sobre o curso, passou-se à perguntas sobre os conceitos estudados. Com intuito de servir como comparativo entre o questionário inicial e final, repetiu-se as perguntas 5, 6 e 7 do questionário inicial. Observou-se que na pergunta 5 (O que é a supercondutividade?) alguns participantes haviam respondido: *“São os materiais que podem conduzir eletricidade (talvez) com uma resistência muito pequena”* e depois do curso responderam *“Supercondutividade é o fenômeno que alguns materiais apresentam (ou a mistura de dois materiais) quando resfriados a temperaturas muito baixas, o que acarreta na resistividade do material ser nula”*, outros haviam respondido: *“materiais que conduzem eletricidade sem resistência”* e depois responderam: *“quando um certo material tem uma temperatura abaixo da temperatura crítica ele tem resistência nula”*, outros não responderam no questionário inicial, mas no final argumentaram: *“os materiais supercondutores conduzem energia sem resistência, o que permite várias aplicações”*, *“materiais onde a corrente elétrica tem pouquíssima resistência a passagem de corrente”*, *“apresentam resistência nula a passagem de corrente elétrica, com uma temperatura baixa”* e *“é um fenômeno natural, que uma vez que compreendido quase que totalmente pelo ser humano passa ser utilizado para o benefício da sociedade”*. No questionário inicial aproximadamente 46% dos participantes deixaram essa pergunta sem resposta ou escreveram não sei, já no questionário final apenas 22% não responderam, o que mostra uma evolução em relação ao início do curso.

Outra questão repetida no questionário final foi em relação às principais características dos supercondutores? No questionário inicial 50% dos alunos deixaram a pergunta em branco ou escreveram não sei e no questionário final foram apenas 11%. Dos que não

haviam respondido no primeiro questionário após o curso argumentaram: “*Resistência elétrica nula e Efeito Meissner*”, “*Resistência nula, temperaturas baixas*”, “*A primeira característica é a resistência nula, e baixa condutividade*” e “*Resistência nula a passagem da corrente elétrica*”. No entanto, muitos evoluíram nas suas respostas, um participante respondeu no questionário inicial “*Resistência nula*” e após o curso respondeu “*Resistência nula, temperatura crítica muito baixas*”. Outro havia respondido: “*A grande facilidade que o elétron tem de se ‘desprender’ quando tá ‘orbitando’ o núcleo (elétrons livre)*” e após o curso: “*Resistência nula,  $T < T_c$* ”, um participante havia respondido: “*Não ter resistência*” porém no questionário final respondeu: “*Resistência nula, Efeito Meissner, baixa temperatura*”.

Outra questão repetida no questionário final está relacionada às aplicações tecnológicas da supercondutividade. Sendo que, no questionário inicial aproximadamente 54% deixaram a questão sem resposta. Enquanto que, no questionário final apenas 1 (um) participante deixou a questão sem resposta. Daqueles que não responderam no início do curso, no final argumentaram: “*Trens Maglev, Eletroímãs*”, “*Ressonância Magnética, Trens Maglev, Computador super rápidos, estações de energia sem perda. Essas aplicações tem custo bem baixo de manutenção e construção*”, “*Aplicações no transporte (Trens Maglev), medicina*”, “*Nos trens e trilhos, como por exemplo os trens maglev e o maglev cobra*” e “*Construção de trens maglev, aparelhos médicos, parte da rede elétrica*”, dos que melhoraram suas respostas temos: “*Aparelhos eletrônicos mais modernos*” após o curso “*Construção de ‘trens’, aparelhos para uso em hospitais, eletroímãs e etc.*”. Outro respondeu no questionário inicial - “*Talvez seja muito utilizados em equipamentos: computadores (como peças) etc.*”. E no questionário final: “*A supercondutividade tem várias utilidade. Exemplo: construção de trens que levita sobre os trilhos, fazendo com que o transporte possa se tornar mais barato e acessível*”. Outro ainda havia respondido: “*Transporte coletivo*”. Após o curso: “*Processos industriais que necessitam de percas mínimas de energia elétrica, transporte coletivo*”.

Depois de analisar as respostas dadas no questionário inicial e final é possível observar

a evolução dos participantes, principalmente em relação àqueles que no questionário inicial deixaram as questões sem resposta e ao final do curso responderam corretamente as mesmas. Mostrando dessa forma, que a qualidade do curso ministrado tornara aos participantes capazes de debater e divulgar esse conhecimento atual da ciência.

Em relação às questões de múltipla escolha do questionário final (8, 9 e 10) observou-se que na questão 8 relacionada com o Efeito Meissner - aproximadamente 67% responderam corretamente. Na questão 9, relacionada com as características dos supercondutores os participantes que responderam corretamente fora um total de 89% e na questão 10 relacionada ao Par de Cooper - 89% responderam corretamente a questão. A partir da análise desses resultados é possível observar que os participantes em geral entenderam o conceito e conseguiram identificar as principais características da supercondutividade.

Na última questão (12) do questionário final, perguntou-se a importância do tema e como seria possível divulgar o assunto. Nessa questão, os participantes escreveram que seria muito importante divulgar esse conhecimento para alunos do Ensino Médio e, que a forma de divulgar seria fazendo uso dos OA e explorando principalmente as aplicações tecnológicas como pode ser verificado nos comentários: *“É importante a fim de que o professor possa motivar os alunos do ensino médio a terem mais curiosidades sobre o assunto e a divulgação pode ser feita utilizando-se das aplicações da supercondutividade”* e *“É de muita importância, pois estimula os alunos a buscarem entender um pouco mais sobre o assunto, é um assunto atual. A divulgação seria possível por meio de ciclo de palestras, experimentos e vídeos na escolas”*.

Assim, o curso de atualização alcançou os objetivos esperados. No entanto um curso de divulgação e até um sistema de trabalho de intervenção não resolve o completamente o tratamento de temas contemporâneos fazendo necessário que os graduandos em Física tenham contato com os conhecimentos e pesquisas atuais da Física Contemporânea. Nesse sentido sugere-se que, esse conhecimento seja abordado no decorrer do curso de graduação utilizando para isso os OA disponíveis na rede mundial de computadores. Pois, dessa forma os futuros docentes em Física poderão divulgar esse conhecimento aos seus

respectivos alunos, motivando-os a fazer suas pesquisas nos temas atuais da Física e em particular à supercondutividade. Porém apesar da importância dos objetos da aprendizagem deve-se utilizá-lo de forma planejada e estruturada, pois segundo Mark Weston, especialista na área de tecnologia na Educação, em uma entrevista a revista época edição 683 diz, “*trocar o caderno por artefatos modernos é ineficiente se o jeito de ensinar não mudar*”.

Então, a tecnologia deve ser utilizada apenas como mediadora de nada adiantando ter esse recurso se não houver uma preparação ou estratégia. O Banco Mundial divulgou no fim de 2010, uma experiência vivida pelo governo colombiano que distribuiu máquinas para 2 milhões de alunos, a melhora no desempenho dos alunos foi próximo de zero e em alguns casos até pioraram. No Brasil, o Ministério de Educação mostrou em 2007 que alunos que estudaram por três anos, em escolas com computador estavam pelo menos seis meses atrasados no aprendizado em relação aos outros. Avaliação em ambos os casos não levaram em consideração como eram usados os computadores, apenas se haviam computadores para a utilização dos alunos. Por isso países mais desenvolvidos têm realizados várias discussões acerca de como utilizar a tecnologia da melhor forma.



# Capítulo 6

## Considerações finais

Nessa dissertação estudou-se os 100 anos da supercondutividade, na qual a descoberta da resistência nula à baixíssimas temperaturas (1911) marca o início das pesquisas nessa área da Física. No entanto, apenas 22 anos depois foi descoberto uma segunda característica dos materiais supercondutores que ficou conhecida como Efeito Meissner. Apesar de que nesse período já haviam diversos resultados experimentais acerca da temática, não existia nenhuma teoria aceita pela comunidade científica capaz de explicar os fenômenos observados, porém em 1935 os irmãos London propõem uma teoria fenomenológica que seria capaz de explicar algumas propriedades como: a resistência nula e o Efeito Meissner. Porém, eram utilizadas para isso as equações da Física Clássica e do Eletromagnetismo, uma teoria que utilizava a mecânica quântica só fora proposta em 1950 por Ginsburg e Landau, porém até o momento não se sabia qual o mecanismo que seria responsável pela supercondutividade. Em 1957, Cooper, Bardeen e Schrieffer propuseram uma teoria que ficou conhecida com Teoria BCS, a qual explicava o fenômeno da supercondutividade a partir das interações elétron-fônon - onde dois elétrons poderiam formar estados ligados conhecidos como par de Cooper, via deformação da rede. Essa teoria conseguiu explicar todas as propriedades dos supercondutores convencionais, parecendo que não havia mais muito a fazer. Pois, segundo a teoria BCS, os supercondutores não poderiam atingir temperaturas maiores que  $30K$  e a maior temper-

atura crítica obtida para uma material supercondutor até o momento era num composto  $Nb_3Ge$ , com  $T_c = 23, 2K$ . No entanto, em 1986 Bednorz e Muller descobriram um composto que ficou conhecido como  $YBCO$  com temperatura acima dos  $30K$  gerando um considerável impacto na comunidade científica e, também causou um abalo à teoria BCS que não conseguia explicar o comportamento desses novos materiais conhecidos como supercondutores de alta temperatura crítica, sendo a partir de então desenvolvidas diversas propostas teóricas para tentar explicar o fenômeno da supercondutividade nos novos supercondutores. Porém, ainda não há nenhuma teoria aceita como definitiva na descrição da supercondutividade. Em relação às aplicações os materiais supercondutores já são usados em diversas áreas, onde pode-se destacar as aplicações na eletrônica, na computação, nos fios supercondutores, nos eletroímãs e na mais conhecida que é a levitação magnética.

Com objetivo de divulgar esse conhecimento optou-se por realizar um curso de atualização para alunos de graduação e professores de Física com o título: Um estudo sobre os 100 anos da supercondutividade. Sendo realizado na UFAM, participaram deste 24 alunos, dos quais 67% disseram não ter estudado sobre o assunto em nenhum nível de ensino, mostrando que seria necessário divulgar o conteúdo e, também que os mesmos levem esse conteúdo aos que ainda não tiveram a oportunidade de estudar o tema. No questionário inicial perguntou-se acerca da definição da supercondutividade e, observou-se que seria necessário uma ação em relação à divulgação científica do tema. Pois tiveram várias respostas confusas e erradas conceitualmente. Porém, como se trata de um tema da Física Moderna e Contemporânea, resolveu-se utilizar como ferramenta os objetos da aprendizagem, dada sua importância para o processo de ensino-aprendizagem. Ao serem questionados sobre o assunto: 83% dos participantes responderam que os objetos da aprendizagem são muito importante ou relevante para a execução de uma aula, palestra, minicurso e etc.

No decorrer do curso procurou-se trabalhar a leitura, através de um texto introdutório estimulando a contextualizando dos alunos. Além disso, foram mostrados diversos vídeos

e animações que contribuíram para a formação de uma idéia ou conceito relacionado com o fenômeno da supercondutividade. Ao término do curso, que teve duração de três dias consecutivos, os participantes desenvolveram um texto didático relacionados com alguns tópicos de suma importância para a supercondutividade e, em seguida esses textos foram postados em um Blog especialmente criado para esse fim. Onde cada aluno pôde ler e comentar os trabalhos dos outros, havendo assim uma interação e uma melhor assimilação do conteúdo ministrado no decorrer do curso.

Ao término do curso 83% dos participantes avaliaram o curso com conceito entre Bom e Ótimo e, numa escala crescente de 1 a 5, sendo 5 o nível (qualidade) máximo em relação a aprendizagem, 78% responderam entre 4 e 5. E ao se comparar a resposta dos alunos em relação à definição e características dos supercondutores, observou-se a evolução dos mesmos. Haja vista que, a maioria nunca estudou o assunto e em relação aos que já haviam estudado constatou-se uma considerável evolução quando comparados às respostas no questionário inicial e final.

Portanto, o curso de atualização aliado com os objetos da aprendizagem mostrou-se ser uma alternativa viável na divulgação científica de um determinado tema científico, podendo esta proposta ser expandida e utilizada para outros tópicos da ciência.

Todavia, após o primeiro centenário ainda existem alguns desafios que ainda não foram superados, tais como: uma teoria unificada capaz de explicar sua ocorrência para diferentes tipos de materiais supercondutores em qualquer intervalo de temperatura crítica e, também a obtenção de um material que apresente o estado supercondutor a uma temperatura ambiente ou acima dela. O estudo da supercondutividade tem se mostrado muito importante e produtivo, haja vista que até hoje já foram entregues cinco prêmios Nobel às pesquisas relacionadas ao tema.

# Apêndice A

## Aprendizagem significativa

Na década de 1960, David Ausubel (1918-2008), Psicólogo da Educação, propôs a sua teoria da aprendizagem significativa, onde enfatiza a aprendizagem de significados (conceitos) como aquela mais relevante para seres humanos.

A aprendizagem significativa pode ser compreendida como o processo por meio do qual uma nova informação (um novo conhecimento) interage de forma substantiva e não arbitrária com aquilo que o aprendiz já sabe, substantiva significa não literal, ou seja, não ao pé da letra, e não arbitrária, quer dizer que o relacionamento não é com qualquer aspecto da estrutura cognitiva, mas sim com conhecimentos especificamente relevantes, os quais Ausubel chama subsunçores [16].

Para que alguém aprenda significativamente é necessário que o conteúdo a ser aprendido pela pessoa interaja com aquilo que o indivíduo já sabe, antes de receber o novo conteúdo. Essa nova informação ancora-se em conceitos ou preposições relevantes já presentes naquela estrutura cognitiva que pode ser chamada também de estrutura conceitual do indivíduo, conforme sugerido por Postman e Weingartner [52]. Podemos, ao final das contas, aprender somente em relação ao que já sabemos e contrariamente ao senso comum, isso significa que se não sabemos muito, nossa capacidade de aprender não é muito grande. Esta idéia, por si só, implica uma grande mudança na maioria das metáforas que direcionam políticas e procedimentos das escolas.

Ausubel [17] em seu livro “Psicologia Educacional” relata que: "*Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria o seguinte: o fator mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Averigue isso e ensine-o de acordo*". Quando Ausubel escreve "aquilo que o aprendiz já sabe" está se referindo à estrutura cognitiva, ou seja, o conteúdo e a organização de suas idéias em determinado assunto e, quando diz "*averigue isso*" significa descobrir os conceitos, idéias e proposições disponíveis na mente do aluno e suas inter-relações, sua organização. Porém, quando relata "*ensine-o de acordo*" está se referindo a uma proposta de ensino baseada no que o aluno já sabe, identificando os conceitos organizadores básicos do que vai ser ensinado e utilizando recursos e princípios que facilitem a aprendizagem de maneira significativa [17].

Entende-se "subsunçor" como um conceito que servirá para ancorar o novo conceito a ser aprendido, para Ausubel [17] o conhecimento subsunçor é um conceito, uma idéia, uma proposição já existente na estrutura cognitiva, capaz de servir de “ancoradouro” a uma nova informação de modo que esta adquira significado para o indivíduo (isto é, que tenha condições de atribuir significados a essa informação).

Ainda segundo Moreira [16], o subsunçor é o nome que se dá a um conhecimento específico existente na estrutura de conhecimento do indivíduo que permite dar significados a um novo conhecimento que lhe é apresentado ou por ele descoberto. Então, pode-se concluir que para o indivíduo aprender significativamente é necessário que possua conceitos e idéias disponíveis e claras para servir como ancoradouro a novos conteúdos. Porém, além disso, é necessário que o material seja potencialmente significativo, ou seja, o aprendiz deve manifestar uma disposição para relacionar de maneira significativa o novo material à sua estrutura cognitiva.

Quando o aprendiz decide absorver um determinado conteúdo de maneira literal, a sua aprendizagem será mecânica, pois ele só conseguirá simplesmente reproduzir esse conteúdo de maneira idêntica àquela que lhe foi apresentada. Portanto, não conseguirá transferir o aprendizado da estrutura dessa informação apresentada para a solução de

problemas equivalentes em outros contextos. Por outro lado, quando o aprendiz consegue fazer conexões entre esse material que lhe é apresentado e o seu conhecimento prévio em assuntos correlatos, ele estará construindo significados pessoais para essa informação, transformando-a em conhecimento. Esse modo de construir o conhecimento não é literal, ou seja, não ao "pé da letra", configurando assim uma aprendizagem significativa.

## A.1 Organizadores Prévios

Até o presente momento estudou-se a aprendizagem quando há conhecimentos subsunçores, e então surge um questionamento, e quando não existem os subsunçores para servir de ancoradouro às novas informações. Para isso, Ausubel defende que a aprendizagem mecânica que é aquela onde as novas informações possuem pouco ou nenhuma relação com os conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva, é sempre necessária para que o indivíduo adquira novas informações em uma área de conhecimento que lhe é completamente nova. No entanto, para servir de ancoradouro ao novo conhecimento e levar ao desenvolvimento de conceitos, idéias e proposições relevantes que facilitem a aprendizagem subsequente, ele propõe a utilização de organizadores prévios, que segundo Moreira [16] são: "*...materiais introdutórios, apresentados antes do próprio material a ser aprendido, porém, em um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusividade do que esse material*".

Os organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes da aula em si, no sentido de servir como ponte cognitiva entre novos conhecimentos e aqueles já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz, podendo também ser escolhido para ativarem subsunçores relevantes à informação a ser ensinada, levando ao desenvolvimento de conceitos preexistentes.

Para Moreira os organizadores prévios não são simples comparações introdutórias, pois diferentemente destas devem:

- Identificar o conteúdo relevante na estrutura cognitiva e explicar a relevância

desse conteúdo para a aprendizagem do novo material;

- Dar uma visão geral do material em um nível mais alto de abstração, salientando as relações importantes;
- Prover elementos organizacionais inclusivos que levem em consideração, mais eficientemente, e ponham em melhor destaque o conteúdo específico do novo material, ou seja, prover um contexto ideacional que possa ser usado para assimilar significativamente novos conhecimentos.

Ainda segundo Moreira [16], um conceito como a força, se existir na estrutura cognitiva do aluno, este servirá como subsunçor para novas informações referentes à força, como por exemplo, a força gravitacional, aprenderá que é atrativa e regida por uma determinada lei, outro exemplo é a força eletromagnética, que será entendida pelo aluno como sendo oriunda de outra propriedade da matéria, a carga elétrica. Havendo aprendizagem significativa haverá uma interação entre o subsunçor força e o novo conhecimento força eletromagnética. Assim, força eletromagnética adquirirá significado para o aluno e o subsunçor força ficará mais diferenciado. Haja vista, que força também pode ser atrativa ou repulsiva, podendo ainda se manifestar como força elétrica ou força magnética.

O método tradicional de ensino utiliza uma metodologia baseada na memorização de equações, leis e conceitos. Essa forma de ensinar tem sido bastante criticada por alguns educadores. Porém, Ausubel não entende que essa forma de ensino seja totalmente descartada, para ele essa aprendizagem mecânica pode ser uma fase inicial de um novo conceito, possibilitando uma continuidade para uma aprendizagem significativa. Segundo Souza [53], a simples memorização de equações situar-se-ia em um dos extremos dessa continuidade (o da aprendizagem mecânica). Enquanto a aprendizagem de relações entre conceitos poderia estar no outro extremo (o da aprendizagem significativa).

Ao professor que deseja que seus alunos aprendam significativamente, Ausubel propõe as seguintes orientações:

- Ter clareza quanto aos conhecimentos prévios dos alunos;
- Desenvolver conceitos que sirvam de pré-requisitos, quando necessário, facili-

tando a aquisição do novo conhecimento;

- Apresentar material significativo que desperte motivação para a aprendizagem.

As principais vantagens de se utilizar os organizadores prévios são:

- Apontam relações claras entre subsunçores e o novo conhecimento;
- Podem ser aprendidos e utilizados de maneira simples;
- Seriam usados quando o aprendiz não iria organizar seu aprendizado de forma espontânea.

Ainda segundo Souza [53] o ensino de Física não pode estar limitado somente à teoria, porque falar de processo de ensino-aprendizagem significa unir teoria e prática, isto se dá na medida em que os professores consigam dentro do curso: trabalhar a teoria, a resolução de problemas, a relação com o cotidiano e as atividades experimentais. Pois a presente teoria ainda é objeto de pesquisa e desenvolvimento e usado como referencial para a pesquisa educacional e para a organização do ensino.



# Apêndice B

## Questionário inicial

Através deste questionário você estará nos ajudando a melhorar este curso. Suas experiências e observações são partes fundamentais neste curso.

MUITO OBRIGADO POR SUA COLABORAÇÃO

Nome: \_\_\_\_\_

Qual o seu grau de instrução?

- Estudante de graduação
- Estudante de pós-graduação
- Professor do ensino médio

1. Onde você estudou sobre supercondutividade?

Observação: Pode ser marcado mais de uma resposta nesse pergunta.

- No ensino fundamental
- No ensino médio
- Na graduação
- Na pós-graduação
- Nunca estudei

2. Como você considera seu conhecimento sobre supercondutividade?

- Insuficiente
- Regular

- Bom
  - Ótimo
  - Excelente
3. Você acredita que a supercondutividade deve pertencer a que área da Física?
- Cinemática
  - Eletromagnetismo
  - Termodinâmica
  - Física Moderna e Contemporânea
4. A que grau você atribui a importância dos objetos da aprendizagem (vídeos, softwares, animações, internet, etc.) para a execução de uma aula?
- muito relevante
  - pouco relevante
  - pouquíssimo relevante
  - sem relevância
5. Qual a sua concepção sobre o fenômeno da supercondutividade, ou seja, o que é a supercondutividade para você?
6. Quais as principais características dos supercondutores?
7. De acordo com o seu conhecimento sobre Física Moderna e Contemporânea, quais são as principais aplicações tecnológicas da supercondutividade?

# Apêndice C

## Questionário final

Através deste questionário você estará nos ajudando a melhorar este curso. Suas experiências e observações são partes fundamentais neste curso.

MUITO OBRIGADO POR SUA COLABORAÇÃO

Nome: \_\_\_\_\_

1) Como você avalia o curso de atualização que você participou?

Insignificante

Regular

Bom

Ótimo

Excelente

2) Avalie numa escala de 1(Pouco acrescentou) a 5(Acréscitou bastante) em que grau o curso aprimorou o seu conhecimento sobre supercondutividade.

1

2

3

4

5

3) De que forma o curso estimulou você a utilizar os objetos de aprendizagem em suas

aulas?

Não estimulou

Estimulou pouquíssimo

Estimulou pouco

Estimulou bastante

Estimulou muitíssimo

4) Quais os pontos positivos do curso ministrado?

5) Quais as suas sugestões para a melhora do curso ministrado?

6) Qual a sua concepção sobre o fenômeno da supercondutividade, ou seja, o que é a supercondutividade para você?

7) Quais as principais características dos supercondutores?

8) A respeito do Efeito Meissner é correto afirmar:

a) Ocorre quando aplicamos um campo magnético, menor que o campo crítico  $H_c$ , em um material supercondutor que esteja a uma temperatura menor que a temperatura crítica.

b) No efeito Meissner o campo magnético entra normalmente no material sem sofrer nenhuma interferência.

c) Ocorre tanto com materiais supercondutores como qualquer outro tipo de materiais.

d) Pode ocorrer o efeito Meissner mesmo que não seja aplicado campo magnético sobre o material.

e) É uma característica de metais comuns.

9) A respeito dos materiais supercondutores é correto afirmar.

a) Podem ser resfriados abaixo de  $77K$ .

b) Apresentam resistência elétrica nula à temperatura maior que  $77K$ .

c) Permitem a entrada do campo magnético em seu interior a uma temperatura acima da temperatura crítica.

d) Apresentam resistência nula à passagem de corrente elétrica se o material

estiver a uma temperatura abaixo da temperatura crítica.

e) Possuem resistência elétrica igual a zero acima da temperatura crítica.

10) Em 1956, foi publicado um artigo acerca dos pares de Cooper, sobre este tema julgue as alternativas abaixo.

I. Os elétrons no estado supercondutor organizam-se em pares.

II. A força entre os elétrons no estado supercondutor é de repulsão.

III. A força entre elétrons no estado supercondutor é de atração.

Está (ao) correto a(s) afirmativas:

a) I

b) II

c) III

d) I e II

e) I e III

11) De acordo com o seu conhecimento sobre Física Moderna e Contemporânea, quais são as principais aplicações tecnológicas da supercondutividade?

12) Na sua opinião, qual a importância do conhecimento sobre supercondutividade para o professor de Física que trabalha no Ensino Médio e como é possível fazer uma divulgação científica desse assunto nas escolas brasileiras?

# Apêndice D

## Texto introdutório ao curso de atualização

### 100 Anos da supercondutividade

No início do século XX havia uma disputa entre Onnes e o físico britânico James Dewar para atingir o zero absoluto usando a liquefação dos gases. Onnes ganhou a disputa após liquefazer o Hélio líquido. O atual recorde da temperatura é cerca de  $10^{-15}\text{K}$ , embora termodinamicamente seja impossível de obter o zero absoluto. Mas o objetivo não era apenas alcançar baixas temperaturas, era importante também descobrir as propriedades dos materiais, particularmente a condutividade elétrica em condições criogênicas.

Em 1900 o físico alemão Paul Drude baseado nas conjecturas e experimentos de J.J. Thomson e Lord Kelvin que a eletricidade envolve pequenos fluxos discretos de partículas carregadas especulando que a resistência dos condutores surgia a partir dessas entidades saltando inelasticamente com vibrações atômicas. Então, o que aconteceria com a resistência de um metal imerso no recém-descoberto Hélio líquido?

Os físicos tinham três principais suposições: a primeira é que a resistência continuaria até zero; a segunda a condutividade se saturaria a um baixo valor, pois haveria sempre algumas impurezas além dos elétrons se dissiparem; a terceira e mais popular ideia era

que os elétrons eventualmente seriam capturados, levando a uma resistência infinita. Mas antes de alguém ter certeza, os pesquisadores precisariam de uma amostra de metal muito puro.

Gilles Holst um pesquisador associado de Onnes da Universidade de Leiden, acreditou que poderia obter uma amostra destilando o mercúrio líquido para remover impurezas responsáveis pelo espalhamento abaixo de  $10K$ . O laboratório de Leiden possuía muita experiência na fabricação de termômetro usando mercúrio, e Holst sugeriu colocar mercúrio num tubo capilar para mantê-lo puro antes de submergi-lo em uma amostra de Hélio líquido. E assim em Abril de 1911 (a exata data não se sabe devido às anotações obscuras e incertas de Onnes) que Holst e seu técnico de laboratório Flim Gerrit descobriram que a resistência do mercúrio líquido, quando resfriado a  $4,2K$ , atingia um valor tão pequeno que é impossível de se medir. Esse fenômeno - a completa ausência da resistência elétrica - é a marca da supercondutividade. Ironicamente, a equipe de Leiden havia programado usar o chumbo ao invés do mercúrio. A sua tarefa teria sido muito mais fácil, pois o chumbo torna-se supercondutor a uma temperatura de cerca de  $7,2K$ . De fato, três anos mais tarde, sob sugestão de Paul Ehrenfest, os pesquisadores do laboratório de Leiden foram capazes de produzir e medir uma corrente persistente (que duraria um bilhão de anos) em uma amostra de chumbo no formato de anel.

Os créditos para a descoberta foram dados unicamente a Onnes, que chamou de “supra-condução”. Claramente, a descoberta não teria acontecido sem Onnes, mas publicar seu trabalho sem seus colegas seria inconcebível. Por isso, o anúncio deveria ser feito sob o nome de Onnes e Holst. Apesar disso, Holst tornou-se fundador do laboratório de pesquisa Philips em Eindhoven e um ilustre professor de Leiden. Mas isso não significa que ele e outros devam ser esquecidos no centenário da descoberta da supercondutividade.

Superconductivity the first 100 years, Physics world, April 2011

# Referências

- [1] H. K. Onnes. Communications from the Physical the Laboratory at University of Leiden. 120b, 122b, 124c (1911)
- [2] W. Meissner; R. Ochsenfeld. *Naturwissenschaften* 21, 787 (1933)
- [3] F. London and H. London, *Physica*2, 341 (1935)
- [4] V. L. Ginzburg and L. Landau, *Zhurnal Eksperimental'noi I Teoreticheskoi Fiziki* 20, 1064 (1950)
- [5] J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer, *Physical Review*108, 1175 (1957)
- [6] B. D. Josephson, *Physics Letters*1, 251, (1962)
- [7] J. G. Bednorz and K. A. Müller, *Z. Phys. B* 64, 189 (1986)
- [8] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. H. Huang, Y. Q. Wang amd C. W. Chu, *Phys. Rev. Lett.* 58, 908 (1987)
- [9] J. Akimitsu; J. Nagamatsu; T. Muranaka; Y. Zenitani. *Nature* 410, 63 (2001)
- [10] H. Hosono; H. Takahashi; K. Igawa, K. Aarii, Y. Kamihara, M. Hirano, Superconductivity at 43 K in an iron-based layered compound  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ . *Nature* 453, 376 (2008).



- [11] C. B. Spohr. O tema da supercondutividade no nível médio: desenvolvimento de material hiperfria fundamentado em epistemologias contemporâneas. Dissertação de mestrado. UFRGS (2008)
- [12] M. Tinkham. Introduction to Superconductivity. McGraw-Hill, N. Y. (1975)
- [13] F. Ostermann, L. M. Ferreira, C. J. H. Cavalcanti, Rev. Bras. Ens. Fís. 20, 270 (1998)
- [14] A. M. Luiz. Aplicações da Supercondutividade. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo (1992)
- [15] A. R. Arantes; M. S. Miranda; N. Studart. Objetos de Aprendizagem no ensino de Física: usando simulações PHET. Física na Escola, vol. 11, n. 1 (2010)
- [16] M.A. Moreira. O que é realmente aprendizagem significativa? Porto Alegre. Ed. do autor (2010)
- [17] D. P. Ausubel; J. D. Novak; H. Hanesian. Psicologia educacional. Tradução Eva Nick. Rio de Janeiro: Interamericana (1982)
- [18] P. M. Grant. Down the path of least resistance. Physics world, vol. 24. n.4 April (2011)
- [19] M. B. S. Costa, A.C.Pavão, Rev. Bras. Ens. Fís. 34, 2602 (2012)
- [20] D. J.Quinn; W. B. Ittner. J. Appl. Physics, vol. 33, p. 748 (1962)
- [21] A. C. Rose-Innes, E. H. Rhoderick, Introduction to Superconductivity. Oxford: Pergamon. p. 237 (1988)
- [22] C.P. Poole; H. A. Farach; R. J. Crenwick. Superconductivity. Editora Elsevier. 2 ed. Ames Iowa -USA (2007)
- [23] C. P. Poole. Handbook of Superconductivity. Academic Press. San Diego (2000)

- [24] I. S. Oliveira. Introdução a Física do estado Sólido. 1<sup>a</sup> Ed. Editora Livraria da Física. São Paulo (2005)
- [25] F. Ostermann; P. Pureur. Supercondutividade. São Paulo: Editora Livraria da Física (2005)
- [26] A. A. Abrikosov, Sovjet Physics–JETP5, 1174 (1957)
- [27] C. M. Costa; W. M. Santos. Luiz, A. M. Supercondutores: aplicações das junções Josephson na eletrônica. IX Simpósio nacional de ensino de física.
- [28] N. W. Ashcroft. Solid State Physics. Brooks/Cole (1976)
- [29] K. D. Machado. Teoria do eletromagnetismo. 2<sup>a</sup> Ed. Ponta Grossa. Editora UEPG (2005)
- [30] A. Ghosh. Modelo BCS Renormalizado e Supercondutores de Alta temperatura. Tese de Doutorado. UNESP (1999)
- [31] A. J. Leggett. J. Phys.(Paris) Colloq. 41, C7-19 (1980)
- [32] M. B. Maple. High temperature Superconductivity. J. Magn. Magn. Mater. 177, 18 (1998)
- [33] H. Maeda et. al. Jpn. J. Appl. Phys.27, L809 (1988)
- [34] Z. Z. Sheng and A. M. Herman, Nature 232, 55 (1988)
- [35] S. N. Putilin, E. V. Antipov, O. Chmaisnen and M.Marezio Nature 362, 226 (1993)
- [36] A. Bourdillon. High Temperature Superconductors: Processing and Science. San Diego: Academic Press (1994)
- [37] J. D. Jorgensen, et. al. Oxygen ordering and the orthorhombic-to-tetragonal phase transition in  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Physical Review B, v. 36, p. 3608-3616 (1987)

- [38] M. Motta. Inhomogeneidades estruturais em amostras nanoscópicas de supercondutores de alta temperatura crítica. Dissertação de Mestrado. UNESP (2009)
- [39] M. Casas, et. al. Phys. Rev. B50, 15945 (1994)
- [40] C. A. R. S. Melo; M. Randeria; J. R. Engelbrecht. Phys. Rev. Lett. 71, 3202 (1993)
- [41] R. Rottier. The application of Superconductors in Medicine.(2000) September 20. See at: [http://staff.ee.sun.ac.za/wjperold/Research/Superconductivity/Team/Rottier/art/biomag\\_ap](http://staff.ee.sun.ac.za/wjperold/Research/Superconductivity/Team/Rottier/art/biomag_ap)
- [42] J. Matisoo. The superconducting computer. Sci. Am., vol. 242, p.38 (1988)
- [43] P. S. Branício. Introdução à supercondutividade, Suas Aplicações e a MiniRevolução Provocada Pela Redescoberta do  $MgB_2$ : Uma Abordagem Didática. Rev. Bras. de Ens. de Fís. vol. 23, p. 381 (2001)
- [44] D. A. Wiley. The Instructional use of Learning Objects (2000). See at: Disponível em [www.reusability.org/read/chapters/wiley.doc](http://www.reusability.org/read/chapters/wiley.doc).
- [45] S.S. Nash, Interdisciplinary Journal of Knowledge and Learning Objects 1, 217 (2005)
- [46] P. F. T. Dorneles. Integração entre as Atividades Computacionais e Experimentais como Recurso Instrucional no Ensino de Eletromagnetismo em Física Geral. Tese de Doutorado em Ciências, UFRGS (2010)
- [47] M. Ludke; M. E. D. A. André. Pesquisa em educação: abordagens qualitativas. São Paulo: EPU (1986)
- [48] M. C. S. Minayo. O Desafio do Conhecimento. São Paulo: Hucitec (1982)
- [49] S.J. Taylor; R. Bogdan. Introduction to qualitative research methods: the search for meanings. New York: John Wiley & Sons (1984)

- [50] M. M. Ventura. O Estudo de Caso como modalidade de pesquisa. Rev. SOCERJ. Rio de Janeiro, n.20(5), p. 383-386 (2007)
- [51] A. C. Gil. Como elaborar projetos de pesquisa. 3.ed. São Paulo: Atlas (1991)
- [52] N. Postman; C. Weingartner. Teaching as a subversive activity. New York: Dell Publishing Co.(1969)
- [53] M. R. C. Souza. Um novo olhar no Ensino de Física nos Cursos de Engenharia na Amazônia. Dissertação de mestrado. UEA (2011)