



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

**ESTUDO SOBRE A TEORIA DE GINZBURG-LANDAU E O CONHECIMENTO DE
MAPAS CONCEITUAIS**

ADALBERTO GOMES DE MIRANDA

Orientador: Prof^o Dr^o Mircea Daniel Galiceanu

Manaus

2013



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

**ESTUDO SOBRE A TEORIA DE GINZBURG-LANDAU E O CONHECIMENTO DE
MAPAS CONCEITUAIS**

ADALBERTO GOMES DE MIRANDA

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

Manaus
2013

ADALBERTO GOMES DE MIRANDA

**ESTUDO SOBRE A TEORIA DE GINZBURG-LANDAU E O CONHECIMENTO DE
MAPAS CONCEITUAIS**

Aprovado em: ----- / ----- / 2013.

BANCA EXAMINADORA

Profº Drº Mircea Daniel Galiceanu - UFAM
Orientador

Profº Drº Igor Tavares Padilha - UFAM
Membro

Profº Drº Yuri Expósito Nicot - UEA
Membro

Epígrafe

*“Pelos teus preceitos alcanço entendimento,
pelo que aborreço toda vereda de falsidade.
Lâmpada para os meus pés é a tua palavra e
luz para o meu caminho.”*

Salmo 119, 104-105.

*“Um homem a quem foi dada a oportunidade
de abençoar o mundo com uma grande ideia
criativa não precisa do louvor da posteridade.
Sua própria façanha já lhe conferiu uma
dádiva maior!”*

*Albert Einstein
(homenagem a Max Planck – EUA - 1948)*

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família composta pela amada esposa Adailza e pelos meus amados filhos Adalberto, Adailson e Adam os quais contribuíram com muito amor, carinho, orações e suas presenças em minha vida.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao Criador de nossas vidas, Deus, que biblicamente, através de seu filho Jesus, nos deu esperança de viver e muita fé para eu iniciar e concluir este Programa de Pós-Graduação em Física.

Agradeço a minha amada esposa Adailza e aos meus amados filhos Adalberto, Adailson e Adam pelo amor, carinho e a presença durante os meus estudos e suas orações.

Agradeço a minha mãe Jacyra que mesmo distante confortou-me com suas orações.

Agradeço a Chefia do Departamento de Física que contribuiu com as propostas e a conservação do Programa de Pós-Graduação em Física que permitiu a minha formação.

Agradeço a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Física pelas propostas e cuidados para que os alunos concluíssem o curso.

Agradeço em especial ao Profº Drº Yuri Expósito e ao Profº Drº Mircea Daniel Galiceanu, aos quais me sinto muito honrado e expresso minha gratidão da seguinte forma: o primeiro por ter me conduzido aos caminhos iniciais de meu trabalho e por transmitir sua experiência em Física, o segundo por ser meu orientador para a entrega da dissertação. São conhecimentos e experiências, recebidos por estes professores de valor e grande estima, que guardarei por toda vida.

Agradeço, destacadamente, o Profº Drº Igor Tavares Padilha, porque nos momentos mais difíceis do desenvolvimento do Capítulo de supercondutividade, solicitei ajuda, e sem medir esforços mostrou-se interessado em ajudar, contribuindo com seus conhecimentos e experiências nas correções e explicações, por isto me sinto honrado.

Agradeço aos professores da banca examinadora que se disponibilizaram em participar e contribuir de forma direta e indireta.

Agradeço aos professores do Departamento de Física, especificamente, do Programa de Pós-Graduação em Física: Profº Drº José Ricardo de Sousa (professor desde 2006 quando eu era aluno especial), Profº Drº José Roberto Viana Azevedo, Profº Drº Antônio Bittencourt, Profº Drº Octavio Daniel Salmon e Profº Drº José Wilson Matias Pinto, pelos conhecimentos adquiridos.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Física pelo convívio e amizade.

Agradeço aos Professores que se formaram pelo Programa de Pós-Graduação em Física: Profº MSc Bruce Dilcelino, Profº MSc Marcio Gomes, Profº MSc Celso Ricardo, Profº MSc Emmanuel Costabile e Profº MSc Daniel Souza, todos pela amizade, participação direta em meus estudos e incentivo.

Agradeço aos colegas da turma de Graduação em Física, Cleverton Oliveira Dias, Josiano Rony de Miranda, João Carlos Pereira, Niniv Souza, Thalita Stefany, Adelina Araújo e Orleilson dos Reis, pela amizade, estudos e participação durante os estudos.

Agradeço a FAPEAM pela bolsa de estudos concedida, a qual contribuiu para realização desta dissertação.

Sumário

Lista de Tabelas	8
Lista de Figuras	9
Resumo	12
Abstract	13
Introdução	14
Supercondutividade	16
1.1. Aspectos Históricos	16
1.2. Efeito Meissner.....	21
1.3. Aspectos da Teoria de Ginzburg-Landau	28
1.4. Teoria BCS	31
1.5. Estudos das Equações GL.....	33
1.5.1. Energia Livre de Ginzburg-Landau sem aplicação de Campo.....	33
1.5.2. Energia Livre de Ginzburg-Landau com aplicação de Campo	36
1.5.3. Densidade de Corrente Supercondutora	39
1.5.4. Comprimento de Coerência.....	41
1.6. Análises das Equações de G.L.	44
1.7. Aplicações da Supercondutividade.....	48
1.7.1. Primeiras Aplicações da Supercondutividade	48
1.7.2. Aplicação em Levitação Magnética	49
1.7.3. Aplicação em vários equipamentos	49
1.7.4. Armazenamento de Energia	50
1.7.5. Aplicação em algumas áreas conhecidas.....	50
Procedimentos Metodológicos	51
2.1. Objetivos.....	51
2.2. Materiais e Métodos	51
2.3. Mapas Conceituais sobre Supercondutividade	52
2.4. Mapas Conceituais como ferramenta Metodológica	53
2.5. Pesquisa de campo sobre a utilização de Mapas Conceituais	55
2.6. Aplicação de um Minicurso.....	56
2.7. Pesquisa preliminar com mapas conceituais	58
2.8. Pesquisa através do Minicurso	62

Considerações Finais	75
Apêndice A.....	79
Apêndice B.....	84
Apêndice C.....	87
Apêndice D.....	89
Apêndice E	91
Apêndice F	93
Apêndice G.....	95
Apêndice H.....	96
Referências	97

Lista de Tabelas

	Pág.
Tabela 1.1. Alguns elementos Supercondutores do Tipo I e Temperaturas Críticas.....	21
Tabela B.1. Respostas dos alunos do questionário na utilização de Mapas Conceituais	84
Tabela G.1. Tabela periódica para consulta dos elementos supercondutores conhecidos	95

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.1. Resistência elétrica de Hg versus temperatura	16
Figura 1.2. Diagrama de Fase de \mathbf{B} versus T , mostrando a linha crítica H_c delimitando as fases dos Estados Meissner e normal [25, p.4].	18
Figura 1.3. Gráfico da dependência da Magnetização M com o campo aplicado para os supercondutores do tipo I, na linha tracejada e do tipo II, na linha contínua	19
Figura 1.4. Gráfico da resistividade ρ em função da temperatura T , de um supercondutor (Estanho) e um não supercondutor (Prata)	20
Figura 1.5. Diagrama esquemático do efeito Meissner: (a) $T > T_c$, as linhas de campo ficam no estado normal; (b) linhas de campo expulsas de um supercondutor quando está abaixo da temperatura crítica $T < T_c$	22
Figura 1.6. Diagrama esquemático do efeito Meissner: (a) $T < T_c$, as linhas de campo ficam no estado normal; (b) linhas de campo expulsas de um supercondutor quando está abaixo da temperatura crítica $T < T_c$	22
Figura 1.7. Desenho esquemático do efeito Meissner-Ochsenfeld diante de uma expulsão do campo magnético em uma placa uniforme. (a) Densidade de fluxo magnético B é igual para B_0 nos dois lados da placa, mas com baixa exponencialidade dentro da placa. (b) Densidade de magnetização M desaparece perto das faces da placa e expande-se no interior. (c) Magnetização é o produto de uma supercorrente j_s	27
Figura 1.8. Curvas das Funções de Energia Livre	29
Figura 1.9. Íons positivos atraídos pelo elétron que passa pela rede cristalina do material supercondutor, fazendo interação elétron-fóton e formação do par de Cooper ..	32
Figura 1.10. Esquema: (A) Vista 3D, comportamento do comprimento ξ no centro, em meio a estrutura do vórtice e mais afastado o comprimento λ_L . (B) Vista 2D, graficamente, desenho do vórtice acima (a), alinhado com os Comprimentos ξ e λ_L , (b) e (c), mostrando suas dimensões, nos eixos x e respectivamente os eixos com os parâmetro de ordem n_s e campo \mathbf{B}	43
Figura 1.11. Curva da energia livre de G.L. no estado supercondutor para $\alpha > 0$ e $T > T_c$	44
Figura 1.12. Curva da energia livre de G.L. no estado supercondutor para $\alpha < 0$ e $T < T_c$	45
Figura 1.13. Curva do comportamento da aplicação do campo B_0 na superfície do supercondutor, entre os estados normal e o supercondutor mostrados pela exponencialidade no comprimento λ_L	46
Figura 1.14. Curva de dependência da temperatura para o comprimento de penetração de London $\lambda_L(T)$	47
Figura 1.15. Curva de dependência do parâmetro Ψ com a função x e o comprimento de coerência ξ	48

Figura 2.1. Modelo de Mapa Conceitual de características da Supercondutividade	52
Figura 2.2. Modelo de Mapa conceitual da supercondutividade: do fenômeno à aplicações tecnológicas	54
Figura 2.3. Modelo de Mapa Conceitual de aplicações da supercondutividade	55
Figura 2.4. N ^{os} de alunos versus questões 4 a 10 – graus de relevância sobre Mapas Conceituais	60
Figura 2.5. N ^{os} de alunos versus questões 1 a 3 e 11 – graus de conhecimentos sobre Mapas Conceituais	60
Figura 2.6. Curva de dispersão na comparação dos graus de Relevância no uso de Mapas Conceituais	61
Figura 2.7. Linhas de Tendência dos graus de conhecimento – compara respostas 1, 2, 3 e 11 - “Sim” na maioria: ascensão linear verde e “Não” na minoria: regressão linear vermelha.	61
Figura 2.8. Alunos de Graduação e Pós-Graduação inscritos no Minicurso	62
Figura 2.9. Perguntas 1 e 4 – graus de conhecimentos sobre Supercondutividade e Mapas Conceituais	63
Figura 2.10. Gráfico mostrando que 73% dos alunos adquiriram conhecimentos de supercondutividade na graduação e 27% não adquiriram.	63
Figura 2.11. Gráfico com a maioria dos alunos respondendo que supercondutividade pertence a Física Moderna	64
Figura 2.12. Gráfico sobre uso de mapa conceitual na explicação da Supercondutividade mostra mais “Relevante”	65
Figura 2.13. Gráfico mostrando os principais graus: “Relevante” e “Muito Relevante”, para um professor atribuir como tarefas mapas conceituais a alunos.	65
Figura 2.14. Grau de relevância em criar um mapa conceitual sobre a supercondutividade antes das aulas do minicurso.	66
Figura 2.15. Gráfico mostra 90% dos graus “Excelente”, “Bom” e “Ótimo” dos conhecimentos adquiridos em supercondutividade e 10% “Regular”.	67
Figura 2.16. Gráfico do grau “Muito Relevante”, demonstra a aprendizagem com os conhecimentos adquiridos no minicurso.	68
Figura 2.17. Gráfico relativo ao grau de conhecimento sobre Mapas Conceituais com 50% “Bom”, 20% “Ótimo”, 20% “Regular” e 10% “Excelente”.	68
Figura 2.18. Gráfico com 60% “Relevante” e 40% “Muito Relevante” ao ministrar aulas com Mapas Conceituais sobre a Supercondutividade.	69
Figura 2.19. Gráfico de relevância do professor atribuir tarefas de Mapas Conceituais aos alunos, com 90% “Relevante” e 10% “Muito Relevante”.	69
Figura 2.20. Gráfico com 90% dos alunos optando por “Relevante” e 10% “Muito Relevante” na capacidade de criar um mapa conceitual sobre supercondutividade.	70
Figura 2.21. Modelo de Mapa conceitual sobre Supercondutividade, criado por um aluno de graduação em Física (PIBIC).	71

Figura 2.22. Modelo de Mapa Conceitual sobre Supercondutividade, criado por três alunos da Graduação em Física.	72
Figura 2.23. Modelo de Mapa Conceitual sobre Supercondutividade, criado por três de graduação em Engenharia Mecânica.	73
Figura 2.24. Modelo de Mapa Conceitual sobre efeito Meissner, criado por três alunos, uma de Pós-Grad. Física-Química e dois de graduações em Física e Matemática.	74
Figura A.1. Mapa Conceitual traçado por um aluno de Engenharia cursando a disciplina de Física Geral [49, p.40]	82
Figura A.2. Mapa conceitual construído por alunos do Ensino Médio, para conceitos de Mecânica Quântica [49, p.51 <i>apud</i> Paulo, 2006].	83
Figura D.1. Janela do “ <i>Cmap Tools</i> ”, para iniciar e salvar Mapas Conceituais	89
Figura D.2. Exemplo de janelas do “ <i>Cmap Tools</i> ”, para construção de novo Mapa Conceitual “sem título”, com outra de formatação de estilo de mapa	90
Figura H.1. (a) Acelerador de Partículas localizado na Suíça e estendendo-se até parte da França; (b) fios supercondutores são utilizados nos eletroímãs do LHC	96
Figura H.2. (a) a imagem de um trem MAGLEV, sob levitação magnética, deslocando-se sobre uma pista (corredor) contendo nas laterais bobinas supercondutoras; (b) bobinas de levitação; e (b) bobinas de propulsão	96
Figura H.3. Equipamento de Ressonância Magnética	96
Figura H.4. Imagem da bobina magnética supercondutora usada no SMES	96

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de análise teórica da teoria da supercondutividade conjuntamente com uma análise das equações de Ginzburg-Landau neste contexto, em que um estado do supercondutor é caracterizado por um parâmetro de ordem, dado pela construção de uma função de onda $\Psi(r,t)$ para descrever o comportamento quântico das partículas e mostrar o conhecimento de mapas conceituais como ferramenta didática. Serão apresentados os aspectos teóricos do fenômeno da supercondutividade e suas aplicações, e exemplos de mapas conceituais incluindo alguns modelos contendo conceitos da Supercondutividade. O objetivo específico é o de utilizar os mapas conceituais como um estudo da teoria Física no âmbito acadêmico, porque são instrumentos metodológicos para ajudar na compreensão dos conceitos com as interpretações, através de diagramas hierárquicos, mostrados em uma estrutura conceitual. Os métodos da pesquisa adotados são os de desenvolvimento das equações de Ginzburg-Landau, os da investigação que contarão com discentes matriculados nos cursos de graduação em Física, de forma individual e por último a aplicação de um minicurso, com a participação de graduandos e graduados em Física e áreas afins, distribuídos em grupos ou individual para análise dos resultados. O instrumento de pesquisa adotado para estes dois últimos métodos, fins de obter os escores referentes ao desempenho dos discentes, será um questionário simples, utilizando lápis, caneta esferográfica preta e papel A4 contendo, no primeiro método onze questões e no segundo método (minicurso) dez questões conceituais (abertas ou fechadas) sobre os conceitos relacionados aos temas fornecidos pelo instrutor e finalmente, serão apresentados as análises dos resultados.

Palavras chave: Supercondutividade, Equações de Ginzburg-Landau e Mapas Conceituais.

Abstract

The objective of this work is to present a proposal for a theoretical analysis of the theory of superconductivity together with an analysis of the Ginzburg-Landau equations in this context, in which the superconducting state is characterized by an order parameter, given by constructing a wave function $\Psi(r, t)$ to describe the quantum behavior of particles and to show the knowledge of concept maps as a didactics tool. We will present the theoretical aspects of the phenomenon of superconductivity and its applications, and examples of conceptual maps including some models containing concepts of superconductivity. The specific objective is to use the maps as a conceptual study of physics theory in the academic, they are methodological tools to help in understanding the concepts with the interpretations, through hierarchical diagrams, shown in a conceptual framework. The research methods adopted are the development of the Ginzburg-Landau equations, the research that includes students enrolled in undergraduate courses in Physics, as individual basis and for last the implementation of a short course, with the participation of undergraduate and graduate students in physics and related areas, distributed in groups or individually to analyze the results. The survey instrument adopted for the last two methods, in order to obtain the scores for the students' performance, will be a simple questionnaire, using pencil, black ballpoint pen and A4 paper, containing eleven questions in the first method and in the second method (short course) it will be ten conceptual questions (open or closed) about the concepts related to the topics provided by the instructor and finally it will be presented the analyzes of the results.

Keywords: Superconductivity, Ginzburg-Landau equations, Concept Maps.

Introdução

Este trabalho tem como propósito apresentar uma proposta de análise teórica da supercondutividade conjuntamente com uma análise das equações de Ginzburg-Landau (GL) que se refere a um estado supercondutor caracterizado por um parâmetro de ordem, devido à construção de uma função de onda $\Psi(r)$, que descreve o comportamento quântico das partículas.

A teoria de GL foi desenvolvida para explicar a supercondutividade que é um fenômeno caracterizado pela resistividade nula e diamagnetismo perfeito em material supercondutor resfriado abaixo da temperatura crítica T_c [1, p.258], classificando-se atualmente, em dois tipos de supercondutores: Tipo I e Tipo II. O supercondutor de Tipo I, na aplicação de um campo magnético \mathbf{B} fraco, tem características de resistividade nula à baixas T_c e diamagnetismo perfeito, conhecido como Efeito Meissner, sendo também chamado de supercondutor puro. O supercondutor de Tipo II apresenta dois campos magnéticos críticos, o B_{c1} e o B_{c2} , onde, entre o campo B_{ap} (aplicado) e B_{c1} ocorre o Efeito Meissner e entre B_{c1} e B_{c2} apresenta um estado misto, conhecido como supercondutor duro ou cerâmico e apresenta altas T_c em relação ao tipo I.

O estudo sobre os átomos, comportamento de ondas e de partículas, por parte de professores, pesquisadores e estudiosos, mostra que a relação das propriedades macroscópicas da matéria é apresentada pela interação do átomo com o material e o meio que está envolvido. Desta forma de relação entre as propriedades microscópicas e macroscópicas, onde se estuda o entendimento do que seja a natureza dos materiais sólidos, líquidos e gasosos, diante da interação eletromagnética, evidenciam a compreensão de física da matéria condensada [2].

O trabalho apresenta ainda, os conhecimentos de Mapas Conceituais como metodologia didática para explicar teorias Físicas à alunos, com o propósito de melhor compreensão de conteúdos lecionados, principalmente, devido a complexidade de temas relativos a supercondutividade.

A motivação para o presente trabalho de pesquisa surgiu pela experiência do autor e pela vontade de aprofundar-se nos conteúdos da supercondutividade, especificamente, pela Teoria de Ginzburg-Landau, que permite melhor compreensão do fenômeno físico, e sua contribuição para a utilização de novas formas de energia, assim como a aplicação da sua conservação, voltadas para os meios de transporte terrestre e armazenamento de energia.

Na utilização de diversos métodos de explicações para possibilitar a assimilação dos conhecimentos quânticos, alguns deles nem sempre são plenamente atendidos em seus objetivos devido ao grau de dificuldade para compreendê-los. Por estes motivos esse trabalho mostrará a teoria de GL, apresentando aspectos históricos, suas equações e aplicações importantes, mostrando ainda, o conhecimento da ferramenta Mapas Conceituais como forma de apresentar as teorias Físicas à alunos com o propósito de lhes dar mais clareza e compreensão.

Para isso, será utilizado um *Software Cmap Tools* que facilita a criação de mapas, para um trabalho de pesquisa ou de estudo, que pode ser formatado e organizado os conteúdos tanto para ser ministrado como para ser aprendido.

O objetivo deste trabalho é o de apresentar uma análise teórica da teoria da supercondutividade conjuntamente com uma análise das equações de Ginzburg-Landau e o objetivo específico é o de utilizar os mapas conceituais como um estudo da teoria Física no âmbito acadêmico.

A Introdução apresenta o desenvolvimento do trabalho de pesquisa relativos aos conceitos da Supercondutividade ao conhecimento de mapas conceituais, a justificativa sobre o tema e os objetivos.

O Capítulo 1 consta dos Conceitos de Supercondutividade, abordando aspectos históricos, efeito Meissner, Teoria BCS, aspectos da teoria de Ginzburg-Landau, e a análise dos resultados obtidos, mediante um estudo das equações de GL.

O Capítulo 2 apresenta os objetivos dos procedimentos metodológicos sobre o conhecimento, análise e utilização de mapas conceituais, utilização do *software Cmap Tools*, os procedimentos com a utilização de um questionário contendo onze questões para a pesquisa preliminar de campo e dois questionários com dez questões para o minicurso, com temas apresentados pelo instrutor. Mostra ainda as pesquisas de campo preliminar e aplicação do minicurso, onde serão utilizados os questionários respondidos e os mapas conceituais construídos pelos graduandos e/ou graduados das áreas de Física e áreas afins. os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa

O desenvolvimento deste trabalho foi fundamental para o estudo das equações de GL, por ter mostrado a sequência de algumas contas abertas para compreensão do leitor.

O conhecimento de mapas conceituais foi mostrado dentro de procedimentos metodológicos, para facilitar o entendimento de sua utilidade e sua contribuição aos conteúdos de Física. Seu precursor foi Joseph Novak (*Apêndice A*) entretanto, no Brasil vem sendo desenvolvido pelo prof^o Marco Antônio Moreira.

Capítulo 1

Supercondutividade

1.1. Aspectos Históricos

O fenômeno da supercondutividade foi descoberto em abril de 1911, pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes, em Leiden, Holanda, observando o comportamento do mercúrio (*Hg*) sólido, resfriado abaixo da temperatura crítica, $T_c = 4,2\text{K}$ (Figura 1.1), onde percebeu que o *Hg* foi modificado da sua condição normal para uma condição que variava a resistência elétrica na amostra [1, p.259; 3, p.610; 4, p.335]. Suas investigações em metais a temperaturas muito baixas era para conhecer as suas propriedades elétricas, porque sabia que a resistência elétrica destes metais tendia a diminuir, mas não tinha o conhecimento do limite mínimo, quando resfriados a temperaturas baixas próximas do zero absoluto.

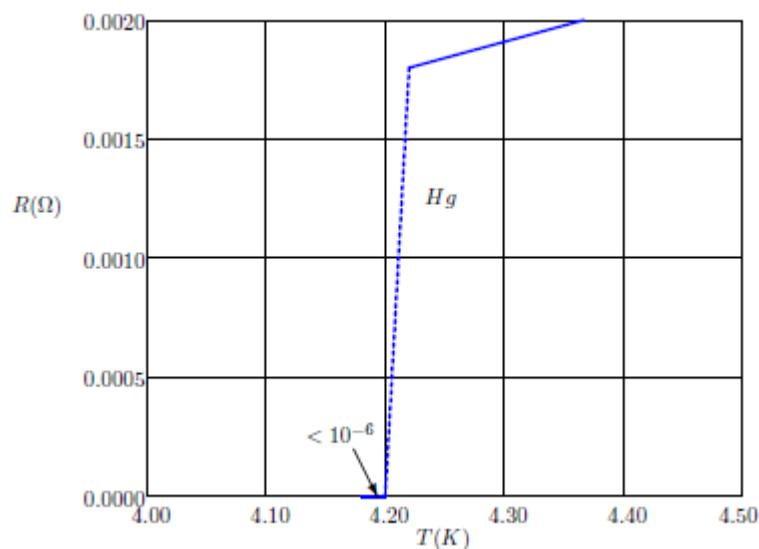


Figura 1.1. Resistência elétrica de Hg versus temperatura [4, p.334].

A Figura 1.1 é uma representação esquemática da variação da resistência elétrica de uma amostra de *Hg* em função da temperatura, medida por Onnes em 1911, que no presente século, mostra a transição ao estado supercondutor em $T_c \approx 4,2\text{K}$.

Heike Onnes em 1908, nesse mesmo laboratório, já realizava experiências com pequenas amostras de hélio (*He*) que foi liquefeito após ter sido resfriado a 1K, entretanto, chegou a produzir alguns milímetros cúbicos do *Hg* líquido para suas experiências.

Em 1911, Onnes mostrou que o *Hg* passava de um estado resistivo normal a um novo estado, chamado de supercondutor, ou seja, resistência nula ou próxima de zero. A variação brusca da resistência elétrica a uma determinada temperatura caracterizou a temperatura crítica T_c , evidenciando o fenômeno da transição de fase, onde as propriedades eletrônicas do metal são modificadas [5, p.1; 6]. O *Hg* foi selecionado por Onnes devido ao grau de pureza.

Onnes em suas experiências verificou a persistência de uma corrente elétrica num determinado fio de chumbo colocado sob resfriamento a 4K, durante mais de um ano e percebeu que as correntes estavam persistindo, onde chamou este fenômeno de correntes persistentes (*loop*), pelo fato dessas correntes elétricas permanecerem ativas mesmo sem haver uma tensão aplicada no fio de chumbo. A descoberta foi uma contribuição em termos de economia para a ciência, pois seus efeitos e aplicações foram muito importantes para as relações comerciais. Estas descobertas concederam a Onnes o prêmio Nobel em 1913.

Através de suas observações em 1913, Onnes percebeu também, [7, p.3 *apud* 7], que a supercondutividade podia ser destruída quando uma corrente elétrica suficientemente intensa, a uma corrente crítica I_c , fosse aplicada a um material.

Em 1914, Onnes aplicou em uma amostra supercondutora um campo H , elevado o suficiente em relação a um campo crítico H_c , e observou que a supercondutividade podia novamente ser destruída (desfeita) [7, p.3]. Nesta mesma data, em Leiden, com base em suas pesquisas sobre a resistência em função do campo aplicado, ele desenvolveu um ajuste empírico para a dependência da Temperatura do campo H_c [8], expresso na forma:

$$H_c(T) \approx H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

Pela equação (1.1) pode-se analisar que a aplicação de um campo $H(T)$ em função da temperatura na amostra supercondutora com valor próximo de zero Kelvin (pois o zero absoluto é inatingível), mostra que pela razão entre a temperatura da amostra e sua temperatura crítica, terá valor considerado como zero e conseqüentemente, $H_c(0) \cong H_0$ [9], porque o campo H fica na dependência da temperatura [1, p.258] e a amostra chegará ao estado normal (ver Figura 1.2).

As intensidades de H_c para os materiais supercondutores do Tipo I são em geral da ordem de 10^{-2} T [10, p.761].

A Figura 1.2 mostra no gráfico do campo aplicado versus temperatura, a linha de fase entre o campo H_c e o estado supercondutor comparados a observação de Onnes.

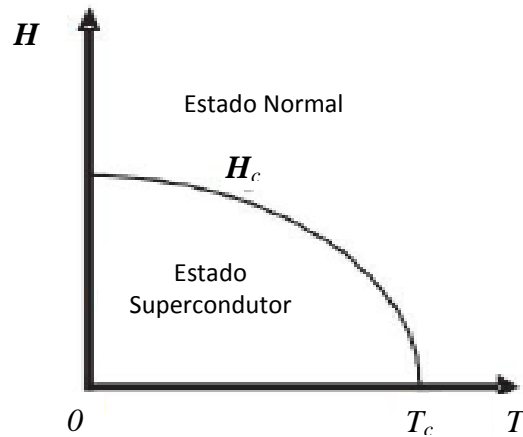


Figura 1.2. Esquema de um Diagrama de Fase de H versus T , mostrando a linha crítica H_c delimitando as fases dos Estados supercondutor e normal [11, p.4].

A Figura 1.2 é o esquema do diagrama de fase do campo aplicado em função da temperatura, onde a linha delimita as fases do estado supercondutor indicado abaixo de H_c e o estado normal acima da linha que significa não haver mais supercondutividade.

Com as observações citadas acima, a supercondutividade pode ser entendida como um fenômeno quântico macroscópico, que resulta da existência de uma função de onda, na forma de $\Psi(r)$, que será estudada a partir do subitem 1.4, onde a função descreve o comportamento de muitas partículas, haja vista as características de alguns elementos ou materiais utilizados, que ao serem resfriados a temperaturas muito baixas, facilitam a condução da corrente elétrica e causam a diminuição da resistência elétrica.

Existem dois tipos de supercondutores os do Tipo I e os do Tipo II, onde o primeiro tipo é conhecido como “supercondutor macio” por exigir temperaturas críticas muito baixas, caracterizado por uma transição muito estreita a um estado de supercondutividade, onde três dos melhores condutores, o cobre, a prata e o ouro não encabeçam a lista deste tipo de supercondutores. O segundo tipo é conhecido como “supercondutor duro”, por ser constituído de combinações de ligas metálicas e outros compostos, com temperatura elevadas, levando-se em conta às exceções de três metais puros, os quais são o *Vanádio (V)*, *Tecnécio (Tc)* e o *Nióbio (Nb)*, onde suas temperaturas críticas são muito mais elevadas que as do tipo I. O mecanismo microscópico que descreve a T_c do tipo II ainda não é perfeitamente compreendido na supercondutividade [12].

Um supercondutor do tipo I [13, p.19] possui duas características quando é resfriado a temperatura abaixo de T_c , resistência elétrica nula e diamagnetismo perfeito, onde acima desta temperatura o material fica normal. Neste caso, o diamagnetismo perfeito (efeito

Meissner) e a susceptibilidade magnética que equivale a $\chi = -1$ (subitem 1.2), mostra que o campo magnético deixa de existir dentro do material.

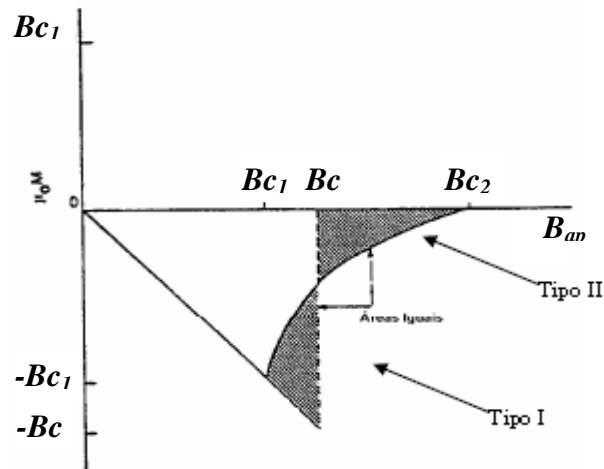


Figura 1.3. Gráfico da dependência da Magnetização M com o campo aplicado para os supercondutores do tipo I, na linha tracejada e do tipo II, na linha contínua [13, 18].

Um supercondutor do tipo II [13, p.20] também é um condutor perfeito, com resistência nula quando em corrente contínua (CC), apresentando propriedades magnéticas complexas. O campo aplicado (B_{ap}), que poderá ser referido como a letra B mais usual, é expulso totalmente do material no estado Meissner quando $B_{ap} < B_{c1}$ (Figura 1.3). O campo magnético fica em parte excluído quando o B_{ap} estiver entre os valores B_{c1} e B_{c2} , essa ocorrência é chamada de estado de vórtice. Há ainda, a existência de outro campo $B_{c3} > B_{c2}$ em uma camada superficial, tornando o material totalmente normal acima de B_{c3} [13].

A compreensão do fenômeno da supercondutividade deve ser observada pelo comportamento dos elétrons e íons, conhecidos como *efeitos de muitos corpos*, mostrando que a estrutura cristalina dos sólidos contribuem para a ocorrência da resistividade elétrica, devido aos elétrons espalhados pelas imperfeições na rede cristalina em função dos defeitos estruturais ou impurezas no interior de um cristal [3, p.609], onde ocorrem as vibrações dos átomos na rede [14].

As redes cristalinas são estruturas formadas por células unitárias que constituem conjuntos atômicos formados geometricamente nos materiais e que podem ajudar na explicação do fenômeno da supercondutividade. Essas redes são conhecidas como Redes de Bravais mostradas em 1948 por A. Bravais [15, p.8 e12].

Em 1933, os físicos alemães Fritz Walther Meissner e Robert Oschenfeld, descobriram que se uma amostra (elemento ou Material) supercondutora fosse resfriada a temperatura abaixo da sua T_c , diante da aplicação de um campo B , a amostra expulsava todo o

fluxo magnético de seu interior. Observou-se que se a amostra já estivesse abaixo de sua T_c e fosse aplicado o campo \mathbf{B} nela, o campo magnético não penetrava na amostra supercondutora porque fluía pelo seu exterior. Mostrando na experiência que o supercondutor agia como um *diamagneto* perfeito, que pode ser comparado a um átomo *diamagnético*, em que os elétrons orbitais modificam seu movimento de rotação produzindo momento magnético resultante e oposto ao campo \mathbf{B} aplicado [3, p.610].

A Figura 1.4 mostra o comportamento de um supercondutor (Estanho) e de um condutor (Prata), em relação a resistividade e respectivas temperaturas aplicadas.

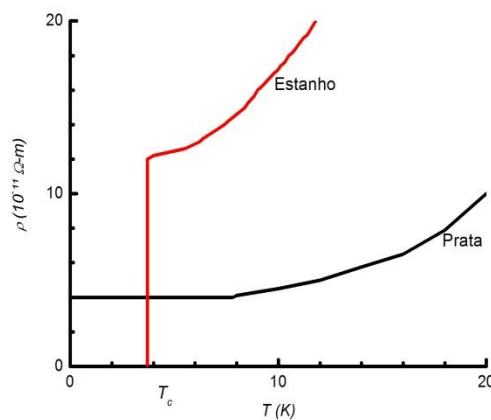


Figura 1.4. Gráfico da resistividade ρ em função da temperatura T , de um supercondutor (Estanho) e um não supercondutor (Prata).

No gráfico da Figura 1.4, a resistividade ρ em função da temperatura T , apresenta duas curvas: a primeira do metal Estanho (*Sn*) que apresenta uma queda de T_c acentuada à zero, sendo um supercondutor e a segunda do metal Prata (*Ag*), não sendo um supercondutor, porque mostra uma normalidade na resistividade finita [3, p.610].

Essa característica do exemplo do *Estanho* ajuda a explicar que no supercondutor as correntes que circulam podem durar muitos anos sem que sejam detectados seus decaimentos [3, p.610].

Afirmar realmente que em uma experiência a resistividade é zero em um material, acarretará em erro, porque a medição de uma resistência não é exatamente zero, pois pode ter uma aproximação para mais ou menos [16]. Conforme as estimativas dos valores calculados por Onnes, seus resultados apresentavam valores limites, quando mostrou que em 3K a resistência tinha queda abaixo de $3 \times 10^{-6} \Omega$, equivalendo a um décimo de milionésimo da resistência que teria valor de 0°C e quando a temperatura abaixou até 1,5K, este valor manteve-se naquele limite da resistência.

Na Tabela 1.1 estão destacados alguns elementos supercondutores e suas respectivas temperaturas críticas T_c , dentre os 29 existentes.

Tabela 1.1. Alguns elementos Supercondutores e suas temperaturas Críticas.

Elementos	Sigla	$T_c (K) \pm 0,0001$
Nióbio	<i>Nb</i>	9,2500
Chumbo	<i>Pb</i>	7,2000
Mercúrio	<i>Hg</i>	4,1500
Estanho	<i>Sn</i>	3,7200
Índio	<i>In</i>	3,4000
Alumínio	<i>Al</i>	1,1750
Molibdênio	<i>Mb</i>	0,9150
Zinco	<i>Zn</i>	0,8500
Titânio	<i>Ti</i>	0,4000
Berilo	<i>Be</i>	0,0260
Tungstênio	<i>W</i>	0,0154
Platina	<i>Pt</i>	0,0019
Ródio	<i>Rh</i>	0,0003

Atualmente, existem 29 elementos (*Apêndice G*) supercondutores em condições normais de pressão [5, p.4]. Suas T_c mostradas na Tabela 1.1, estão na faixa de aproximadamente, $T_c = 3,25 \times 10^{-4} K$ (do *Rh*) até $T_c = 9,25 K$ (do *Nb*) [5, p.4], onde o *Nióbio* está dentro das características do tipo II.

1.2. Efeito Meissner

Os físicos Meissner e Oschenfeld através de seus estudos sobre o comportamento de materiais, como a resistividade do *Sn* em função da temperatura (Figura 1.4) e a indução magnética, resultou na observação do fenômeno em que o campo magnético não penetra no material supercondutor quando submetido a baixas temperaturas, que ficou conhecido como o efeito Meissner-Oschenfeld.

Quando um supercondutor se encontra no estado normal em $T > T_c$, aplica-se um campo \mathbf{B} de pouca intensidade no sistema supercondutor e em seguida resfria-o na presença do campo \mathbf{B} . Para $T < T_c$ ocorre a expulsão brusca do campo magnético do seu interior e o material fica no estado supercondutor.

Se o material (amostra) supercondutor é resfriado em presença de um campo \mathbf{B} a uma $T < T_c$, o campo \mathbf{B} não penetra nesse material. Isto mostra que há uma indução magnética \mathbf{B} no supercondutor, porque o supercondutor passa a ser um *diamagneto* perfeito. O entendimento deste efeito não é simplesmente pelo desaparecimento da resistência, mas sim

pela aplicação do campo magnético que faz aparecer as correntes superficiais que tendem a cancelar a indução magnética no interior da amostra supercondutora.

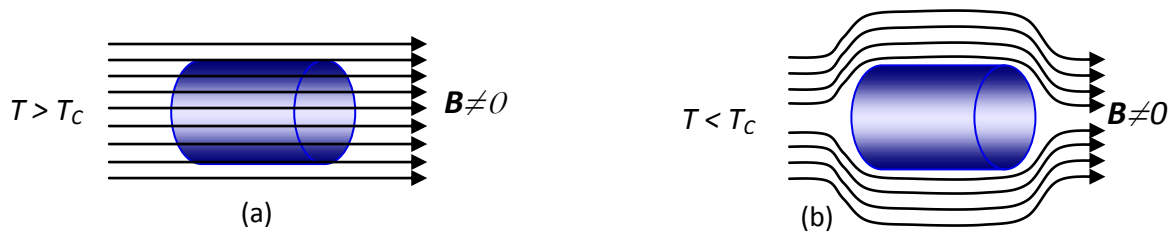


Figura 1.5. Diagrama esquemático do efeito Meissner: (a) $T > T_c$, as linhas de campo ficam no estado normal; (b) linhas de campo expulsas de um supercondutor quando está abaixo da temperatura crítica $T < T_c$.

A Figura 1.5, mostra que ocorre uma transição do estado normal para o estado supercondutor ao mesmo tempo em que linhas do campo B passam pela amostra antes da transição (a) e com esta mesma amostra, depois da transição (b), o fluxo não passa mais pelo interior do supercondutor, devido as correntes superficiais de blindagem atuarem no cancelamento do campo B e fazer com que o mesmo passe externamente pela amostra.

Na representação da Figura 1.6 observa-se um exemplo de amostra no estado normal, sendo resfriada a $T < T_c$ e sem aplicação de campo B , mas imediatamente se aplica o campo B , que é impedido de penetrar no interior da amostra.

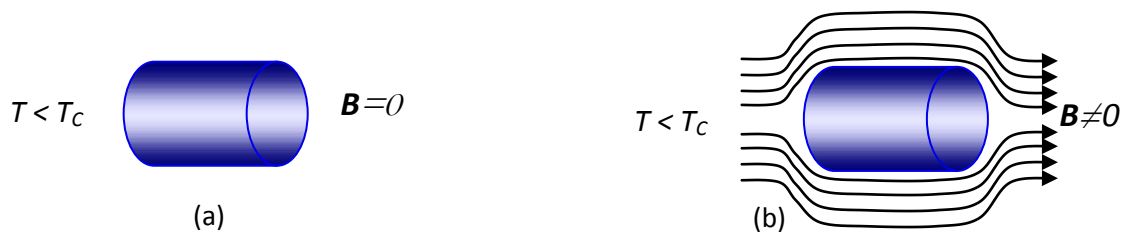


Figura 1.6. Diagrama esquemático do efeito Meissner: (a) $T < T_c$, sem as linhas de campo na amostra; (b) linhas de campo sendo impedidas de penetrar no supercondutor quando este se encontra abaixo da temperatura crítica $T < T_c$.

A exposição do campo magnético externo em um supercondutor, diante de uma temperatura abaixo da T_c , mostra que este não penetra no interior porque há expulsão do campo magnético devido a ação das corrente superficiais entre os elétrons da estrutura da amostra, que acaba criando outro campo magnético oposto e muito intenso ao aplicado, a chamada corrente de blindagem, que ocorre na superfície. A intensidade da supercorrente consegue anular o campo externo no interior.

Em síntese, o efeito Meissner pode ser analisado de duas formas (Figuras 1.5 e 1.6): a primeira é pela aplicação do campo B na amostra supercondutora no estado normal

($T > T_c$) seguido de resfriamento à $T < T_c$ e a segunda começa com o resfriamento à $T < T_c$ sem aplicação do campo \mathbf{B} e depois aplica-se o campo \mathbf{B} , conforme a seguir:

$$\begin{aligned} T > T_c \text{ com } \mathbf{B} \neq 0 & \text{ seguido de } T < T_c \text{ com } \mathbf{B} \neq 0, \\ T < T_c \text{ com } \mathbf{B} = 0 & \text{ seguido de } T < T_c \text{ com } \mathbf{B} \neq 0, \end{aligned} \quad (1.2)$$

onde as duas condições chegam ao mesmo efeito Meissner, ou seja, $T < T_c$ com $\mathbf{B} \neq 0$.

A levitação magnética que é observada por um ímã natural sobre um material supercondutor, ocorre devido ao resultado da repulsão entre o campo magnético do ímã e o campo \mathbf{B} causado pelas correntes superficiais no supercondutor sob $T < T_c$.

A equação da indução magnética [17, p.5] usada normalmente é descrita como:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (1.3)$$

mostrando que a indução magnética é diretamente proporcional a intensidade de campo \mathbf{H} , que depende do material (permeabilidade magnética correspondente ao valor $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A² no vácuo), onde a equação (1.3) é resultado da equação (1.7) que será vista mais a frente.

A magnetização \mathbf{M} [18] refere ao fenômeno de resposta do supercondutor diante do campo magnético aplicado \mathbf{H} , onde ocorre a indução magnética que se relaciona com a magnetização e o campo magnético (1.4).

O campo \mathbf{B} será uma quantidade simples comparado a \mathbf{H} , desde que \mathbf{B} seja a média do campo magnético microscópico através de um pequeno volume da amostra. Contudo, a magnetização \mathbf{M} pode ser observada na equação abaixo:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M}, \quad (1.4)$$

valida para uma resposta tanto dentro como fora da amostra ao campo aplicado, o que corresponderá a equação (1.3), quando $\mathbf{M} = 0$. A magnetização no vácuo pode ser escrita na forma:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}, \quad (1.5)$$

onde χ é a susceptibilidade magnética. Uma relação linear entre \mathbf{M} e \mathbf{H} implica uma equação linear entre \mathbf{B} e \mathbf{H} :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (1.6)$$

onde a permeabilidade magnética, μ , é obtida a partir da combinação das eq. (1.4) e (1.5):

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi). \quad (1.7)$$

O efeito Meissner ocorre nos supercondutores que se comportam como diamagnetos perfeitos, devido à exclusão do campo \mathbf{B} no seu interior. Entretanto, há de se ressaltar que o condutor ideal (condutor perfeito) também ocorre o cancelamento do campo \mathbf{B} e é chamado de diamagneto perfeito. A diferença entre um e outro é que, para o supercondutor, o tipo de material (ou amostra) e sua aplicação é feita por duas grandezas: uma é o campo \mathbf{H} aplicado e a outra a temperatura do material que deve estar abaixo da temperatura crítica, $T < T_c$ e no caso do condutor as correntes induzidas circulam na superfície do material e não há resistividade, pois pelas correntes persistentes o fluxo magnético total permanece nulo. Se forem usados, experimentalmente, a temperatura e o campo do ímã ao se ajustarem precisamente em um supercondutor, fará o campo magnético no interior também se ajustar automaticamente resultando na equação [1, p.258]:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = 0. \quad (1.8)$$

A magnetização do supercondutor a qual esse campo se ajusta internamente é conhecida como uma indução magnética \mathbf{B} . O efeito Meissner que ocorre nos supercondutores, mostrado nas figuras 1.5 e 1.6, ocorre quando se considera o campo $\mathbf{B} = 0$ no interior do supercondutor e a sua respectiva magnetização \mathbf{M} , dado pela equação (1.8), permitindo que a magnetização [1, p.258] fique:

$$\mathbf{M} = -\mathbf{H}. \quad (1.9)$$

Desta forma a susceptibilidade magnética poderá ser considerada pela derivada da magnetização \mathbf{M} pelo campo \mathbf{H} , conforme equações (1.5) e (1.9) equivalente a $\chi = -1$, ou seja, fica negativa porque o material (amostra) utilizado é diamagnético.

A partir da equação da indução magnética, a ser mostrada na página 26 pela equação (1.18), que apresenta um decaimento exponencial dentro da amostra [19, p.6], devido

ao campo \mathbf{B} tender a zero, no momento da aplicação do campo magnético, pode-se definir o comprimento de penetração de London do supercondutor.

A ¹London penetration depth λ_L (profundidade de penetração London) pode ser definida como:

$$\lambda_L^2 = c \left[\frac{\Lambda}{4\pi} \right] \quad \text{ou} \quad \lambda_L^2 = \frac{c}{e^2} \left[\frac{m}{4\pi n_s} \right], \quad (1.10)$$

onde Λ é um comprimento característico, c é a velocidade da luz, m é a massa do elétron e n_s é a densidade dos elétrons.

Os irmãos London (1935), ao desenvolverem sua teoria fenomenológica utilizaram um modelo de dois fluidos de elétrons, elétrons comuns e aqueles percebidos no estado supercondutor, ou seja, a resistividade nula e o efeito Meissner-Ochsenfeld [19, p.4], onde este efeito teve como uma de suas características o campo \mathbf{B} nulo ou expulsão do interior do supercondutor ($\mathbf{B}=0$). Os irmãos London consideraram ainda, que a densidade de portadores de carga era em parte constituída de superelétrons quando $T < T_c$ e com isto o movimento das correntes superficiais contribuíram para o campo \mathbf{B} não penetrar no interior da amostra. Eles ajudaram no desenvolvimento das equações a seguir, usando a equação de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_s, \quad (1.11)$$

onde $\mu_0 = +4\pi/c$ (permeabilidade magnética) e \mathbf{J}_s é a densidade de corrente.

Aplicando o rotacional em ambos os lados da equação (1.11) fica:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = - \nabla^2 \mathbf{B} = - \frac{\mu_0}{\Lambda} \mathbf{B}, \quad (1.12)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{\Lambda} \mathbf{B}. \quad (1.13)$$

¹ A existência de uma profundidade de penetração λ_L foi prevista em 1935 pelos irmãos London e 10 anos depois confirmado experimentalmente, o que é considerado como um importante passo na compreensão da supercondutividade. A concordância qualitativa entre a teoria e o experimento estabeleceu uma tradição que o eletromagnetismo, como representado pelas equações de Maxwell, deve ser aplicado para descrever o estado supercondutor. A supercorrente em estado estacionário em uma pequena secção pode ser representada por uma função de onda plana e o momento \mathbf{p} aparece na fase. Os Londons assumiram com base na consideração da Mecânica Hamiltoniana de um sistema de superelétrons, que a diferença de fase em dois pontos (R_1, R_2) na presença de um campo magnético \mathbf{B} tem componentes dinâmicas e de campo [20, p.237].

Substituindo, o comprimento característico $\Lambda = (\lambda_L^2 / \mu_0)$, na equação (1.13) fica:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{\lambda_L^2} \mathbf{B} , \quad (1.14)$$

onde a razão entre a permeabilidade magnética μ_0 e o comprimento característico Λ , é o inverso do quadrado do comprimento de penetração de London λ_L .

Se não houver geração de corrente no supercondutor, mas supercorrentes circulando durante o efeito Meissner, na equação (1.14), devido a aplicação do campo magnético na direção z ao longo da superfície da amostra, o campo \mathbf{B} poderá ser escrito como:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}(x) \hat{z} , \quad (1.15)$$

onde o campo magnético pode ser através da derivada:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial x^2} = \frac{1}{\lambda_L^2} \mathbf{B} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 \mathbf{B}(x) \cdot \hat{z}}{\partial x^2} = \frac{1}{\lambda_L^2} \mathbf{B} , \quad (1.16)$$

$$\mathbf{B}(x) = \mathbf{B}_1 e^{x/\lambda_L} + \mathbf{B}_2 e^{-x/\lambda_L} . \quad (1.17)$$

Se for aumentado x será escolhida a exponencial com sinal negativo, o campo $\mathbf{B} \rightarrow 0$ e chega-se a equação:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{-x/\lambda_L} . \quad (1.18)$$

onde x denota a dimensão espacial perpendicular à superfície da amostra muito pequena.

O campo magnético externo a partir de uma fonte de origem qualquer se desloca até o supercondutor, observado pelas curvas no gráfico da Figura 1.7, tendo uma mínima penetração no material supercondutor e devido às correntes superficiais, ele é expulso.

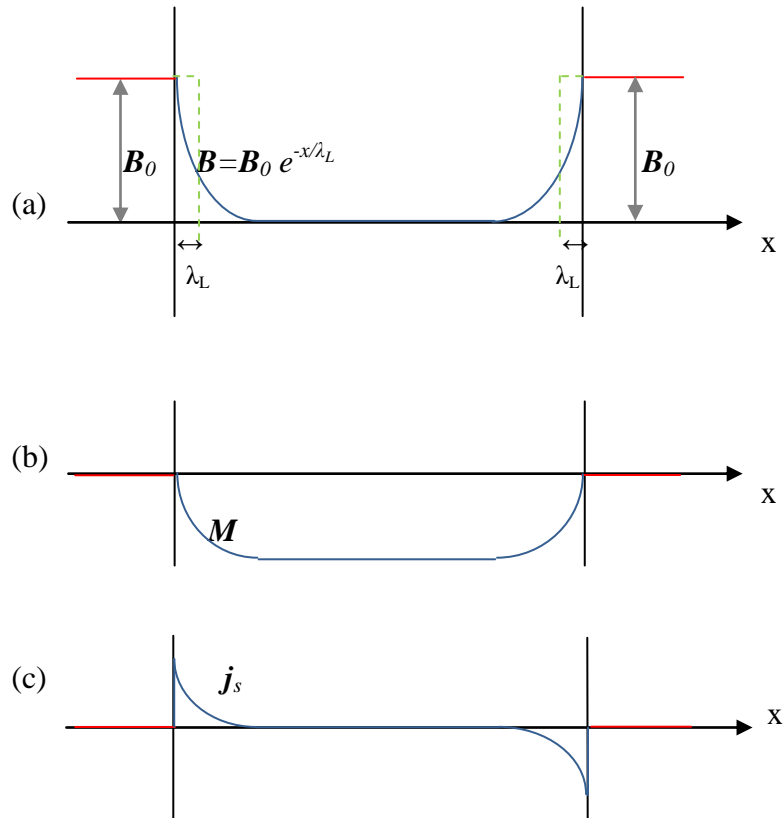


Figura 1.7. Desenho esquemático do efeito Meissner-Ochsenfeld diante de uma expulsão do campo magnético em uma placa uniforme. (a) Densidade de fluxo magnético B é igual para B_0 nos dois lados da placa, mas com baixa exponencialidade dentro da placa. (b) Densidade de magnetização M desaparece perto das faces da placa e expande-se no interior. (c) Magnetização é o produto de uma supercorrente j_s [17, p.8].

A penetração do campo magnético no supercondutor é superficial ou caracterizada como nula. Em (a) observa-se a intensidade do campo B_0 partindo de um valor e atingindo o material supercondutor (eixos y), em ambos os lados do material, que decai rapidamente a um valor muito pequeno, campo B , que se estabiliza em zero. Em (b) mostra a densidade M desaparecendo às proximidades do material supercondutor (eixos x , a partir do ponto zero), como um resultado do material reagindo à aplicação do campo magnético, onde há um momento magnético por unidade de volume, que se alonga pelo interior do material. Em (c) a densidade supercorrente j_s , a partir de um valor da magnetização M (eixo x), tem uma pequena elevação (eixo y), desaparece, como produto da supercorrente agindo (eixo y), onde circula somente dentro da *lei de penetração de London* próximo as faces do material supercondutor – a corrente passa a ter o sinal contrário em ambos os lados não havendo transporte de carga.

Na Figura 1.7(a), observa-se a penetração da indução magnética na superfície do supercondutor, campo B_0 , em ambos os lados, onde o comprimento de penetração λ_L é uma

pequena dimensão entre a superfície externa e o interior do supercondutor, devido o decaimento exponencial da indução magnética \mathbf{B} no momento da penetração, de acordo com a equação (1.18). As correntes superficiais de blindagem atuam na superfície do material supercondutor cancelando o campo \mathbf{B} [17, p.9].

A equação (1.14), como apresenta um Laplaciano ∇^2 de $\mathbf{B}(x)$ sendo zero, ela só pode ser utilizada se a solução no interior do supercondutor for de \mathbf{B} na direção z , ou seja:

$$\mathbf{B}_z(x) = \mathbf{B}_z(0)e^{-x/\lambda_L} \quad (1.19)$$

e desta forma, a equação (1.19), no momento da penetração do campo \mathbf{B} na amostra supercondutora, descreverá uma exponencialidade.

1.3. Aspectos da Teoria de Ginzburg-Landau

A supercondutividade teve sua primeira teoria explicada, em 1935, pelos físicos teuto-americanos Fritz London e Heins London, ao mostrarem a condutividade e o diamagnetismo perfeitos em supercondutores, onde seu desenvolvimento foi com base na teoria do eletromagnetismo elaborada pelo físico escocês Clerk Maxwell. Os irmãos London, em 1950, mostraram que a referida teoria poderia ser de origem, considerando a supercondutividade, como um fenômeno onde o momento dos portadores de carga tinha ordem de longo alcance [21; 22], ou seja, periodicidade e grau de simetria entre os elétrons.

Em 1937, Lev Landau desenvolveu um método que descreveu as transições de fase de segunda ordem, introduzindo um parâmetro de ordem que tendia a desaparecer quando a Temperatura fosse mais elevada que a T_c . Ele fez uma associação da passagem de uma fase a outra, relativa à mudança nas propriedades de simetria, vinculando a ideia do parâmetro de ordem, que ficaria nulo na fase simétrica e caso a fase fosse uma simetria menor, não ficaria nulo. Então, a equação que descreve o modelo de Landau para este parâmetro de ordem em séries de potências com a magnetização M foi: $F = F_0 + \alpha M^2 + \beta M^4/2 \dots$, onde F_0 é a energia para magnetização zero.

Conforme o método acima pode-se dizer que a uma dada T_c , chamada de temperatura de ²Curie ou ponto de Curie, onde as propriedades magnéticas de uma determinada substância passam por transformações quando estão a uma dada temperatura, onde analisa-se que o parâmetro de ordem utilizado de acordo com a teoria de Landau é representado por M .

² No final do século XIX, Pierre Curie mostrou que as propriedades magnéticas de uma dada substância sofrem transformações em uma certa temperatura, que ficou conhecida como ponto de Curie[21].

Para a teoria de Ginzburg-Landau, a base para o desenvolvimento da energia livre foi pelo modelo apresentado por Landau, tendo como desenvolvimento a expansão da energia livre por séries de potências do quadrado do parâmetro de ordem $|\Psi|^2$, devido à temperatura passar para valores abaixo da T_c , com mudanças no parâmetro de ordem que passa a ser a densidade dos elétrons supercondutores, n_s , ou seja, por $|\Psi|^2$, que também apresenta nos estudos, a transição de fase de segunda ordem, mostrando o termo f_0 como uma energia livre na fase normal e f como um termo usado para a construção da energia livre (com base na energia livre de Helmholtz), desprezados os termos de ordens mais elevados, ficando:

$$f = f_0 + \alpha |\Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\Psi|^4 + \dots \quad (1.20)$$

Os parâmetros α e β da equação (1.20) fornecem os dados que formam as curvas dos gráficos de funções de energia livre da Figura 1.8 [23, p.25; 24, p.311], onde a constante β fornece a concavidade da curva. Caso β seja negativo, para haver a energia mínima terá que ser fornecido um valor da energia para a densidade de elétrons supercondutores muito elevada, que não é viável, então o ideal é que seja β positivo para um valor de energia mínima tendendo a infinito abaixo do ponto crítico. A constante α como apresenta variação nas curvas, pode assumir valores negativos ou positivos sem divergências. E a variação da energia livre $f_s = f - f_0$, representada no gráfico a seguir será mostrada em função de $|\Psi|^2$:

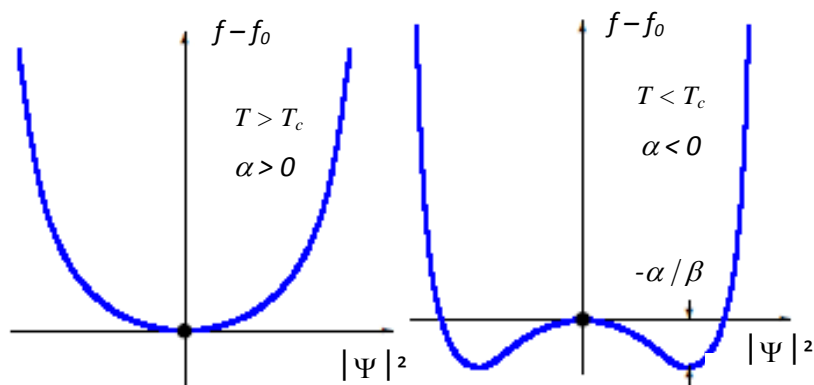


Figura 1.8. Curvas das Funções de Energias Livres.

Os gráficos da Figura 1.8 mostram a variação da energia livre em função da densidade dos elétrons $n_{s*} = |\Psi|^2$, onde observa-se o mínimo de energia livre pelo ponto da curva à esquerda, quando $|\Psi|^2 = 0$ para α positivo, ou seja, $\alpha > 0$ e $T > T_c$, significando um estado normal de uma amostra (material) supercondutora e pelo ponto, com decaimento da curva à direita, onde o mínimo ocorre quando $|\Psi|^2 = -\alpha/\beta$ para α negativo, com $\alpha < 0$ e

$T < T_c$, correspondendo ao estado supercondutor. Isto significa que a transição de fase é de segunda ordem [23, p.25], por isso o parâmetro de ordem deve vincular-se com a temperatura, ou seja, a variação da energia livre será diretamente proporcional ao parâmetro de ordem. Neste caso α será negativo para ter um mínimo de energia na densidade dos elétrons, diferente de zero e obter a relação:

$$\begin{aligned} \alpha(T) &= \alpha(T - T_c) & \text{para } T \leq T_c; \\ \alpha(T) &= 0 & \text{para } T > T_c. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Pelo gráfico da Figura 1.8, os mínimos de energia de serão mostrados pela:

$$\frac{\partial f}{\partial \Psi} = 0 \quad \rightarrow \quad 2[\alpha(T) + \beta |\Psi|^2] \Psi = 0. \quad (1.22)$$

E as soluções são:

$$\begin{aligned} \alpha > 0 &\rightarrow \Psi = 0 & \text{para } T > T_c; \\ \alpha \leq 0 &\rightarrow |\Psi|^2 = -\alpha/\beta = -\alpha(T - T_c)/\beta & \text{para } T \leq T_c. \end{aligned} \quad (1.23)$$

Vitaly Ginzburg e Lev Landau no ano de 1950 formularam uma teoria ao combinarem a eletrodinâmica dos supercondutores de London com a teoria de transições de fase de Landau, fazendo uma descrição fenomenológica e explicando a supercondutividade. A conhecida Teoria de Ginzburg-Landau contribuiu importantemente para o fornecimento das informações, que se basearam na introdução de um parâmetro, que dependia da posição “ r ” que seria uma medida da ordem dos portadores (partículas responsáveis pelo transporte de carga do material) no estado supercondutor, chamado parâmetro de ordem $|\Psi|^2$. Esse parâmetro de ordem foi assim denominado, por considera-lo como uma onda associada aos portadores supercondutores, onde foi construída uma função de onda $\Psi(r)$ para descrever o comportamento quântico das partículas [25, p.154].

De acordo com a teoria de Ginzburg-Landau, o estado supercondutor se caracteriza pelo parâmetro de ordem na forma complexa, tendendo a se anular estando acima da temperatura crítica T_c e com o seu módulo medindo o grau de ordem supercondutora na posição “ r ” estando abaixo da T_c .

O módulo quadrado equivale a uma densidade de superpartículas na forma:

$$|\Psi|^2 = \Psi^*(r) \Psi(r) = n_s^*(r), \quad (1.24)$$

onde n_s é a densidade de elétrons supercondutores, a partir de dois elétrons ligados [26, p.23-24], em que a função de onda terá um grau de ordem supercondutora, definido como parâmetro de ordem que retornará ao estado normal quando $T \geq T_c$.

Com esta orientação, ao passo que a Temperatura da amostra (material) aumenta com valores acima, mas bem próxima de T_c , a função $\Psi(r)$ vai diminuindo continuamente até zero e o comprimento de penetração de London, equação (1.10), tenderá a infinito.

O parâmetro de ordem [5; 11] pode ser escrito como:

$$\Psi(r) = |\Psi(r)| e^{i\theta(r)}, \quad (1.25)$$

de forma que $|\Psi(r)|^2$, represente a densidade de elétrons supercondutores. Sendo $\Psi(r) \neq 0$ no estado supercondutor e igual a zero no estado normal fica,

$$\begin{aligned} \Psi(r) &= 0 & \text{se } T > T_c \\ \Psi(r) &\neq 0 & \text{se } T < T_c. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Até este subitem do Capítulo 1 foram conceituados aspectos básicos para compreensão da supercondutividade, no subitem 1.6 serão analisadas as equações de GL.

1.4. Teoria BCS

A supercondutividade nos anos anteriores a 1957 ainda apresentava algumas dificuldades em seu entendimento para os efeitos a baixas temperaturas, relativas aos supercondutores do Tipo I, entretanto, os físicos americanos John Bardeen, Leon Cooper e John Robert Schrieffer propuseram uma teoria que explicava melhor este fenômeno da supercondutividade a baixas temperaturas críticas, relatando que os elétrons em um material supercondutor organizam-se em pares, conhecidos como pares de Cooper, que são interações entre os elétrons e os íons positivos que oscilam pela rede cristalina do supercondutor.

Esta teoria ficou conhecida como Teoria BCS, que significa as iniciais dos sobrenomes dos físicos Bardeen, Cooper e Schrieffer. Conforme a Figura 1.9, pode-se observar que neste fenômeno o elétron passa pelos íons e atrai os íons positivos mais próximos na rede, aumentando a concentração de cargas positivas.

Como um breve comentário, observe que os pares de Cooper atuam como ³Bósons, ou seja, como partículas de spin inteiro, porque podem se condensar a um mesmo nível de energia, em relação ao comportamento dos elétrons isolados.

De acordo com [28], “os íons estão presos à rede cristalina por forças elásticas, a região de alta densidade de carga se propaga pelo material como uma onda de vibração de rede, isto é, como um fônon.” .

O par de Cooper apresenta uma separação entre elétrons com spins e momentos opostos, a qual é uma distância de duas vezes o comprimento de coerência (2ξ) [29, p.26] onde este, é a distância entre dois elétrons ligados.

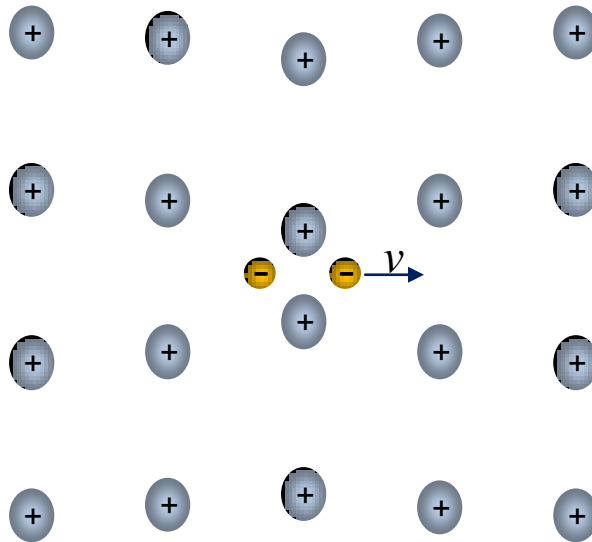


Figura 1.9. Íons positivos atraídos pelo elétron que passa pela rede cristalina do material supercondutor, fazendo interação elétron-fônon e finalmente formando par de Cooper.

Pela Teoria BCS, quando o supercondutor é submetido a altas temperaturas, ocorre agitação térmica na rede que é muito forte e acaba impedindo a formação desses pares de Cooper, tornando desordenado o movimento dos elétrons na rede cristalina, fazendo com que o material deixe de ser um supercondutor. O efeito da temperatura elevada, causa aos pares de Cooper a separação dos elétrons, onde a Teoria BCS se aplica às temperaturas muito baixas, as quais são utilizadas para os supercondutores do Tipo I.

³ O Postulado da simetrização nos diz que quando um sistema possui varias partículas idênticas, somente alguns kets do espaço dos estados podem descrever um sistema físico. Estes kets são, dependendo da natureza das partículas, completamente simétricos ou completamente assimétricos com respeito a permutação das partículas. Partículas que possuem vetores de estado simétricos são chamadas de bósons enquanto que as que possuem vetores de estado assimétrico são chamadas de férmion. [27].

Por esta valiosa descoberta da Teoria BCS, ao explicar as observações experimentais dos supercondutores do Tipo I, os físicos Bardeen, Cooper e Schrieffer receberam o prêmio Nobel, em 1972.

A Teoria BCS, contribuiu através do físico inglês Brian D. Josephson, em 1962, para a proposta de que dois materiais supercondutores, ao serem colocados separadamente a uma distância macroscópica com uma fina película isolante entre eles, o mais próximo possível de sua separação (na faixa de 30\AA), ocorria o movimento de elétrons de um supercondutor para outro, mostrando que mesmo quando diminuía este intervalo entre os elétrons (abaixo de 10\AA), os elétrons ainda circulavam e formavam pares de Cooper com tunelamento desses pares.

O fenômeno descrito acima fazia com que as correntes passassem através dessa junção, que ficou denominada de tunelamento de Josephson e à separação entre os dois supercondutores pela película isolante chamou-se de junção de Josephson. A corrente de tunelamento observada era quando não havia aplicação de tensão, conforme equação:

$$I = I_{max} \text{sen} (\delta_2 - \delta_1), \quad (1.27)$$

onde I_{max} é a corrente máxima que depende da espessura do material isolante e δ é a fase da função de onda dos pares de Cooper nos materiais supercondutores.

Por estas previsões e experiências que originaram este efeito, Josephson, em 1973, recebeu o Prêmio Nobel de Física.

1.5. Estudo das Equações de Ginzburg-Landau

1.5.1. Energia Livre de Ginzburg-Landau sem aplicação de Campo Magnético

Usando a expressão da energia livre de Helmholtz [24, p.75; 10, p.1037; 11, p.6] pela minimização da energia para determinação das variações da $\Psi(r)$, faz-se uma expansão em série de potências relativo ao parâmetro de ordem da teoria de Landau [24, p.309], que mostra as transições de fase de segunda ordem, para energia livre Ginzburg-Landau na ausência de campo \mathbf{B} , obtendo-se então, a energia livre de Ginzburg-Landau da fase supercondutora, da seguinte forma:

$$f_s(|\Psi|, T) = f_n(T) + \alpha(T) |\Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\Psi|^4 + \dots, \quad (1.28)$$

onde Ψ representa uma função de onda efetiva dos elétrons supercondutores e $f_n(T)$ é a energia livre no estado normal e os parâmetros fenomenológicos são dados por α e β . Para o mínimo de energia pela equação da energia livre serão utilizados até o termo contendo β .

Arrumando a equação (1.28) e derivando os termos com α e β fica:

$$f_s - f_n = \alpha |\Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\Psi|^4 \quad (1.29)$$

Na equação (1.29) [22, p.20-22] observa-se a diferença entre as energias f_s e f_n , que deverá apresentar valor mínimo para a energia livre natural no estado supercondutor em um valor próximo da Temperatura crítica. As derivadas de $f_s(|\Psi|, T)$ são dadas abaixo [24, p.310], para mostrar que a equação (1.29) fica naquela forma devido a simetria do sistema G.L.:

$$\frac{\partial f_s}{\partial |\Psi|^2} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2 f_s}{\partial (|\Psi|^2)^2} = \frac{\partial^2 f_s}{\partial |\Psi|^4} = \frac{\beta}{2} > 0. \quad (1.30)$$

Derivando [22, p.21] os termos da equação (1.29) fica:

$$\alpha + \beta |\Psi|^2 = 0, \quad (1.31)$$

$$|\Psi|^2 = -\frac{\alpha}{\beta}. \quad (1.32)$$

Para um mínimo de energia da densidade dos elétrons supercondutores não há divergência do parâmetro α que poderá ser tanto positivo como negativo e representa as formas diferentes mostradas na curva de função de energia livre da Figura 1.8. O parâmetro β deverá ser positivo para a mínima energia, pois representa a concavidade da curva (Figura 1.8), se for negativo a energia mínima e a magnetização muito grande, poderá haver divergência.

Os parâmetros fenomenológicos serão formulados em função da temperatura do material que deverá estar em um estado supercondutor abaixo [22, p.21; 24, p.311] da temperatura crítica ($T \leq T_c$), onde no ponto crítico o $H=0$ e $\alpha_c(T)=0$, mas próximo a este ponto o $\alpha(T)=\alpha(T-T_c) > 0$, isto implica na saída do primeiro termo α_c (tender a zero), visto na equação (1.21), conforme é verificado na forma a seguir:

$$\alpha(T) = \alpha_c + \left(\frac{d\alpha}{dT} \right)_c (T - T_c), \quad (1.33)$$

$$\alpha(T) = \left[\frac{d\alpha}{dT} \right]_c (T-T_c) , \quad (1.34)$$

$$\beta(T) = \beta(T_c) > 0 , \quad (1.35)$$

logo, próximo a T_c , a equação (1.35) ficará:

$$\beta(T) = \beta_c . \quad (1.36)$$

Pelas características do parâmetro de ordem em relação a densidade dos superelétrons em função de T e T_c , substituem-se os parâmetros fenomenológicos [9] de (1.34) e (1.36) em (1.32) e obtém-se:

$$|\Psi|^2 = - \left[\frac{d\alpha}{dT} \right]_c \frac{(T-T_c)}{\beta_c} . \quad (1.37)$$

Agora substituindo na equação (1.29), para $T < T_c$, o resultado do parâmetro de ordem $|\Psi|^2$ pela combinação das equações (1.34), (1.36) e (1.37), ficará da seguinte forma:

$$f_s = f_n - \left[\frac{d\alpha}{dT} \right]_c (T-T_c) \cdot \left[\frac{d\alpha}{dT} \right]_c \frac{(T-T_c)}{\beta_c} + \frac{\beta_c}{2} \left[\frac{d\alpha}{dT} \right]_c^2 \frac{(T-T_c)^2}{\beta_c^2} , \quad (1.38)$$

$$f_s - f_n = - \left[\frac{d\alpha}{dT} \right]_c^2 \frac{(T-T_c)^2}{\beta_c} + \frac{1}{2\beta_c} \left[\frac{d\alpha}{dT} \right]_c^2 (T-T_c)^2 , \quad (1.39)$$

$$f_s - f_n = - \left(\frac{\alpha^2}{\beta_c} - \frac{\alpha^2}{2\beta_c} \right) (T-T_c)^2 , \quad (1.40)$$

$$f_s - f_n = - \left(\frac{2\alpha^2 - \alpha^2}{2\beta_c} \right) (T-T_c)^2 , \quad (1.41)$$

$$f_s - f_n = - \frac{\alpha^2}{2\beta_c} (T-T_c)^2 . \quad (1.42)$$

As condições para os parâmetros fenomenológicos α e β , serem estimadas em função da temperatura, devem ser feitas pelo parâmetro de ordem $|\Psi|^2$, em função das T_c e T , devendo ser analisado quando a condição for:

- a) $\Psi = 0$, será zero o valor da equação (1.42); e
 b) $|\Psi|^2 \geq 0$, será maior ou igual a zero a equação (1.32).

Nas equações de G.L. acima, não estão sendo aplicados campo magnético, então observa-se que as temperaturas T e T_c influenciam no comportamento do supercondutor.

1.5.2. Energia Livre de Ginzburg-Landau com aplicação de Campo Magnético

Nesta parte do estudo das equações, será mostrado como fica a equação quando aplicado o campo magnético. As situações que podem ocorrer são as potências termodinâmicas variarem e a energia livre reagir aumentando para todo sistema. Desta forma o campo magnético aplicado deve ser somado aos termos da expressão da energia livre.

Pela equação (1.42) que apresenta as densidades de energias livres nos estados normal e supercondutor, já é possível fazer a estimativa do campo magnético crítico, que terá um ganho na condensação, observado pela equação:

$$f_s - f_n = - \frac{\alpha^2}{2\beta_c} (T-T_c)^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \mathbf{H}_c^2 \quad . \quad (1.43)$$

onde o último termo é a densidade de energia magnética.

A inclusão do campo magnético quanticamente pode ser através de:

$$\mathbf{p} = \frac{\hbar}{i} \nabla = -i \hbar \nabla \quad , \quad (1.44)$$

onde p é o momento linear canônico expresso como: $p = m.v + (e/c).A$, sendo A um vetor potencial magnético que atua sobre o supercondutor, levando a escrever a equação (1.44) como o momento mecânico na forma:

$$m.v = \mathbf{p} - (e/c).A = -i \hbar \nabla - (e/c).A \quad , \quad (1.45)$$

$$m.v = \mathbf{p} - \left[\frac{e}{c} \right].A = -i \hbar \left[\nabla - \frac{i e A}{\hbar c} \right] \quad , \quad (1.46)$$

trabalhando os termos da equação (1.46) fica:

$$\frac{\hbar}{i} \nabla = \frac{\hbar}{i} \nabla - e^* A \quad , \quad (1.47)$$

onde A é o potencial vetor e o *operador nabla* tem a seguinte forma:

$$\nabla \rightarrow \nabla \pm \frac{i e^* \mathbf{A}}{\hbar c}, \quad (1.48)$$

onde, os sinais \pm significam que o *negativo* é usado em Ψ e o *positivo* em Ψ^* .

O estado supercondutor por não ser homogêneo, ou seja, as regiões no interior da amostra serem diferenciadas devido ao tipo de material com resistividade elétrica, tendendo a aumentar ou a diminuir a densidade de superelétrons n_s , em função da temperatura abaixo ou acima da T_c [11, p.4], poderá apresentar uma energia livre que seja satisfatória, onde esta energia livre nas proximidades da transição de fase, tenha que ser mostrada em cada parte do supercondutor e assim, escrevê-la com uma integral de volume para cada uma parte, a seguir:

$$\int f[\psi] \cdot d^3r, \quad (1.49)$$

a qual será representada pela soma das energias livres do supercondutor,

$$f[\psi] = (f_c + f_K + f_H) [\psi], \quad (1.50)$$

onde constará desta soma as energias livres f_c (condensação por unidade de volume), f_K (cinética) e f_H (de campo magnético), que dependerá do parâmetro de ordem $|\Psi|^2$ utilizado na equação (1.29) que também pode ser reescrita na forma:

$$f_c = \alpha |\Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\Psi|^4. \quad (1.51)$$

A equação (1.29) não é o suficiente para que apresente um aumento de energia, sendo necessária na construção da energia livre, a consideração de três acréscimos de energias à energia livre de Ginzburg-Landau, as quais são as energias de condensação f_c , cinética f_K e do campo magnético f_H .

A integral de volume constará da energia livre do fluxo normal f_n e das três partes de energias livres citadas acima, onde estas energias de condensação, cinética do movimento dos superelétrons e de campo magnético, foram propostas pelos irmãos London [23, p.21]:

$$f_s = f_n + \int (f_c + f_K + f_H) [\psi] \cdot d^3r, \quad (1.52)$$

No segundo termo da integral da equação (1.52) utiliza-se o *operador nabla* que faz parte do momento linear, acompanhado do parâmetro de ordem $|\psi|^2$ para mostrar o movimento da energia cinética dos superelétrons:

$$f_K = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left| \nabla \psi \right|^2 , \quad (1.53)$$

$$f_K = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left| \left(\nabla - \frac{i e^* \mathbf{A}}{\hbar c} \right) \psi \right|^2 . \quad (1.54)$$

O terceiro termo da integral é o aumento da energia livre com a aplicação do campo magnético, a qual deve ser calculado pela integral da variação da energia livre de Ginzburg-Landau, com base na equação (1.4):

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M} \quad \therefore \quad 4\pi\mathbf{M} = \mathbf{B} - \mathbf{H} \quad , \quad (1.55)$$

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{B} - \mathbf{H}}{4\pi} \quad , \quad (1.56)$$

onde, $\mathbf{B} = 0$ no interior do supercondutor, conhecido como o efeito Meissner e a magnetização pode ser analisada pela equação (1.56), então a derivada fica:

$$df = d \left(\frac{\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}}{4\pi} \right) - \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} , \quad (1.57)$$

$$df = \frac{1}{4\pi} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{H} , \quad (1.58)$$

integrando a equação (1.58) obtém-se o termo f_H fica:

$$f = \frac{1}{4\pi} \int_0^H \mathbf{H} \cdot d\mathbf{H} , \quad (1.59)$$

$$f_H = \frac{\mathbf{H}^2}{8\pi} . \quad (1.60)$$

Utilizando a equação (1.52) e substituindo as energias encontradas das equações (1.51), (1.54) e (1.60), obtém-se a energia livre de Ginzburg-Landau com aplicação do campo magnético da seguinte forma:

$$f_s = f_n + \int \left\{ \alpha |\Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\Psi|^4 + \frac{\hbar^2}{2m^*} \left| \left(\nabla - \frac{ie^* \mathbf{A}}{\hbar c} \right) \Psi \right|^2 + \frac{\mathbf{H}^2}{8\pi} \right\} d^3r . \quad (1.61)$$

A equação (1.61) é a primeira equação que mostra a energia livre completa com o campo magnético aplicado, onde as funções Ψ e A minimizam o funcional desta energia.

1.5.3. Densidade de Corrente Supercondutora

A segunda das equações de Ginzburg-Landau tem como base a lei de Ampère, conhecida como equação de Maxwell [1, p.262], com a finalidade de descrever o fenômeno eletromagnético através do cálculo do campo \mathbf{B} partindo da distribuição de densidade de corrente elétrica \mathbf{J} , que na forma original é dada por:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{J}_s , \quad (1.62)$$

onde \mathbf{J}_s é a densidade de corrente elétrica e μ_0 é permeabilidade magnética no vácuo.

A equação (1.62), na forma diferencial, é escrita como:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} , \quad (1.63)$$

entretanto, elimina-se o segundo que está relacionado ao campo elétrico, em que neste caso não será utilizado na equação da supercondutividade, ficando apenas a forma (1.62), onde o campo \mathbf{B} pode ser expresso por:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} . \quad (1.64)$$

sendo \mathbf{A} o potencial vetor.

A densidade de corrente supercondutora [10, p.630-647; 30, p.26; 31, p.101] pode ser escrita pela expressão quântica:

$$\mathbf{J} = - \frac{ie^* \hbar}{m^*} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) - \frac{(e^*)^2}{m^* c} |\psi|^2 \mathbf{A} , \quad (1.65)$$

onde “ m^* ” e “ e^* ” [29, p.28] são a massa e a carga, respectivamente, dos superelétrons que formam os portadores de carga do estado supercondutor descrito por uma função de onda ψ , apresentada em módulo chamado parâmetro de ordem $|\psi|^2 = \psi^* \psi$ [9; 26, p.24]. Sabe-se que

na equação (1.25), tendo coerência no estado supercondutor mostrada pela fase θ e respectiva densidade dos superelétrons, aplicando-se o *operador nabla* e desenvolvendo-se os valores fica:

$$\nabla \psi = \nabla (|\psi| e^{i\theta}), \quad (1.66)$$

$$\nabla \psi = i \nabla |\psi| e^{i\theta} , \quad (1.67)$$

$$\nabla \psi = i \nabla \psi. \quad (1.68)$$

e da mesma maneira o seu conjugado fica:

$$\nabla \psi^* = \nabla (|\psi| e^{-i\theta}), \quad (1.69)$$

$$\nabla \psi^* = -i \nabla |\psi| e^{-i\theta} , \quad (1.70)$$

$$\nabla \psi^* = -i \nabla \psi^* , \quad (1.71)$$

Agora os valores de (1.68) e (1.71) são substituídos e organizados matematicamente na equação (1.65), obtendo-se os resultados a seguir:

$$\mathbf{J} = -\frac{i2\hbar e}{2m} (\psi^* i \nabla \psi + \psi i \nabla \psi^*) - \frac{(2e)^2}{2mc} |\psi|^2 \mathbf{A} , \quad (1.72)$$

$$\mathbf{J} = \frac{i\hbar e}{m} (-\psi^* i \nabla \psi - \psi i \nabla \psi^*) - \frac{4e^2}{2mc} |\psi|^2 \mathbf{A} , \quad (1.73)$$

$$\mathbf{J} = -\frac{i^2\hbar e}{m} (\nabla |\psi|^2 + \nabla |\psi|^2) - \frac{2e^2}{mc} |\psi|^2 \mathbf{A} , \quad (1.74)$$

$$\mathbf{J} = +\frac{\hbar e}{m} (2 \nabla |\psi|^2) - \frac{2e^2}{mc} |\psi|^2 \mathbf{A} , \quad (1.75)$$

$$\mathbf{J} = +\frac{2e|\psi|^2}{m} \left[\hbar \nabla - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right] . \quad (1.76)$$

Substituindo na (1.76) o parâmetro da (1.24):

$$\mathbf{J} = + \frac{e^* n_s^*}{m} \left(\hbar \nabla - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right) . \quad (1.77)$$

A densidade de corrente supercondutora encontrada na equação (1.77) é a forma mais simplificada ou deduzida, entretanto, a equação (1.65) atende a proposta na teoria de Ginzburg-Landau.

1.5.4. Comprimento de Coerência

Pela equação (1.61) utilizam-se os termos da energia livre de condensação e cinética, reescrevendo como:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \alpha \Psi + \beta \Psi^3 = 0 \quad (1.78)$$

Tem-se que o campo magnético contribui diminuindo a ordem supercondutora por intermédio da variável “ f ” [21, p.26], que representará uma função de onda dimensional $\Psi(r)$, escrita na forma de:

$$f = \frac{\psi(x)}{\psi_\infty} < 1 , \quad (1.79)$$

onde, $\psi(x)$ é a ordem que mostra os campos magnéticos e as correntes mais baixos e ψ_∞ é a ordem que mostra a dimensão do supercondutor na presença de supercorrentes, não havendo campo magnético no interior do supercondutor, o que leva a uma mudança de variável f da equação (1.79) em (1.78) para ser reescrita da seguinte forma:

$$-\left(\frac{\hbar^2}{2m^* |\alpha|} \right) \frac{d^2 f}{dx^2} + f - f^3 = 0 . \quad (1.80)$$

Este primeiro termo da equação (1.80) é o comprimento de coerência de G.L. [9] ao quadrado dado por:

$$\xi_{GL}^2 = \left(\frac{\hbar^2}{2m^* |\alpha|} \right) \quad \text{ou} \quad \xi_{GL} = \left(\frac{\hbar^2}{2m^* |\alpha|} \right)^{1/2} . \quad (1.81)$$

A distância onde os elétrons estão concentrados no interior do supercondutor é o comprimento de coerência ξ_{GL} (1.81) [9; 30, p.28].

Ginzburg e Landau procederam uma nova formulação, após a teoria da energia livre, sobre a razão entre o comprimento de penetração de London e o Comprimento de Coerência, conforme equação a seguir,

$$k = \frac{\lambda_L}{\xi_{GL}} , \quad (1.82)$$

onde k é a constante de Ginzburg-Landau e o comprimento de penetração de London [9; 26, p.27] é dado pela equação (1.11):

$$\lambda_L = \left[\frac{m c}{4\pi n_s e^2} \right]^{1/2} \quad (\text{entre os valores } 10^{-5} \text{ para } 10^{-6} \text{ cm}), \quad (1.83)$$

e Abrikosov define que [26, p.32], os supercondutores do tipo I e II, apresentam as seguintes condições para esta constante k : se for menor que $1/\sqrt{2}$ o supercondutor em questão é do tipo I e se for maior que $1/\sqrt{2}$ o supercondutor é do tipo II [29, p.34; 31; 32], ou melhor: do Tipo I: $k < 1/\sqrt{2}$; e do Tipo II: $k > 1/\sqrt{2}$.

A estimativa de k é procedida pelas medidas experimentais para achar H_{c1} e H_{c2} , desprezando o efeito do vórtice em linha contínua.

O comprimento λ_L tem uma magnitude que se relaciona com o n_s (número da densidade de elétrons supercondutores) dependente da temperatura que equivale a equação empírica [26, p.28] a seguir:

$$\lambda_L(T) = \frac{\lambda(0)}{[1 - (T/T_c)^4]^{1/2}} . \quad (1.84)$$

onde a equação (1.84) será demonstrada na Figura 1.14 pela Curva da dependência T .

O comprimento de coerência pode ser trabalhado na substituição da equação (1.81) em (1.80) que fica:

$$-\xi_{GL}^2 \frac{d^2 f}{dx^2} + f - f^3 = 0 . \quad (1.85)$$

Deve-se analisar que para uma magnitude de Ψ em termos de superfície [26, p.76] relativa ao comprimento ξ , a variável deve ser menor que um ($f < 1$) e reescrita com um termo linear $q(x)$ em relação a dimensão espacial x , de tal forma que seja:

$$f = 1 - q(x) . \quad (1.86)$$

Substituindo (1.86) em (1.85) obtém-se:

$$-\xi_{GL}^2 \frac{d^2 q(x)}{dx^2} + (1 - q(x)) - (1 - q(x))^3 = 0 . \quad (1.87)$$

Se for observado que o termo da ordem relativo a $(1 - q(x))^3$ pode ser feito na expansão em série e mantidos os termos da primeira ordem fica:

$$\xi_{GL}^2 \frac{d^2 q(x)}{dx^2} - 2q(x) = 0 \quad \text{ou} \quad -\frac{d^2 q(x)}{dx^2} + \frac{2q(x)}{\xi_{GL}^2} = 0 \quad . \quad (1.88)$$

$q(x)$ deve ter valor diferente de zero em relação a dimensão espacial x que é perpendicular a superfície do supercondutor e menor que um, e também, que seja $q(\infty) = 0$, para que a solução da equação (1.88) seja:

$$q(x) = q_0 e^{-\sqrt{2}(x/\xi_{GL})} \quad (1.89)$$

Da equação (1.88) combinada a (1.79) e a (1.89) obtém-se:

$$\Psi = \Psi_0 \tanh \left[\frac{x}{\xi_{GL}\sqrt{2}} \right] \quad (1.90)$$

A equação (1.90) mostra pela tangente hiperbólica, que no interior do supercondutor há um estado ordenado, relacionado ao comprimento de coerência, quando x for diferente de zero e a função Ψ ficar próxima de um, a qual será mostrada na Figura 1.15.

A melhor visualização do comportamento de ξ_{GL} e λ_L , em relação ao vórtice pode ser observado na figura abaixo [29, p.35]:

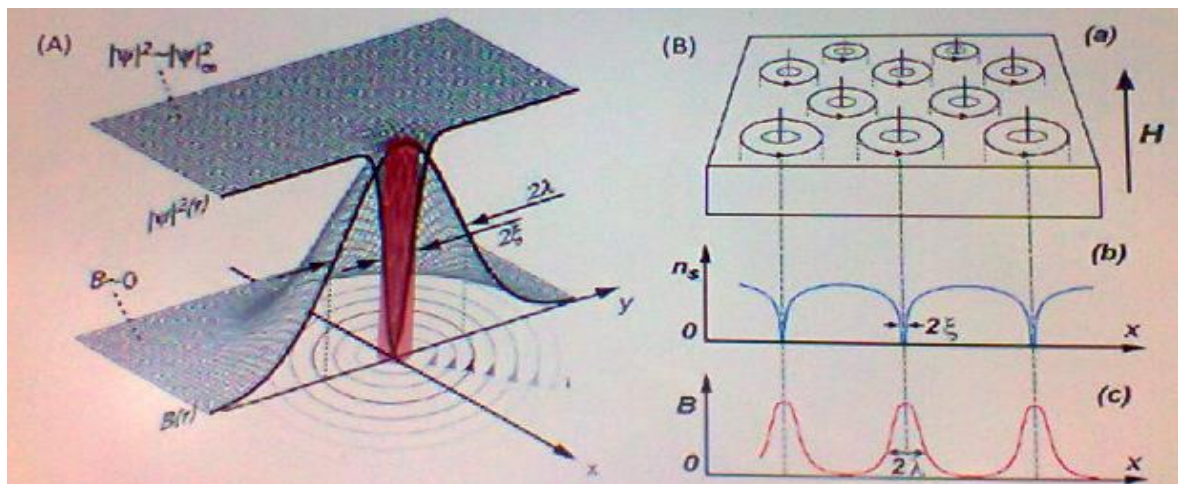


Figura 1.10. Esquema: (A) Vista 3D, comportamento do comprimento ξ no centro, em meio a estrutura do vórtice e mais afastado o comprimento λ_L . (B) Vista 2D, graficamente, desenho do vórtice acima (a), alinhado com os Comprimentos ξ e λ_L , (b) e (c), mostrando suas dimensões nos eixos x e respectivamente os eixos com os parâmetro de ordem n_s e o campo \mathbf{B} [29, p.41].

Na Figura 1.10, observa-se um supercondutor sendo submetido a aplicação do campo externo, onde o fluxo magnético vai até o limite de $2\lambda_L$, é excluído ($\mathbf{B}=0$) no interior e sofre a influência do vórtice que se mantém na forma cilíndrica, mostrado pela sua estrutura

com o comprimento de coerência visto bidimensionalmente 2ξ . Esse valor equivale ao diâmetro do cilindro retilíneo da estrutura de um vórtice e que fica paralelo ao campo que está sendo aplicado [33, p.36].

1.6. Análises das equações de GL

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve como atividades principais o estudo das equações de Ginzburg-Landau, a partir das teorias do fenômeno quântico da supercondutividade de Landau pelo parâmetro $|\Psi|^2$ que depende da T_c .

A expansão de $|\Psi|^2$ deve ser desenvolvida entorno de T_c , pois nessa região $|\Psi|^2$ é pequeno, então a energia livre pode ser expandida em série de potências, onde os termos de ordem mais elevados são desprezados e deste desenvolvimento, encontra-se a energia livre da fase supercondutora (1.27).

Mediante o desenvolvimento das equações de GL, as curvas nos gráficos das funções de energia livre (Figura 1.8) abaixo, foram construídas conforme as equações (1.29) que resultou na (1.32) combinadas uma com a outra para se chegar a (1.42). Os parâmetros α e β (1.34) e (1.35) em função da temperatura $T \leq T_c$ contribuíram, significativamente, para uma variação da energia livre com o parâmetro de ordem (1.37), obtendo uma função que levou à plotagem do gráfico.

$$|\Psi|^2 = -\frac{\alpha}{\beta} \quad ; \quad e \quad f_s - f_n = -\frac{\alpha^2}{2\beta_c} (T-T_c)^2 \quad .$$

Utilizando o programa “Maple” foram usadas as equações (1.29), (1.32) e (1.42), para plotagem da curva de variação da energia livre de Ginzburg-Landau em função de $|\Psi|^2$:

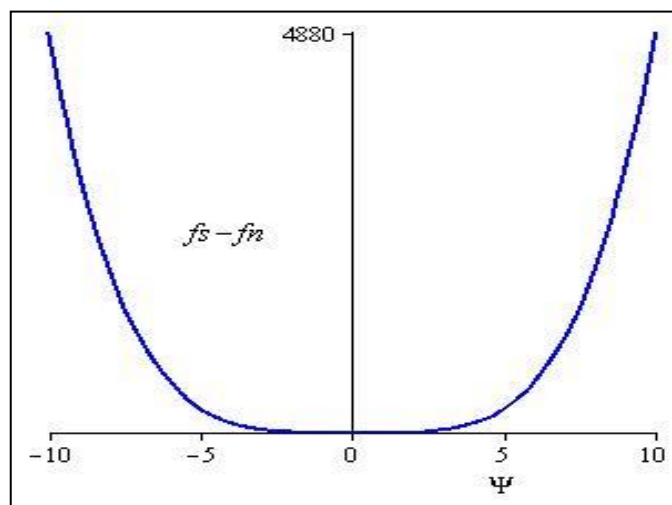


Figura 1.11. Curva da energia livre de G.L. no estado supercondutor para $\alpha > 0$ e $T > T_c$.

A Figura 1.11 mostra que pela minimização da energia livre de Ginzburg-Landau, equação (1.29) plotada, a variação das energias livres dependem dos parâmetros fenomenológicos, onde $\alpha > 0$ (positivo) e $\beta > 0$ (sempre positivo).

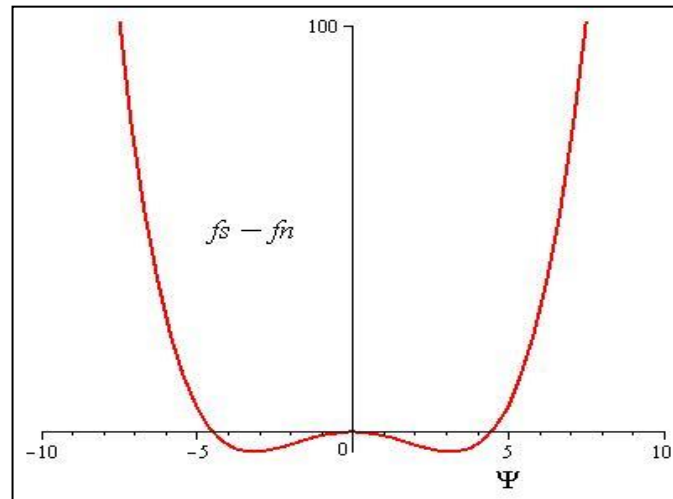


Figura 1.12. Curva da energia livre de G.L. no estado supercondutor para $\alpha < 0$ e $T < T_c$.

Na Figura 1.12 foram usadas as mesmas equações da Figura 1.11, onde a curva começa no zero entre os eixos do parâmetro $|\Psi|^2$ e da variação de energia ($f_s - f_n$), em que a partir do eixo da variação da energia livre, apresenta tanto para a esquerda como para a direita mínimas concavidades para baixo, devido $\alpha < 0$ (negativo) para $T < 0$, onde ocorrem a mínima energia e pequeno aumento de $|\Psi|^2$, mostrando que a relação $(-\alpha^2/2\beta)$ naquele espaço formado pela curva, pode ser relacionado com a aplicação do campo magnético mostrado na equação (1.60), $H^2/8\pi$, seguida da elevação dessa curva em forma de chapéu.

Com os dois gráficos (Figura 1.11 e 1.12) observa-se que sendo $\beta > 0$, sempre positivo, só há um parâmetro a definir o mínimo de energia que dependerá de α . Quando $\alpha > 0$ (positivo) o mínimo virá pelo parâmetro $|\Psi|^2 = 0$, estado normal e quando $\alpha < 0$ (negativo) o mínimo virá pela equação (1.32), que será o estado supercondutor.

Foram desenvolvidos os cálculos para a equação da energia livre de G.L. (1.61), mediante três equações, incluindo a energia livre no estado supercondutor, ou seja, a energia de condensação, a energia cinética e o campo magnético.

Como há uma dependência da aplicação do campo magnético, em termos de espaço, foi analisado que há um desvio do campo B_0 na superfície do supercondutor, com

uma pequena penetração da indução magnética, conhecida como comprimento de penetração λ_L , situado na superfície interna.

O decaimento exponencial da indução B é observado na Figura (1.13) a seguir:

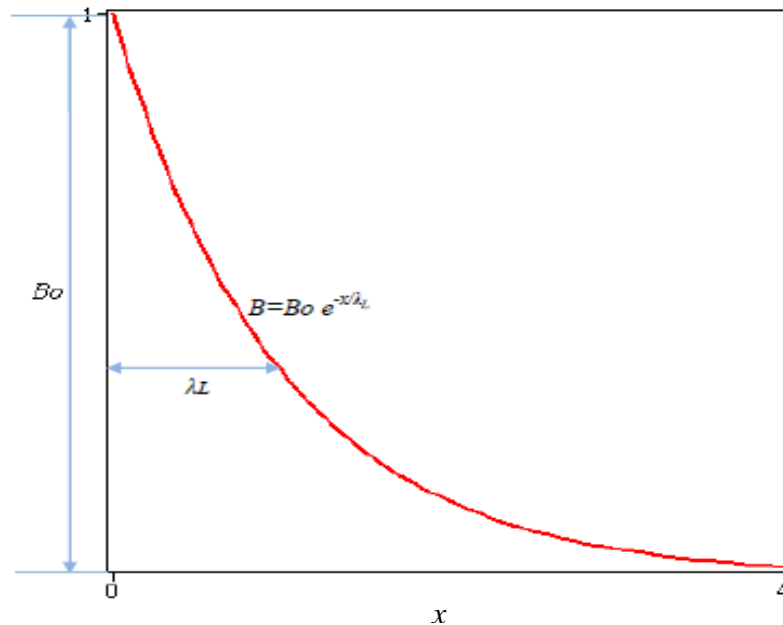


Figura 1.13. Curva do comportamento da aplicação do Campo B_0 na superfície do supercondutor, entre os estados normal e o supercondutor, mostrados pela exponencialidade no comprimento λ_L .

A partir da linha exponencial o campo B_0 não penetra na superfície do supercondutor, o que se explica fisicamente o efeito Meissner pela característica da exclusão do campo magnético do interior do material (amostra), devido a supercorrente (corrente de blindagem) induzida na superfície do material internamente fazer o cancelamento do campo magnético externo.

Com esta exponencialidade na curva (Figura 1.13), foi definido que existe o comprimento λ_L , o qual é uma distância a partir da penetração do campo aplicado na superfície e o interior do supercondutor, em que este campo aplicado externamente decai exponencialmente até zero dentro do supercondutor. Desta forma, pela equação (2.57) foi plotada a curva de dependência da temperatura do comprimento $\lambda(T)$:

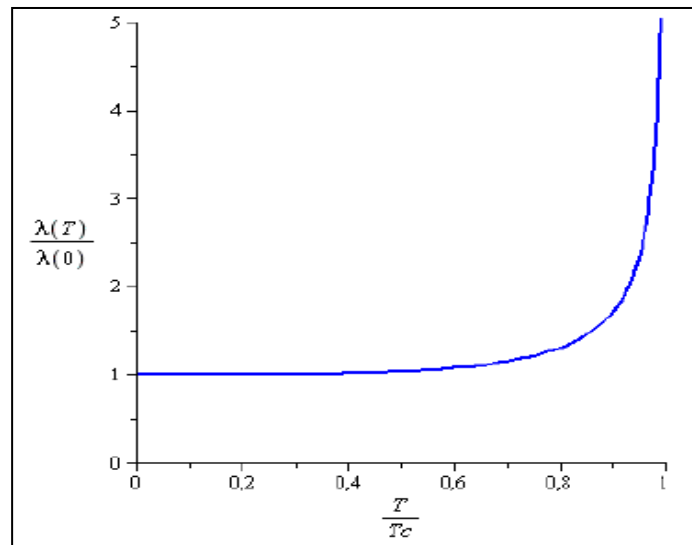


Figura 1.14. Curva de dependência da temperatura para o comprimento de penetração de London $\lambda(T)$.

A grandeza de λ_L está envolvida com o número da densidade dos elétrons supercondutores n_s que dependente da aplicação da temperatura no supercondutor, por isso a curva teve a concavidade acentuada, mostrando que ocorre uma pequena penetração de London, em virtude da temperatura permanecer mais tempo no interior do material, abaixo da T_c do que na superfície, entre a região externa, onde há uma variação entre a temperatura normal e a T_c , que conforme vai aumentando o valor de T , aumenta também a penetração de London. Esta região é a que está entre os estados normal e supercondutor.

A energia livre de GL foi minimizada e ficou dependente de Ψ para que haja um funcional, assim, no desenvolvimento das equações (1.78) a (1.88), teve essa relação para mostrar o estado ordenado dos superelétrons no interior do supercondutor e chegar a equação (1.90) geradora da curva da Figura 1.15:

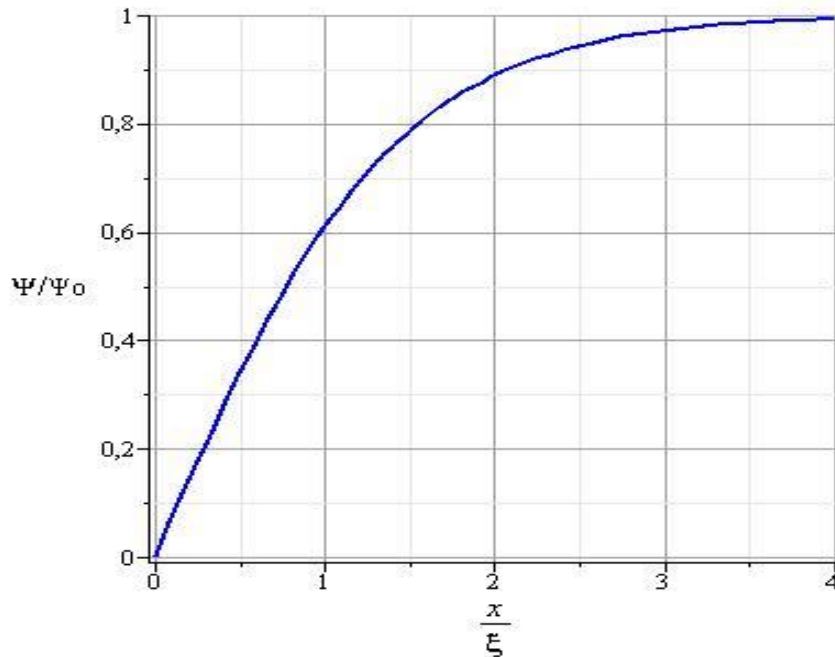


Figura 1.15. Curva de dependência do parâmetro Ψ com a função x e o comprimento de coerência ξ .

A equação (1.90) relaciona a razão entre os parâmetros Ψ/Ψ_0 que terá um funcional no supercondutor quando $\Psi \rightarrow \Psi_0$ para $x \rightarrow \infty$ e $\Psi \rightarrow 0$ para $x \rightarrow 0$, e a tangente hiperbólica mostrada pela curva, havendo um estado ordenado dos superelétrons em relação ao comprimento ξ .

1.7. Aplicações da supercondutividade

Nas tecnologias os materiais supercondutores tem boa aplicabilidade por conduzir corrente elétrica sem perdas de energia, não há dissipação de calor, produzem grandes campos magnéticos e são usados na fabricação de chaves supercondutoras (junções Josephson) semelhantes aos transistores.

As aplicações também são para veículos de transporte de passageiros, armazenamento de energia elétrica [34], equipamentos de uso médico-hospitalar, motores para transformação de energia elétrica e equipamentos supercondutores.

1.7.1. Primeiras aplicações da supercondutividade

A primeira aplicação da supercondutividade foi para a fabricação de fios supercondutores de Nb_3Sn , $NbZr$ e $NbTi$, utilizados em equipamentos de ressonância magnética em hospitais, laboratórios de pesquisas e eletroímãs do LHC (Larger Hadrons Colisor) conhecido como o Grande Acelerador de Partículas, com sua localização entre

Suíça e França conforme a Figura H.1(a) e um trecho do interior das instalações do acelerador de partículas observado na Figura H.1(b) (ver *Apêndice H*).

1.7.2. Aplicações em Levitação Magnética

A aplicação de supercondutores em levitação magnética ficou muito conhecida quando os japoneses construíram o trem MAGLEV (magnetic levitation) nos anos 70, com capacidade de levitar magneticamente a altura de 10cm da superfície linear, pela força de repulsão magnética e desenvolver velocidade aproximada de 500km/h. Sua tecnologia é baseada na energia magnética de grandes ímãs acoplados, ou seja, são utilizadas bobinas supercondutoras com capacidade de criar fortes campos magnéticos, colocadas nas laterais da pista de circulação do trem (Figura H.2). Estas bobinas são atendidas por uma corrente trifásica proveniente de uma subestação, com o objetivo de deslocar o campo magnético conduzindo o trem por esta pista. E este tipo de tecnologia foi desenvolvido também pela Alemanha e China. No Brasil, existe o MAGLEV Cobra, sendo desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (*Apêndice H*).

1.7.3. Aplicações em vários equipamentos

As aplicações estão voltadas ainda, para os equipamentos de biomedicina, metrologia, geofísica, processamento digital e dispositivos, assim como, em equipamentos magnéticos com multifilamentos, ressonância magnética (Figura H.3, *Apêndice H*) para imagens, usinas de armazenamento de energia, dentre outros.

Na medicina são utilizadas as aplicações de SQUID (*superconducting quantum interference device*) com as junções Josephson, através de bobinas supercondutoras para obtenção de imagens de alta resolução por ressonância magnética [34]. Os SQUID são formados por duas junções Josephson ligadas em paralelo e possibilitam a medição de campos magnéticos muito fracos, equivalentes a 10^{-15} T, que permitem diagnosticar anomalias através de exames do coração, cérebro, órgãos e outras partes do corpo humano.

Na transformação de energia, a utilização de supercondutores pode contribuir para um ambiente com mínima poluição, desenvolvimento de campo magnético muito mais potente, podendo ser instalado em gerador bem pequeno, em relação ao gerador convencional de grande porte com a mesma transformação de energia.

Outras aplicações estão no desenvolvimento das máquinas, motores elétricos e cabos para linhas de transmissão elétrica.

1.7.4. Armazenamento de energia

No armazenamento de energia, existe um sistema chamado *Superconducting magnetic energy storage* (SMES), que traduzido quer dizer: Supercondutor magnético de armazenamento de energia, construído com uma grande bobina magnética supercondutora de corrente contínua (CC) (veja Figura H.4(a) e (b) do *Apêndice H*). O SMES pode ser convertido de volta para corrente elétrica AC. Deve trabalhar com baixas temperaturas refrigeradas por hélio líquido – estando disponível comercialmente e se for utilizado a altas temperaturas será resfriado por nitrogênio líquido (ainda em fase de desenvolvimento). A base para o trabalho de pesquisa da SMES foi na década de 60, por vários grupos de pesquisadores, dentre eles os Estados Unidos da América, Japão e Europa [35].

O SMES é construído em local subterrâneo para armazenamento de grandes quantidades de energia elétrica por longos períodos de tempo, tendo em vista possuir corrente persistente (supercondutor com corrente que dura por tempo indeterminado), onde pode ser conectado a rede populacional. Este processo pode ser usado para atender nos períodos de baixa demanda de energia elétrica convencional, onde o excesso seria guardado pelo SMES para suprimento nos momentos de necessidade no fornecimento de energia elétrica.

Os sistemas do SMES são grandes e geralmente utilizados por períodos curtos, como eventos de comutação de serviços públicos.

1.7.5. Aplicações em outras áreas conhecidas

Na aplicação da área de Física para as altas energias, os magnetos supercondutores possibilitam a produção de campos magnéticos muito potentes, que podem ser utilizados em equipamentos de grande porte como os aceleradores de partículas (Figura H.1a,b). E na área de energia nuclear, os supercondutores podem ser aplicados a reatores de fusão nuclear.

Desta forma foram colocadas a maioria das aplicações da supercondutividade que podem atender ao aproveitamento de energias nas tecnologias que o mundo precisa para ajudar na redução das externalidades negativas relacionadas com a preservação ambiental.

Capítulo 2

Procedimentos Metodológicos

2.1. Objetivos

Apresentar métodos e materiais para a compreensão do conhecimento dos mapas conceituais e a utilização do *software Cmap Tools*.

Mostrar métodos de aprendizagem que contribuem para a compreensão de conteúdos ministrados da teoria Física, com visualizações de imagens e vídeos contendo simulações de experimentos, como por exemplo os da supercondutividade, detalhando o comportamento de um supercondutor quando resfriado a uma $T < T_c$, tais como o exemplo da levitação magnética de um ímã colocado sobre um supercondutor.

Destacar que os materiais utilizados, como computador por parte de quem está aprendendo, são essenciais para a aprendizagem, pois fazem parte das tecnologias de comunicação atuais e são muito usados na aprendizagem, construtivamente, para a melhoria da qualidade de transmissão dos conhecimentos e da aplicabilidade tanto de quem está ministrando, como do aprendiz, contribuindo ainda, para a interação instrutor-aprendiz [36].

2.2. Materiais e Métodos

Os métodos utilizados foram descritivo, qualitativo e quantitativo, mediante as pesquisas bibliográficas e de campo, com base na teoria supercondutividade e outras teorias da Física, onde se utilizaram a ferramenta Mapas conceituais e o *software Cmap Tools*.

O método de utilização de mapas conceituais começa com uma pesquisa preliminar de campo sob o tema: “Os Mapas Conceituais dos conteúdos específicos da Física Clássica e da Física Moderna: ferramenta metodológica no processo de ensino/aprendizagem na graduação em Física” [37], que contou com a participação de alunos de graduação em Física, da Universidade Federal do Amazonas, realizado no mês de janeiro de 2012, conforme *Apêndice B*, utilizando graus de Conhecimento e de Relevância na avaliação dos resultados. Finalizou-se com um Trabalho completo apresentado ao “VII Congreso Internacional de Didácticas en las Ciencias, XII Taller Internacional sobre la Enseñanza de la Física”, na cidade de Havana – Cuba, no período de 19 a 23 de março de 2012, com publicação Internacional eletrônica sob o registro ISBN 978-959-18-0780-9.

O objetivo da pesquisa acima é saber qual o grau de relevância na aceitação de mapas conceituais pelos acadêmicos, utilizando-se do método do questionário feito em papel A4, contendo onze questões sobre o respectivo tema, que foram entregues a acadêmicos de Física, com o propósito de que o método fosse conhecido e comprovado quanto à compreensão de conteúdos através do método da informação apresentada.

O método de aplicação de um minicurso foi pelo planejamento e divulgação para três dias, com carga horária de 20 horas, sob o tema: “Supercondutividade: avaliação de conhecimentos através dos Mapas Conceituais”, para o período de 03 a 05 de dezembro de 2012, destinado a graduandos e graduados da área de Física e áreas afins.

2.3. Mapas conceituais sobre Supercondutividade

Os mapas são como instrumentos conceituais-interpretativos ao relacionar os conceitos com as interpretações, por intermédio de diagramas dentro de hierarquias, que serão mostrados em uma estrutura conceitual [38, p.16].

Os mapas conceituais são utilizados como instrumentos para transmitir as informações de um determinado tema, visando conceituar e facilitar a compreensão do conteúdo ministrado. O aluno, interessado em adquirir conhecimentos, participa e constrói o mapa. O aluno, pelo interesse em aprender, provavelmente, tem um conhecimento pré-existente, que o ajuda em seus planejamentos e organização curricular e o instrutor pode usar os mapas como instrumentos avaliativos [39, p.58].

O modelo de mapa mostrado na Figura 2.1 [18; 40, p.12] destaca as características da supercondutividade:

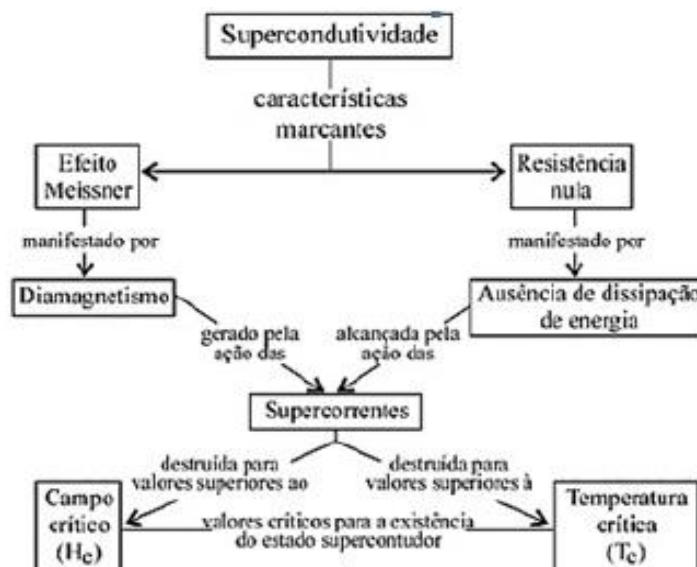


Figura 2.1. Modelo de mapa conceitual de características da supercondutividade [40].

O exemplo do modelo de mapa conceitual [18], permite compreender as características principais da supercondutividade, destacando o efeito Meissner e a sua Resistência nula, devido à manifestação de diamagnetismo e respectivamente, a ausência de dissipação de energia, pela ação das supercorrentes na superfície do material que são destruídas para valores acima do campo H_c e temperatura T_c , do estado supercondutor sob a ação de um campo magnético.

2.4. Mapas conceituais como ferramenta metodológica

A utilização dos mapas conceituais é uma metodologia atual que aos poucos vem sendo adotada como ferramenta metodológica pelas Ciências Exatas e da Terra, onde tal recurso visa contribuir para compreensão dos conteúdos relativos a Supercondutividade, a qual é uma parte disciplina de mecânica quântica que tem um grau de complexidade.

O uso de mapas conceituais tem sido amplamente divulgado pela internet, ajudando na obtenção de informações sobre a utilização desta ferramenta no processo de ensino/aprendizagem de várias instituições e de pessoas que divulgam trabalhos, artigos, blogs, dentre outras. Para esta pesquisa isto permite compreender que as informações adquiridas por este meio contribui, em termos de conceitos sobre a supercondutividade, para sua adoção no meio acadêmico.

É interessante fazer essa pergunta: - Existe uma concepção sistêmica para o trabalho com a ferramenta metodologia dos mapas conceituais em física geral e teórica?

A resposta é: - Sim. Porque a ferramenta mapas conceituais contribui, construtivamente, para a orientação e avaliação dos conhecimentos adquiridos pelos discentes durante o ensino-aprendizagem em física geral e teórica.

O fator principal dos mapas conceituais em sala de aula ou no processo de ensino-aprendizagem é possibilitar ao professor avaliar o grau de compreensão do conhecimento físico e a aplicação sistêmica.

Os mapas conceituais poderão ser construídos manualmente ou através do “software” “*Cmap Tools*” (Apêndice D), que é um programa gratuito e em português, contendo dezenove idiomas para construção de mapas, encontrado na internet pelo site brasileiro: <http://cmaptools.softonic.com.br/>, onde o “Softonic” é uma ferramenta gratuita para downloads rápidos e instalação do programa no computador.

A vantagem do “Software” é que podem ser construídos ou criados mapas conceituais com variados conceitos ou proposições, dentro da hierarquia dos temas a serem

conceituados, permitindo abrir várias caixas que se ligam por setas, podendo ser escritas entre elas as indicações de cada conceito e fazer ramificações para outros conceitos.

Depois de realizada todas as etapas de construção ou criação do mapa conceitual, pode-se formatá-lo e depois salvá-lo em pasta no computador.

O programa ou sistema [41] é uma ferramenta para o processo de construção de mapas conceituais individuais, podendo ser compartilhada com outros aprendizes, sob a orientação do instrutor. Depois de construído, formatado e salvo, pode ser enviado por correio eletrônico ou por outros meios de comunicação para visualização por outras pessoas.

Na utilização de mapas conceituais na supercondutividade foram construídos alguns modelos pelo autor, no *software Cmap Tools*, para compreensão da sua aplicação:

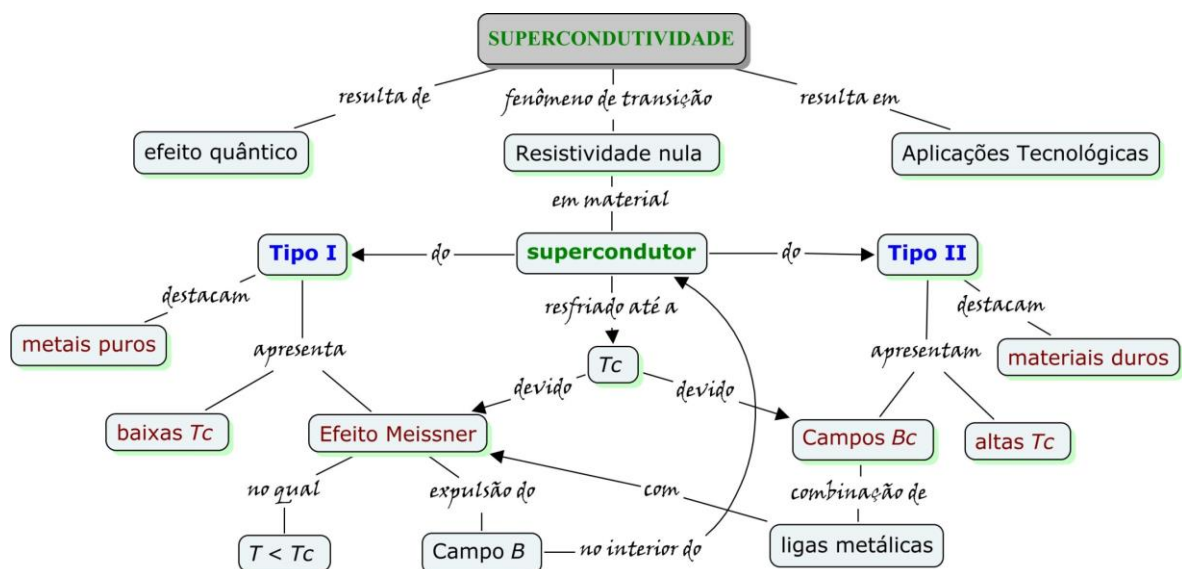


Figura 2.2. Modelo de mapa conceitual da supercondutividade: do fenômeno à aplicações tecnológicas.

Neste modelo de mapa, observa-se que na supercondutividade resulta de efeito quântico, com uma visão macroscópica, por ser um fenômeno de transição que apresenta resistividade nula em materiais supercondutores divididos em dois tipos, os do Tipo I, metais puros, pelas características dos materiais apresentarem o Efeito Meissner, com a expulsão do campo **B** do interior do material supercondutor, na aplicação de campo **B** fraco à temperatura abaixo da temperatura crítica ($T < T_c$) e do Tipo II, materiais duros, pelas características de apresentarem temperaturas mais altas, devido a combinação de ligas metálicas submetidas a campo **B** com ou sem o efeito Meissner entre campos críticos (B_c).

E no próximo modelo de mapa são mostradas algumas das aplicações da supercondutividade, construído pelo autor no *software cmap tools*, como forma de ser utilizado em explicações ou apresentações.

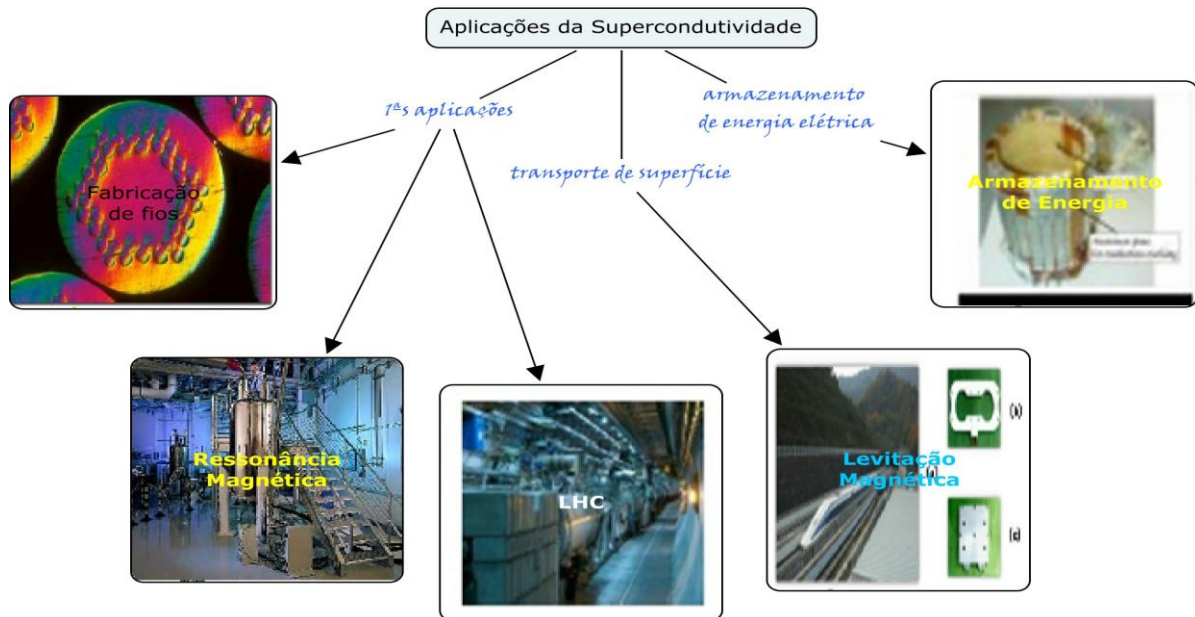


Figura 2.3. Modelo de mapa conceitual de aplicações da supercondutividade.

Neste modelo observa-se que as aplicações da supercondutividade teve suas primeiras aplicações nas fabricações de fios supercondutores de Nb_3Sn , $NbZr$ e $NbTi$, em equipamentos de Ressonância Magnética e em laboratórios de pesquisas, dentre eles os eletroímãs do LHC (Grande Colisor de Hádrons), seguido das aplicações em Levitação magnética, como a dos trens MAGLEV do Japão, o protótipo MAGLEV COBRA da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e os da Alemanha, da China e da França e uma das mais interessantes das aplicações é a do armazenamento de energia elétrica, como o caso da SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) nos Estados Unidos.

Os modelos de mapas conceituais mostrados nas Figuras 2.2 e 2.3 são comprovações de que com mapas conceituais, contribui para a ministração de aulas desde um simples conteúdo a um conteúdo mais complexo.

2.5. Pesquisa de campo sobre a utilização de Mapas Conceituais

O objetivo desta pesquisa de campo é saber sobre o grau de aceitação dos Mapas Conceituais na Graduação de Física. Sua realização foi por intermédio de convite aos pesquisados (alunos de Física da UFAM) a participarem desta pesquisa em duas etapas: a primeira com entrega pessoal de um questionário com 11 questões abertas e fechadas (*Apêndice B*) a 20 participantes e a segunda com envio dos questionários por correio eletrônico a 25 participantes, que ocorreu no dia 12 de janeiro de 2012, em horários de tempos

previstos para aulas a partir das 8:00 horas, nos períodos de manhã, tarde e noite, embora fosse em períodos de férias e cursos de férias, foi possível realizar a pesquisa.

A pesquisa com duração de três dias teve como tema apresentado no questionário: “Os Mapas Conceituais dos conteúdos específicos da Física Clássica e da Física Moderna: ferramenta metodológica no processo ensino/aprendizagem na graduação de Física”, com participação inicial prevista para 45 alunos inscritos e regularmente matriculados na graduação de Física da UFAM, de Bacharelado e de Licenciatura, com orientações do instrutor de que os questionários eram individuais, onde cada um dos pesquisados poderiam pesquisar em material didático e pela *internet* sobre como criar ou construir mapas conceituais relacionados ao tema e os mapas poderiam ser feitos tanto com lápis ou caneta esferográfica preta, ou então, pelo programa “*Cmap Tools*” encontrado gratuitamente pela *internet*, onde poderia ser baixado no computador individual. A forma de avaliação dos participantes era pela entrega dos questionários, individual ou pelo correio eletrônico.

2.6. Aplicação de um Minicurso

A realização do minicurso foi em três dias, para uma carga horária de 20 horas, sob o tema: “Supercondutividade: avaliação de conhecimentos através dos Mapas Conceituais”, no período de 03 a 05 de dezembro de 2012, na UFAM, onde o 1º dia (08 horas) entrega do questionário 1 contendo dez questões objetivas (*Apêndice E*), seguido da ministração sobre supercondutividade usando recursos expositivos com slides e vídeos das aplicações sobre o conteúdo lecionado; o 2º dia (04 horas) lecionado sobre os mapas conceituais e aplicações com o *software Cmap Tools* pelos mesmos recursos anteriores; e o 3º dia (08 horas) entrega do questionário 2 com dez questões objetivas e uma para criação do mapa conceitual (*Apêndice F*), com atividades práticas relativas aos conceitos e aplicações da aprendizagem, reservando a parte da manhã para os aprendizes realizarem as tarefas e a parte da tarde para a elaboração dos mapas no *software Cmap Tools*, com a utilização de *notebook*, acompanhados e orientados pelo instrutor, assim como, a entrega e o envio dos trabalhos diretamente ao instrutor ou via correio eletrônico. A utilização do *software Cmap Tools* (*Apêndice D*), requer a realização de pesquisas pela internet, onde o site que disponibiliza tais recursos é o “softonic.com.br”, no idioma português, *software* livre (gratuito).

A justificativa para o minicurso se deve pela compreensão do tema apresentado, sobre “supercondutividade: avaliação dos conhecimentos através dos mapas conceituais”, por parte de acadêmicos de graduação em áreas de Física e afins, assim como graduados, procurando mostrar que os acadêmicos podem assimilar o aprendizado, transmiti-lo e serem

avaliados através da criação dos mapas conceituais. E quando se trata de conteúdos complexos como a supercondutividade, que é um fenômeno quântico macroscópico, as dificuldades de compreensão da parte de quem está aprendendo, se tornando ainda mais desafiadoras, mostrando que merecem maior atenção e melhor qualidade na apresentação dos conteúdos.

O minicurso com relação ao tema apresentado teve que ser dividido em três partes, objetivando fazer com que os graduados ou graduandos tenham: 1º) Compreensão da Supercondutividade e suas aplicações; 2º) Compreensão dos Mapas Conceituais e suas aplicações; e 3º) Compreensão da utilização do *software Cmap Tools* com os conhecimentos adquiridos em supercondutividade e mapas conceituais.

As aulas foram planejadas e preparadas para serem ministradas em sala de aula, com recursos de *Datashow*, vídeos de aplicações e educativos sobre a supercondutividade e suas aplicações na esfera das tecnologias, contando com a participação dos alunos de graduação ou graduados de qualquer Instituição de Ensino, onde a divulgação do minicurso seja através de minicartazes afixados nos quadros de avisos da própria UFAM, com todas as informações pertinentes a sua realização.

A forma de avaliação dos participantes se fará pela presença nos dias de aulas e mediante os trabalhos propostos pelo instrutor, tais como, os questionários 1 entregue no primeiro dia e o questionário 2 entregue no último dia, seguido da criatividade na elaboração dos mapas conceituais sobre o assunto aprendido, utilizando o notebook, com o *software Cmap Tools*.

As aulas do minicurso ficam distribuídas conforme os temas que englobam a supercondutividade e os Mapas Conceituais:

1º) Supercondutividade:

1. Introdução à supercondutividade.
2. Aspectos históricos sobre a Supercondutividade.
3. Efeito Meissner.
4. Teoria de Ginzburg-Landau.
5. Teoria BCS.
6. Aplicações da Supercondutividade.
7. Referências.

2º) Mapas Conceituais:

1. Breve histórico sobre mapas Conceituais.
2. Introdução aos Mapas Conceituais.

3. Mapas Conceituais como exemplos.
4. Utilização do *Software Cmap Tools*.
5. Atividades Práticas na criação de Mapas Conceituais.
6. Avaliação do conhecimento através dos Mapas Conceituais.
7. Referências.

3º) Atividades Práticas:

1. Aplicações da aprendizagem sobre a supercondutividade, utilizando os conhecimentos adquiridos e através de pesquisas, com um esboço feito em papel A4, do tema escolhido pelos alunos, na criação dos mapas conceituais.
2. Digitação dos mapas conceituais criados, utilizando o *notebook*, no *software Cmap Tools*, salvando em pasta própria e enviando para o instrutor ou diretamente ou por correio eletrônico fornecido, para análises e avaliação dos resultados.
3. Através dos Mapas Conceituais Construídos pelos alunos o instrutor pode fazer uma avaliação dos conhecimentos adquiridos de cada discente.

2.7 Pesquisa preliminar com mapas conceituais

Esta primeira pesquisa foi realizada em janeiro de 2012 com 45 alunos regularmente matriculados na Graduação de Física da UFAM, entre Bacharelado e Licenciatura, com os questionários enviados por correio eletrônico e outros entregues pessoalmente, onde as análises foram com apenas 10 alunos que responderam. No primeiro caso, foram 25 alunos que receberam os questionários por correio eletrônico em que somente 3 reponderam e no segundo caso, foram 20 alunos que receberam os questionários pessoalmente, em que apenas 10 concluíram, analisando no primeiro caso, que devido a incerteza do individualismo nas respostas, o contato pessoal com o pesquisado foi fundamental para a validação da pesquisa. No segundo caso em que a metade dos pesquisados não entregaram os questionários, foi devido as interferências de outras pessoas, dificultando a sinceridade do aluno em responder as questões e entregar os questionários.

Nesta parte preliminar da pesquisa, analisada com os 10 alunos que responderam os questionários, obteve-se resultados satisfatórios devido ao interesse de cada um em participar e da individualidade em responder cada qual o seu questionário, tornando a pesquisa fidedigna por que com estes 10 alunos foi observada a sinceridade nas respostas.

Destes 10 alunos, foram selecionados 5 exemplos dos modelos de mapas conceituais (*Apêndice B*) construídos manualmente por eles próprios, para uma breve análise crítica sobre o grau de conhecimento neste quesito.

A começar do Exemplo 1, o aluno construiu o seu modelo com o tema “Interações da radiação com a matéria”, conceituando com o estudo de três formas: efeito fotoelétrico, efeito Compton e Espalhamento, onde para cada tópico foi ramificado com indicações de exemplos de fenômenos ocorridos. Na ideia básica o aluno entendeu a construção do mapa conceitual, mas necessita apenas se organizar nas ideias e orientações.

No Exemplo 2, o aluno apresenta o seu modelo simples colocando como tema principal a “Física Moderna”, conceituando, basicamente e diretamente, o comportamento microscópico, faltando alguns conceitos principais e volta para outros temas como a Física Moderna I que fica separada da relatividade, contudo, a ideia básica foi alcançada na criação do mapa, só precisa organizar as ideias.

No Exemplo 3, a aluna organizou bem as suas ideias, criou o modelo de mapa básico e procurou mostrar os conceitos de “Mecânica Clássica” ligada a equações de movimento e fez ramificações da Mecânica Clássica abrangendo também pequenas oscilações e espalhamento de Rutherford.

No Exemplo 4, o aluno construiu um modelo de mapa conceitual bem definido, apresentando o tema de “Teoria da Relatividade Especial”, ligando os conceitos e partindo dos postulados de Albert Einstein, distribuindo bem as linhas com os conceitos, mostrando que entendeu bem como criar e construir um mapa conceitual.

E no Exemplo 5, o aluno construiu o seu modelo de mapa conceitual, de forma gráfica, colocando como tema principal o de “Física Clássica”, conceituou muito bem os conteúdos e ligou a outro tema o de “Física Moderna” que se distribuiu em outros subtemas com conceitos, se destacando no entendimento da construção do mapa conceitual.

Nesta parte cognitiva da construção de mapas conceituais, analisa-se que os alunos compreenderam a ideia básica referente ao mapa conceitual, com simples questionários, que podem ser observados nos Exemplos 1 a 5 (*Apêndice B*).

Os resultados considerados principais são analisados a seguir pelos gráficos das Figuras 2.4 a 2.7, referentes aos dados da Tabela B.1 (*Apêndice B*).

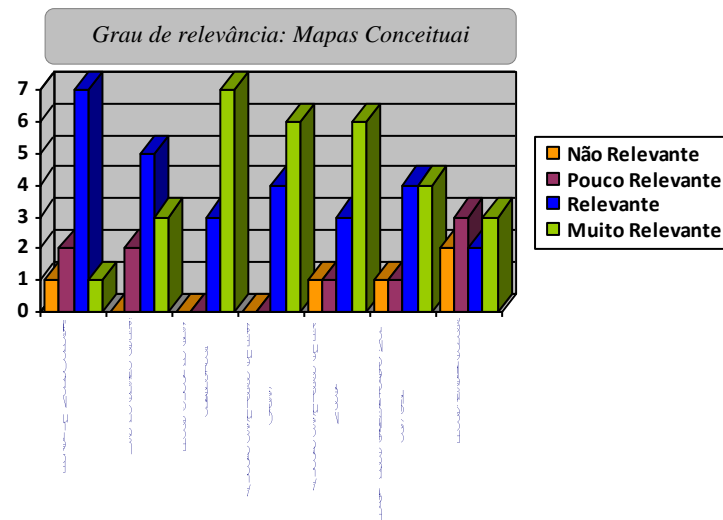


Figura 2.4. N^{os} de alunos versus questões 4 a 10 - graus de relevância sobre Mapas Conceituais.

No Gráfico da Figura 2.4, observa-se que no grau de “Muita Relevância” predominaram as questões 6, 7, 8 e 10, em que os mapas conceituais podem ajudar no processo de ensino/aprendizagem, assimilação dos conceitos de Física Clássica e de Física Moderna, incluindo neles as equações utilizadas em Física. No grau de “Relevância” predominaram as questões 4 e 5, em que os alunos informaram que são capazes de fazer um mapa conceitual e que estes podem ser usados no ensino/aprendizagem da Graduação de Física da UFAM. Na questão 9 predominaram ambos os graus de “Muita Relevância” e “Relevância”, em que os alunos referem que o Professor pode atribuir como tarefa os mapas conceituais, assim como elaboração, construção e sua apresentação.

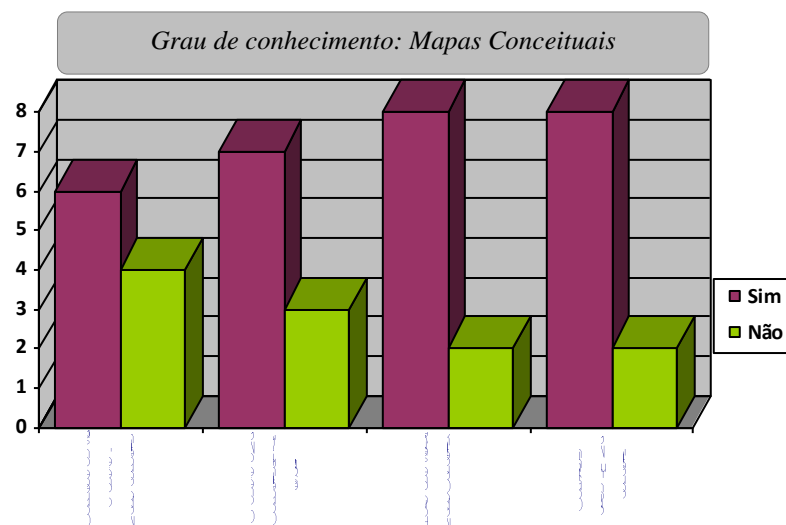


Figura 2.5. N^o alunos versus questões 1 a 3 e 11 - graus de conhecimento sobre os Mapas Conceituais.

No Gráfico da Figura 2.5, observa-se que no grau de conhecimento predominaram em todas as questões 1, 2, 3 e 11, as respostas escritas e o desenho do mapa feito pelos alunos sobre os quesitos: se conhecem, se sabem o que é um mapa conceitual e para que servem apresentando uma aprendizagem cognitiva e também significativa.

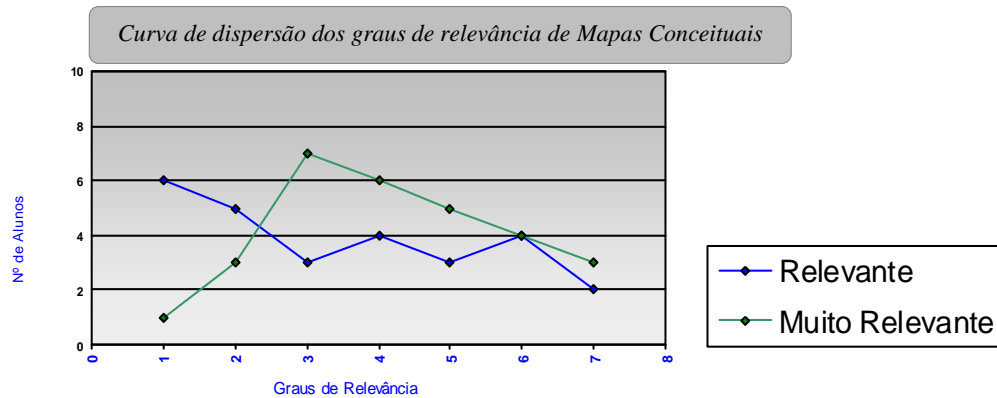


Figura 2.6. Curva de dispersão na comparação dos Graus de Relevância no uso de mapas conceituais.

No Gráfico da Figura 2.6, como os Graus de “Muita Relevância” e de “Relevância”, os mais elevados da pesquisa predominaram, então foi elaborado o Gráfico da Curva de dispersão, para comparação de qual o grau que melhor se ajusta a pesquisa. E analisando o gráfico, observa-se que o grau “Muito Relevante” oscila do mais baixo valor 2, ascendendo até o pico de valor 8, mas tem uma regressão muito acentuada até 4, ao passo que o grau “Relevante”, apresenta um equilíbrio na pesquisa, onde começa com valor 6, desce até 3, mas mantém uma média em torno do valor 4. Isto mostra que devido a este equilíbrio, pode-se considerar Relevante o uso de mapas conceituais no ensino aprendizagem dos alunos de Graduação de Física da UFAM.

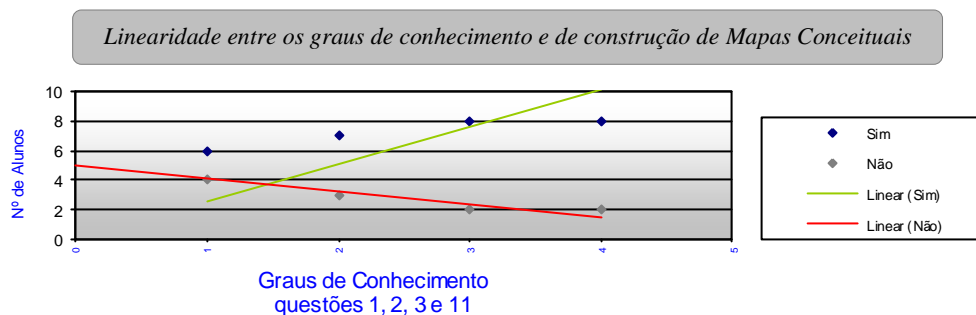


Figura 2.7. Linhas de Tendência dos graus de conhecimento - compara resposta 1, 2, 3 e 11 – “Sim” na maioria: ascensão linear verde e “Não” na minoria: regressão linear vermelha.

Analisando o Gráfico da Figura 2.7, para os Graus de “Conhecimento” e de “Construção” dos mapas conceituais pelos alunos de Graduação de Física da UFAM, a linha

de tendência verde está ascendendo do valor próximo de 3 até estabilizar em 8, ao passo que a linha vermelha apresenta regressão linear de valor 4 até 2, comprovando que a curva do gráfico pela linearidade, confirma o uma boa aceitação para as questões de conhecer e escrever o que é e para que serve um mapa conceitual, assim como, ter a capacidade de construir um mapa conceitual.

2.8. Pesquisa através do Minicurso

O nível do minicurso foi destinado para alunos de graduação em Física e áreas afins, inscrevendo-se um total de 27 alunos, sendo 4 de pós-graduação em Física e Físico-Química e 23 de graduação dos cursos de Física, Química, Matemática e Engenharia Mecânica, entretanto, antes do início da primeira aula, 16 destes alunos, justificaram a impossibilidade de comparecimento devido a conflitos de horários relativos a “curso de férias” e “seminários apresentados pelo PET”, ficando apenas 11 alunos que realmente estavam disponíveis e que não causou perdas. O tipo de pesquisa do minicurso foi qualitativa.

Os 11 alunos inscritos no minicurso foram 10 de Graduações de Física (UFAM), Matemática (UFAM) e Engenharia Mecânica (UNINORTE) e 01 de Pós-Graduação de Físico-Química (UFAM). Os gráficos das Figuras 2.8 a 2.19 ilustram melhor a relação de participantes no minicurso e os seus graus de conhecimento. A sigla UFAM é da Universidade Federal do Amazonas e a UNINORTE é do Centro Universitário do Norte.

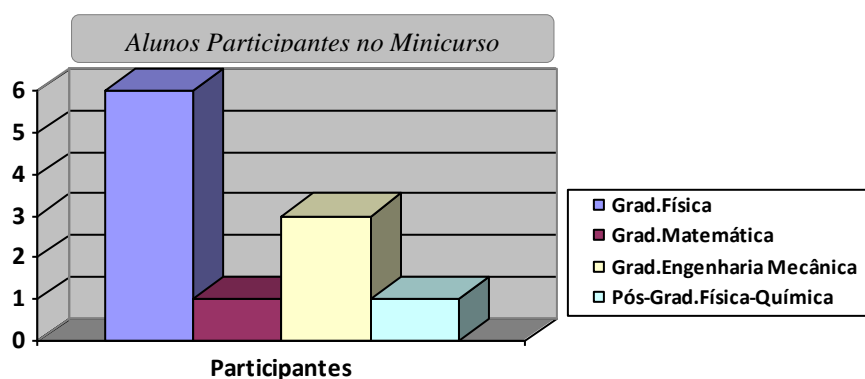


Figura 2.8. Alunos de Graduação e Pós-Graduação inscritos no minicurso.

O Minicurso foi ministrado na Sala 02, de Prática de Ensino de Física, do Departamento de Física, da UFAM, com os 11 participantes (Figura 2.8). O seu início foi no dia 03 de dezembro das 08:00 às 17:00 horas, com intervalo de almoço entre 12:00 e 12:59 horas, sendo apresentados aos alunos o cronograma do minicurso, o sumário relativo ao tema: Supercondutividade e a entrega do Questionário 1, com sete perguntas objetivas de marcar a(s) resposta(s) com graus de conhecimentos e três perguntas conceituais com respostas

escritas (*Apêndice E*), para verificação do conhecimento prévio de cada aluno e em seguida ministrada a aula sobre Supercondutividade e ao nos últimos horários foram passados vídeos com experimentos, informativos e educativos sobre a supercondutividade e suas aplicações.

O Questionário 1 (*Apêndice E*) teve o objetivo de avaliar os conhecimentos prévios dos alunos sobre a supercondutividade através de mapas conceituais, na contribuição de uma melhor qualidade de apresentações, aulas, instruções, seminários, palestras, dentre outras. Com os questionários respondidos foi possível fazer a análise das questões.

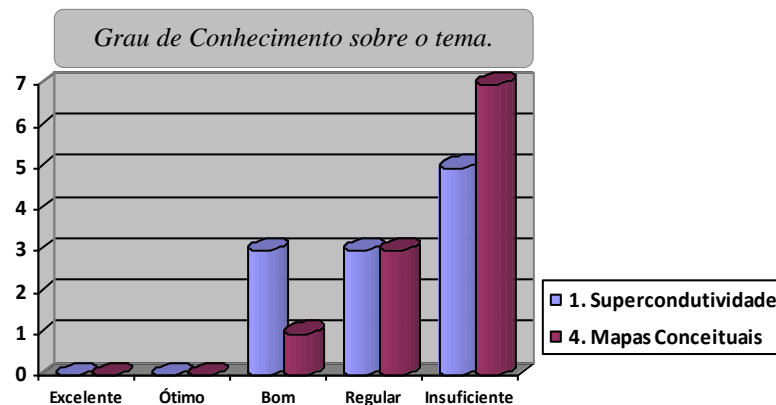


Figura 2.9. Perguntas 1 e 4 - graus de conhecimentos sobre supercondutividade e mapas conceituais.

A Figura 2.9, mostra o gráfico das perguntas 1 e 4 referente ao grau de conhecimento sobre supercondutividade e mapas conceituais, de acordo com o questionário 1 (*Apêndice E*), mostrando que 45% e 63% dos alunos no início do curso não tinham conhecimentos, respectivamente, sobre supercondutividade e mapas conceituais, entretanto, um pequeno percentual de alunos, entre 55% e 37% (de bom a regular), estiveram na faixa de conhecimento prévio sobre supercondutividade e mapas conceituais, o que contribuiu para uma melhor interação com o instrutor.

Na figura 2.10 a seguir mostra o gráfico sobre o local em que os alunos tenham ou não adquirido conhecimento em supercondutividade.

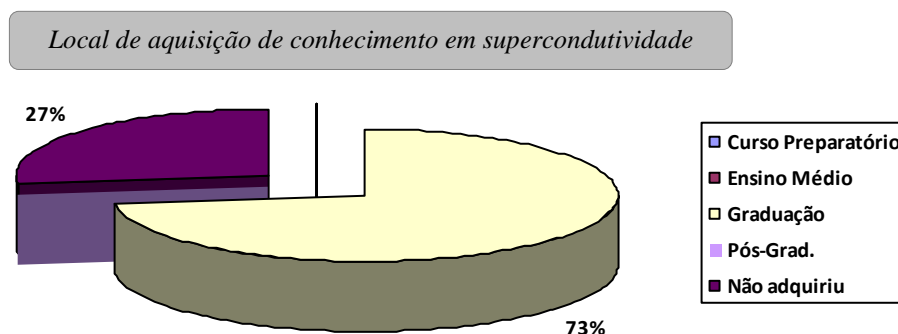


Figura 2.10. Gráfico mostrando que 73% dos alunos adquiriam conhecimento de supercondutividade na graduação e 27% não adquiriram.

A Figura 2.10, mostra o gráfico da pergunta 2 que refere ao local em que os alunos tenham ou não adquirido conhecimento em supercondutividade, onde foi analisado que 73% afirmam que durante a graduação obtiveram o respectivo conhecimento contra 27% daqueles que responderam não ter adquirido este conhecimento.

Análise do gráfico da Figura 2.11 com relação a resposta dos alunos sobre a que área da Física pertence a supercondutividade.



Figura 2.11. Gráfico com a maioria dos alunos respondendo que Física Moderna pertence a supercondutividade.

O gráfico acima (Figura 2.11) destacam as respostas dos alunos de número 3 quando perguntados sobre “a que área da Física pertence a supercondutividade”, nesta mostra inicial observa-se que 73% responderam Física Moderna e 27% responderam “não se lembrar, mas estudou” sobre o assunto, o que leva a uma análise de que a grande maioria tem um grau de conhecimento em supercondutividade, entretanto, tem os alunos que responderam “Física Clássica” e “Não Sabe”, respectivamente, são aqueles que apresentaram duas respostas em seus questionários, onde um assinalou “Física Clássica” e “Física Moderna” e o outro tanto “Física Moderna” como “Não Sabe”, mas de acordo com as suas respostas em relação ao “local que adquiriram conhecimento em supercondutividade”, afirmaram ter sido na graduação, isto posto, contribuiu para a análise do percentual acima ser coerente.

Na pergunta 5 foi lhes perguntado “qual o seu grau de conhecimento quanto ao uso de mapa conceitual na explicação da supercondutividade”, no gráfico abaixo apresenta os graus de relevância nesta questão.

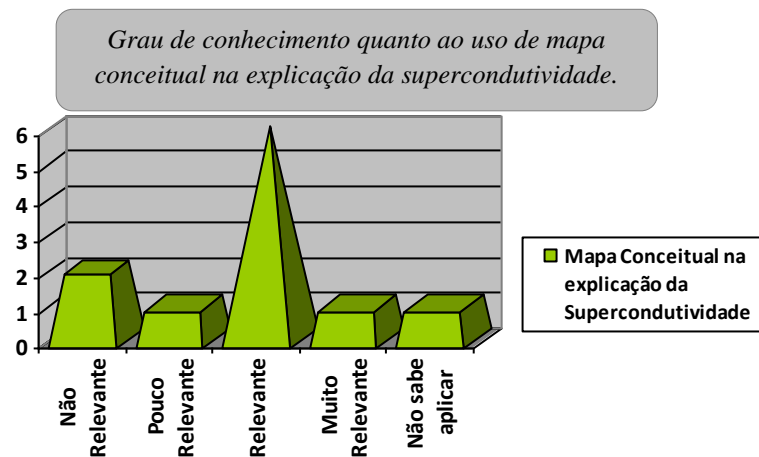


Figura 2.12. Gráfico sobre uso de mapa conceitual na explicação da supercondutividade mostra mais “Relevante”.

Com relação a pergunta 5, o gráfico da Figura 2.12, mostra que 55% dos alunos respondem que é “Relevante” a utilização de mapa conceitual na explicação da supercondutividade, 18% respondem, respectivamente, “Muito Relevante” e “Pouco Relevante”, ficando explícito nestes graus que a utilização dos mapas conceituais está na faixa de 73% contra 27% dos que responderam “Não Relevante” e “Não saber aplicar”.

A questão 6, tem a seguinte pergunta: “Um professor com conhecimento de supercondutividade pode atribuir como tarefa: elaboração, construção e apresentação de mapas conceituais para os alunos?” (Ver Figura 2.13).

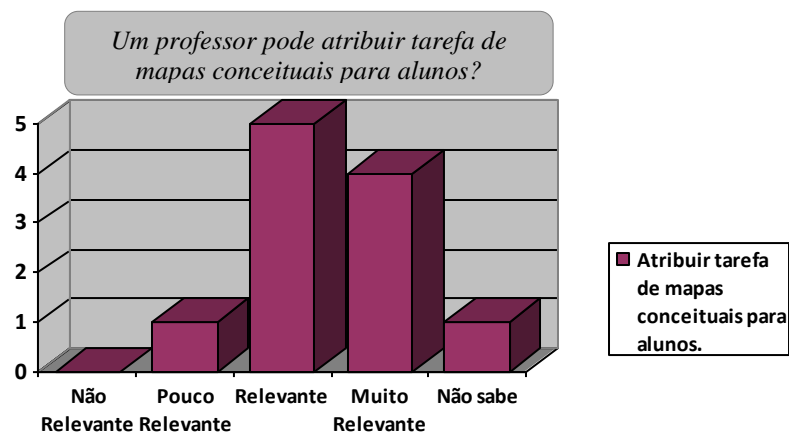


Figura 2.13. Gráfico mostrando os principais graus: “Relevante” e “Muito Relevante”, para um professor atribuir como tarefa mapas conceituais a alunos.

Ao analisar o gráfico da Figura 2.13: observa-se 46% e 36% dos alunos optando por “Relevante” e “Muito Relevante”, em que um professor atribua como tarefa: elaborar, construir e apresentar mapas conceituais para alunos, totaliza 72% muito satisfatório. Nos casos em que apresenta “Pouco Relevante” e “Não sabe” ficaram na faixa de 18%.

Resposta a pergunta 7 sobre qual o grau de relevância quanto a capacidade em criar um mapa conceitual sobre a supercondutividade ou conceitos relacionados a ela, a Figura 2.14, apresenta o seguinte gráfico:

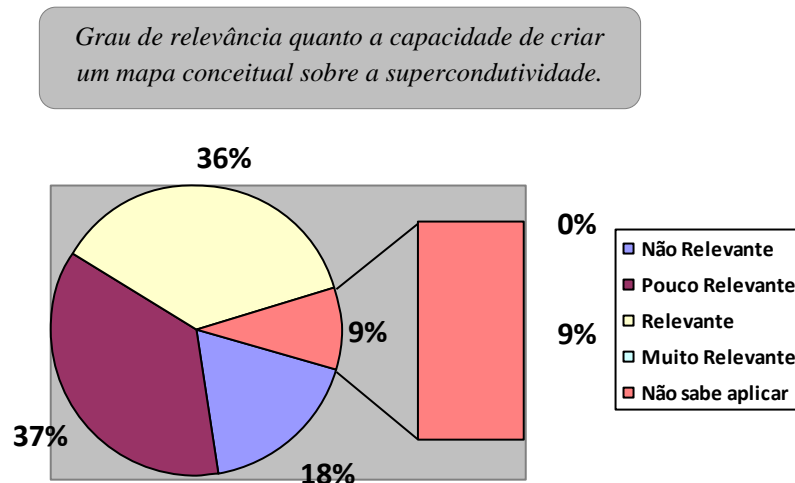


Figura 2.14. Grau de relevância em criar um mapa conceitual sobre a supercondutividade antes das aulas do minicurso.

Pode-se analisar neste gráfico (Figura 2.14) que 37% e 36%, totalizando 73%, dos alunos responderam entre “Pouco Relevante” e “Relevante”, dentro de um grau satisfatório da capacidade de criar um mapa conceitual sobre a supercondutividade ou conceitos relacionados a ela, contra 37% de respostas “Não Relevante” e “Não sabe aplicar”.

As Perguntas 8, 9 e 10 foram especificamente para respostas escritas da seguinte forma: - “Responda com poucas palavras o que é Supercondutividade e quais as suas aplicações?”; - “Responda com poucas palavras o que é Mapa Conceitual?”; e - “Quais os meios que você pode utilizar ou empregar para criar Mapas Conceituais?”.

Nas respostas da questão 8 obteve-se o seguinte resultado: 55% dos alunos souberam responder o que é supercondutividade e suas aplicações, 18% responderam apenas o que é supercondutividade e 27% não souberam responder corretamente. Nas respostas das questões 9 e 10 obtiveram o seguinte resultado: 55% dos alunos não souberam responder; 36% responderam satisfatoriamente as perguntas; e 9% responderam a questão 9 satisfatoriamente e a questão 10 errada, mostrando que o grau de conhecimento para estas questões foram insatisfatórios, devido não terem adquirido os conhecimentos necessários para a sua aprendizagem significativa, entretanto, pode-se ressaltar que com base no percentual de 36% é possível avaliar que alguns alunos tem um conhecimento prévio.

No segundo dia, 04 de dezembro das 13:00 às 17:00 horas, iniciou-se a aula com a apresentação do sumário relativo ao tema: Mapas Conceituais, onde estava incluída a explicação de como utilizar o *software Cmap Tools* (Apêndice D).

No terceiro dia, 05 de dezembro das 08:00 às 17:00 horas, com intervalo de almoço entre 12:00 e 12:59 horas, os alunos foram distribuídos em grupos para fazerem as atividades práticas na criação de mapas conceituais e entrega do questionário 2 (Apêndice F), onde cada grupo escolheu o seu tema sobre a supercondutividade e ao final da atividade prática em notebook, entregariam os questionários respondidos com os mapas conceituais criados em *software Cmap tools*.

O Questionário 2 (Apêndice F) objetivou-se avaliar os conhecimentos adquiridos após o minicurso pelos alunos sobre a supercondutividade através de mapas conceituais, mas diferente do questionário 1, pois o número 2 foi com um propósito a mais, ou seja, o de saber se os alunos tiveram uma aprendizagem significativa ao adquirirem os conhecimentos sobre os conceitos que foram ensinados: a supercondutividade, os mapas conceituais e a utilização do *software Cmap Tools* que serão mostrados pelas Figuras 2.21 a 2.24.

Iniciando pela questão 1 observa-se o grau de avaliação quanto aos conhecimentos adquiridos no minicurso sobre a supercondutividade, conforme a Figura 2.15.

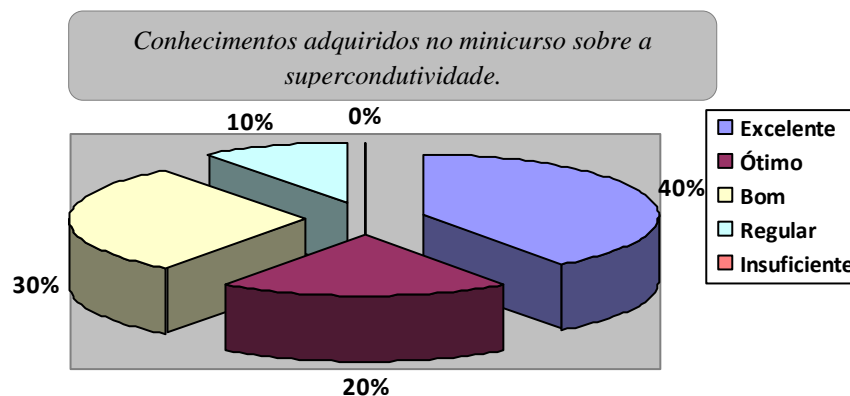


Figura 2.15. Gráfico mostra 90% dos graus Excelente, Bom e Ótimo dos conhecimentos adquiridos em supercondutividade e 10% Regular.

Pelo gráfico da Figura 2.15, nota-se que no grau de avaliação dos conhecimentos de supercondutividade ensinados no minicurso obteve-se 40% “Excelente”, 20% “Ótimo” e 30% “Bom”, os quais mostram que os objetivos do ensino/aprendizagem foram alcançados. O grau de avaliação de 10% “Regular” são os que mostraram compreensão, mas ainda tiveram dúvidas porque foi um assunto muito novo no seu aprendizado.

A questão 2, analisada pela Figura 2.16, refere ao grau de relevância se as teorias ministradas utilizando ilustrações, animações e vídeos ajudaram na aprendizagem sobre a supercondutividade.



Figura 2.16. Gráfico do grau Muito Relevante, demonstra a aprendizagem com os conhecimentos adquiridos no minicurso.

Os recursos visuais que utilizam ilustrações, animações e vídeos são os melhores meios de transmissão de conhecimentos, pois conforme a Figura 2.16, o grau “Muito Relevante”, apresentou valor de 90% dos alunos que obtiveram uma aprendizagem muito significativa em supercondutividade, com 10% afirmando ser “Relevante” que é uma aprendizagem normal mas que contribuiu para a assimilação dos conhecimentos.

Analisando a pergunta 3 relativo ao grau de conhecimento em mapas conceituais, o gráfico da Figura 2.17, mostra o seguinte:

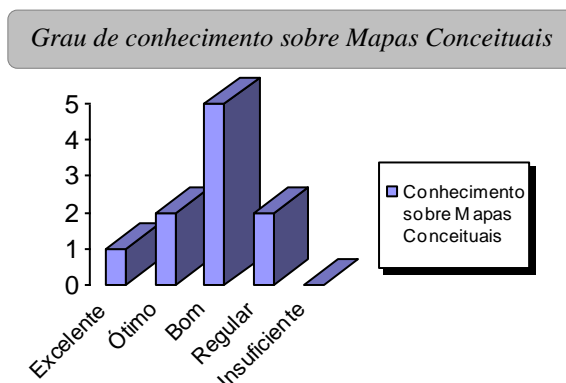


Figura 2.17. Gráfico relativo ao grau de conhecimento sobre Mapas Conceituais com 50% “Bom”, 20% “Ótimo”, 20% “Regular” e 10% “Excelente”.

Metade (50%) dos alunos afirmaram ter sido “Bom” o conhecimento de mapas conceituais, e a outra parte na faixa entre 20% “Ótimo”, 20% “Regular” e 10% “Excelente”, mostrando que este tipo de instrução é satisfatória.

O gráfico da Figura 2.18 (Questão 4) a seguir mostra os graus de relevância em lecionar a Supercondutividade utilizando o recurso de Mapas conceituais.

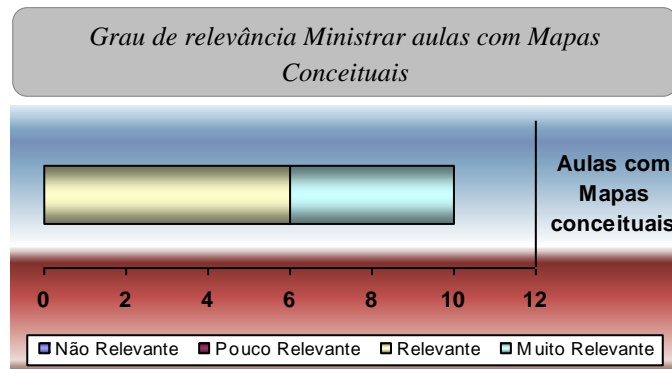


Figura 2.18. Gráfico com 60% “Relevante” e 40% “Muito Relevante” ao ministrar aulas com Mapas Conceituais sobre a supercondutividade.

Nesta análise, pode-se observar pelo gráfico acima que no percentual de 100% favorece as explicações de supercondutividade através dos Mapas Conceituais, devido os alunos terem respondido 60% Relevante e 40% Muito Relevante, os quais são os maiores graus apresentados.

Na atribuição de tarefas em elaboração, construção e apresentação de mapas conceituais pelos alunos, por parte do professor que tenha o conhecimento de supercondutividade, o gráfico da Figura 2.19 apresenta os seguintes graus de relevância:

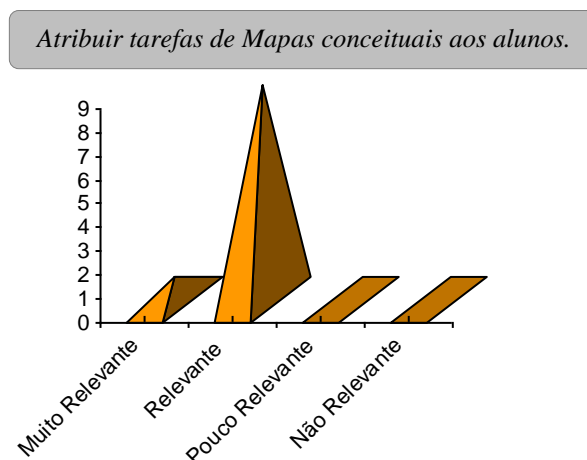


Figura 2.19. Gráfico de relevância do professor atribuir tarefas de Mapas conceituais aos alunos, com 90% “Relevante” e 10% “Muito Relevante”.

Foram analisados que 100% dos alunos, entre 90% de Relevante e 10% de Muito Relevante, responderam que o professor com o conhecimento no assunto, pode atribuir as respectivas tarefas para avaliar os alunos.

A Figura 2.20, apresenta o gráfico da última das questões fechadas que foram assinaladas quanto a capacidade do aluno em criar um mapa conceitual contendo a supercondutividade ou conceitos relacionados.

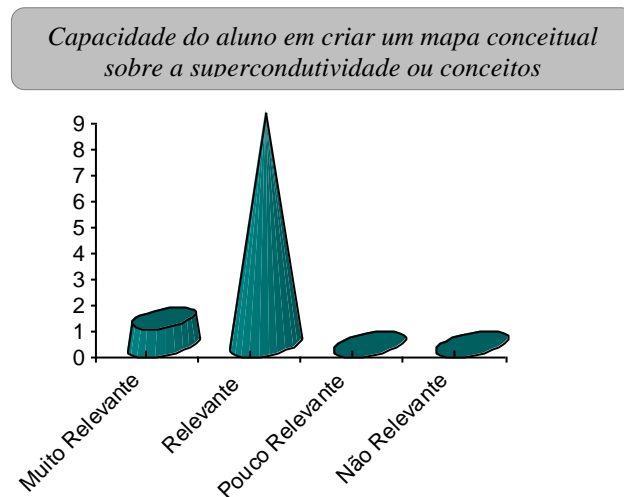


Figura 2.20. Gráfico com 90% optando por “Relevante” e 10% “Muito Relevante” na capacidade de criar um mapa conceitual sobre supercondutividade.

A análise do gráfico destaca 90% de Relevância e 10% Muito Relevante, no entendimento dos alunos, ao considerarem capacitados a construir, com base nos conhecimentos adquiridos, cada qual um mapa conceitual sobre a supercondutividade.

As questões 7, 8 e 9 foram perguntas abertas, onde os alunos mostraram seu aprendizado da seguinte forma: - “Qual a sua concepção sobre Mapa conceitual?”; - “Pesquise e responda com poucas palavras o que são: Efeito Meissner, Teoria de Ginzburg-Landau e a Teoria BCS?”; e - “Quais aplicações da supercondutividade contribuí para a tecnologia?”.

Nas respostas da questão 7, 90% dos alunos responderam corretamente e 10% responderam parcialmente correta, devido terem associado o instrumento didático com a aplicação prática do professor.

Na resposta da questão 9, 80% dos alunos conceituaram corretamente o que sejam Efeito Meissner, Teoria de Ginzburg-Landau e a Teoria BCS, ao passo que 20% conceituaram o Efeito Meissner corretamente, entretanto, não souberam explicar adequadamente a Teoria de Ginzburg-Landau e a Teoria BCS.

Na questão 8, 90% dos alunos escreveram diversas aplicações da supercondutividade que ajudam na tecnologia e 10% não souberam responder, por fazer associação a outro assunto diferente da aplicação.

A questão 10 foi reservada para que as equipes formadas criassem seus mapas através pelo *software Cmap Tools* em notebook, de acordo com os temas referentes a supercondutividade que tivessem escolhido e após a escolha do tema, fariam um rascunho em papel A4, iniciariam a construção no *software*, salvariam em pasta própria e entregaria ao instrutor. Desta forma fizeram o que estava proposto no minicurso e entregaram seus modelos de mapas conceituais prontos conforme Figuras 2.21 a 2.24 à seguir:

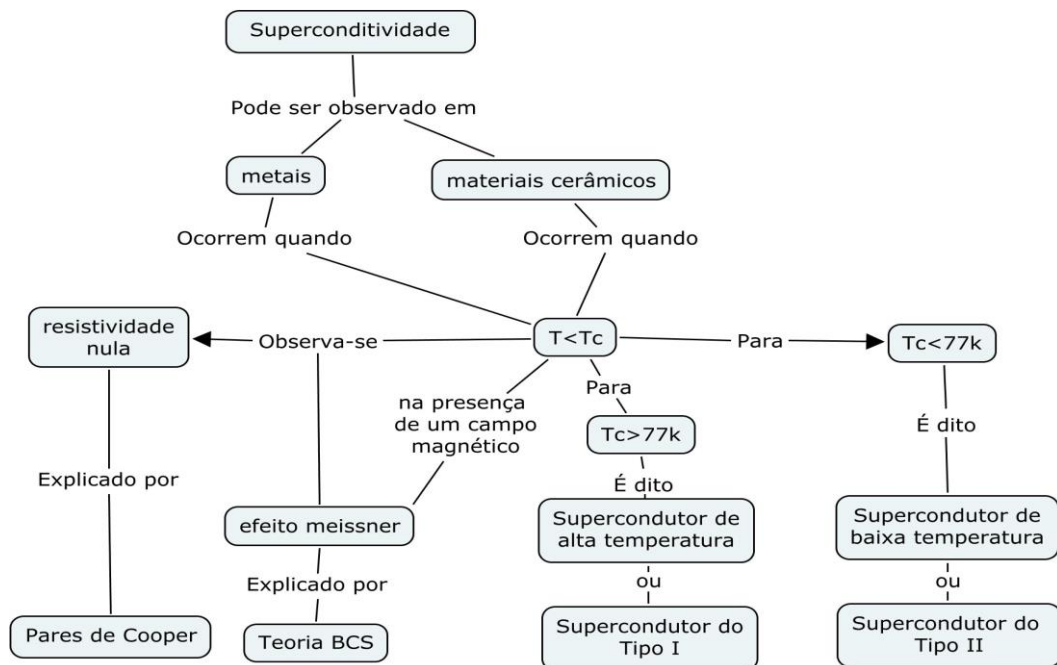


Figura 2.21. Modelo de Mapa Conceitual sobre supercondutividade, criado por um aluno da graduação de Física (PIBIC).

O modelo de mapa conceitual da Figura 2.21, criado por um aluno de Física (PIBIC) da UFAM, conceitua a supercondutividade como um fenômeno observado em metais e materiais cerâmicos submetidos a $T < T_c$, sendo observado a resistividade nula explicada pelos pares de Cooper e o efeito Meissner na presença de campo magnético explicado pela Teoria BCS, onde a $T < T_c$ pode chegar a $T_c < 77K$, sendo dito como supercondutor de baixa temperatura ou do Tipo II e para $T_c > 77K$, sendo dito como supercondutor de alta temperatura ou do Tipo I. A ideia principal do foi atingida pela forma com que elaborou o mapa com os conceitos.

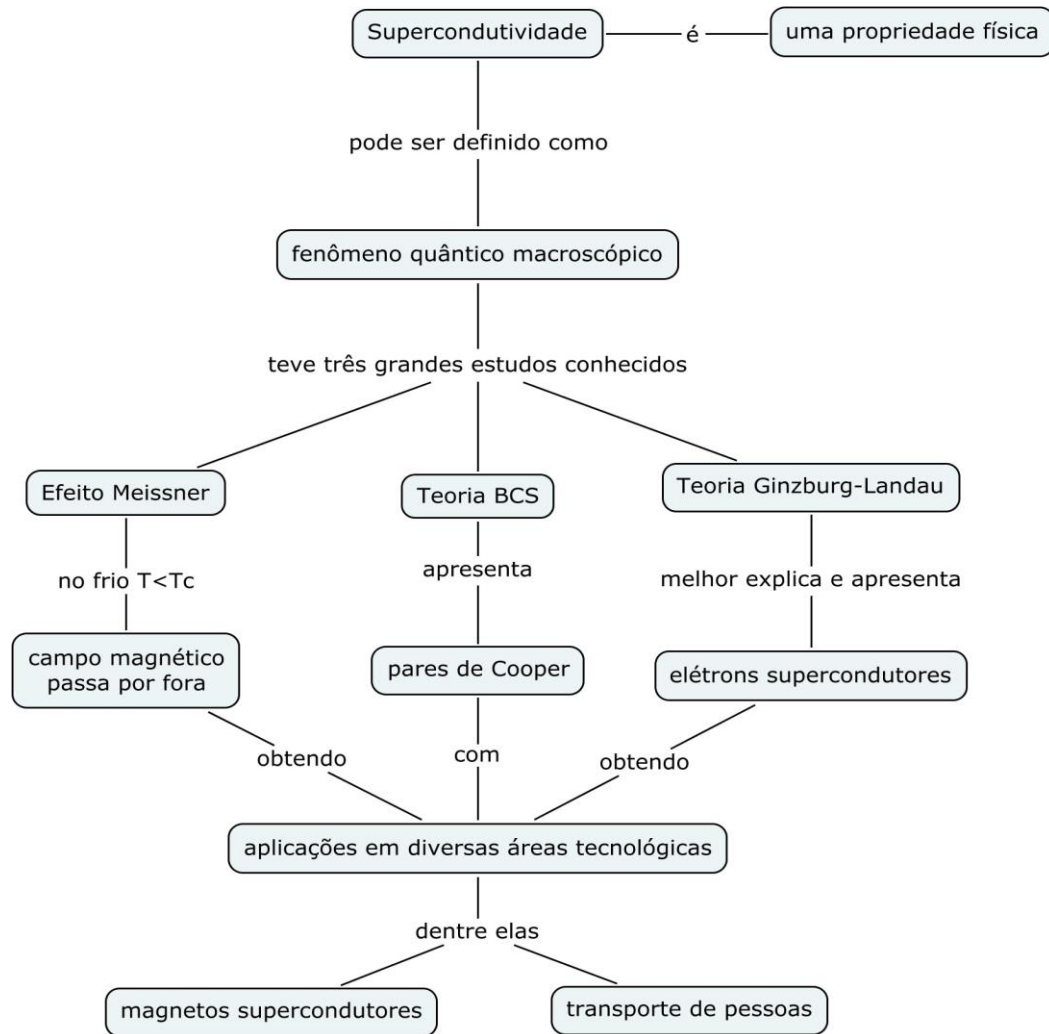


Figura 2.22. Modelo de Mapa Conceitual sobre supercondutividade, criado por três alunos da graduação de Física.

Conforme o modelo de mapa (Figura 2.22), feito por três alunos de Física da UFAM, mostra o conceito de supercondutividade como uma propriedade física, podendo ser definido como fenômeno quântico macroscópico, com três grandes estudos conhecidos, ou seja, o Efeito Meissner, a Teoria BCS e a Teoria de Ginzburg-Landau.

Na análise, o Efeito Meissner ocorre na aplicação do frio, a $T < T_c$, onde o campo magnético passa pelo lado de fora do material, a Teoria BCS apresenta os pares de Cooper e a Teoria de Ginzburg-Landau sendo a que melhor explica os elétrons supercondutores, onde através destas, obtém-se as aplicações em diversas áreas tecnológicas, citando dentre elas os magnetos supercondutores e o transporte de pessoas. A ideia básica dos alunos foi alcançada pois compreenderam o conteúdo, elaboraram e construíram muito bem mapa conceitual.

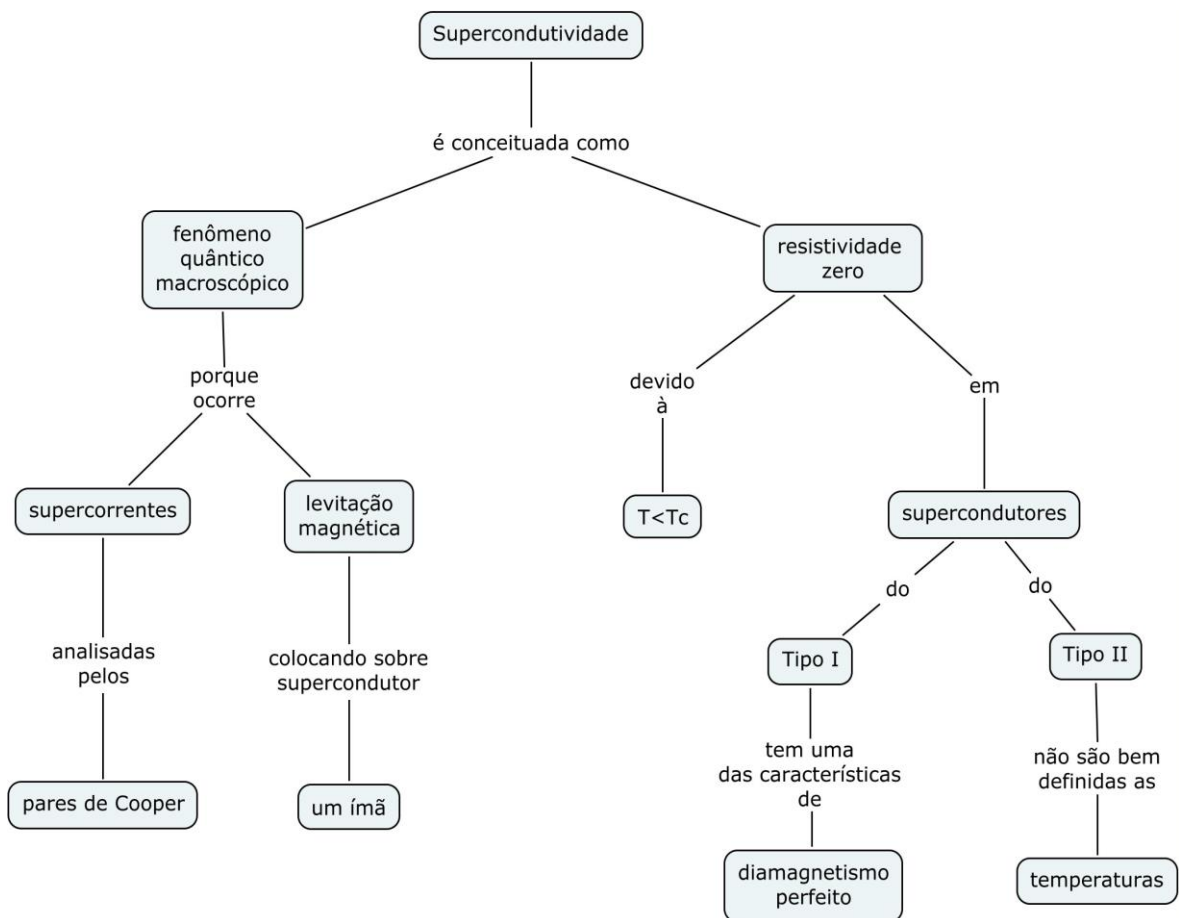


Figura 2.23. Modelo de Mapa Conceitual sobre supercondutividade, criado por três alunos de Engenharia Mecânica.

A Figura 2.23 mostra um modelo de mapa conceitual, construído por três alunos da graduação de Engenharia Mecânica do UNINORTE, apresentando em seus diagramas de conceitos a definição de supercondutividade conceituada como fenômeno quântico macroscópico e resistividade zero, onde o primeiro explica que o fenômeno ocorre devido a supercorrentes analisadas pelos pares de Cooper e devido a levitação magnética quando coloca-se sobre o supercondutor um ímã.

O segundo conceito é devido a $T < T_c$ e ocorre em supercondutores do Tipo I e do Tipo II, onde o Tipo I tem uma das características de diamagnetismo perfeito e o Tipo II não são bem definidas as temperaturas.

Na ideia principal os alunos compreenderam bem, distribuíram os conceitos, resultando na criação do mapa conceitual.

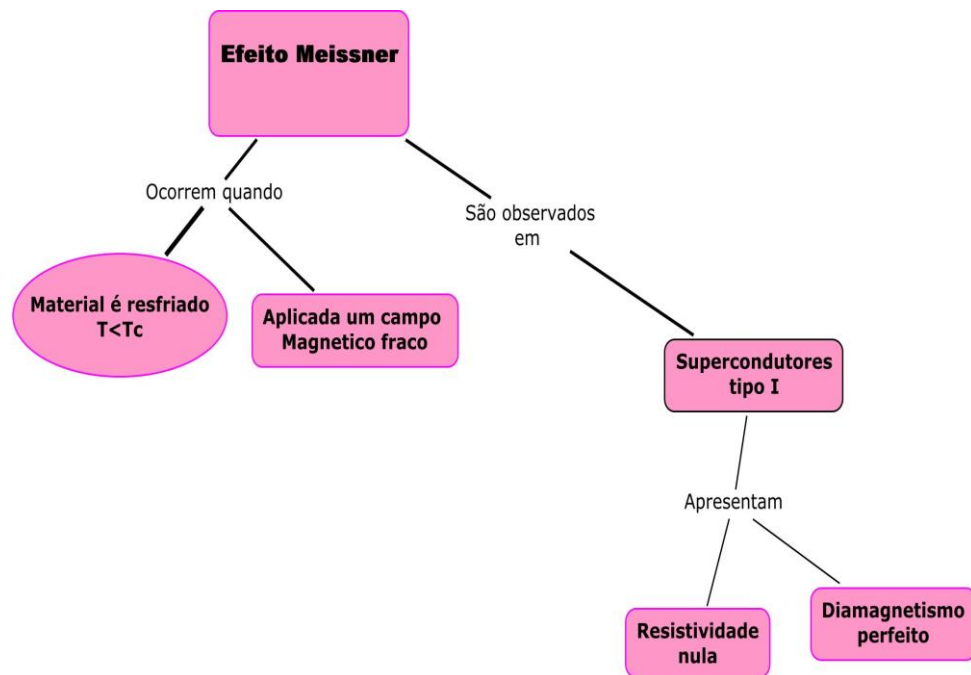


Figura 2.24. Modelo de Mapa Conceitual sobre efeito Meissner, criado por três alunos, sendo uma de pós-graduação em Física-Química e dois de graduações em Física e Matemática.

Este Modelo de Mapa conceitual (Figura 2.24), foi criado por três alunos, sendo uma aluna de Pós-Graduação em Físico-Química, uma aluna de graduação em Física e um aluno de graduação em Matemática, todos da UFAM, ao mostrar que o Efeito Meissner ocorre quando o material é resfriado a $T < T_c$ e quando aplicado um campo magnético fraco, onde são observados em supercondutores do Tipo I que apresentam resistividade nula e diamagnetismo perfeito.

Os alunos tanto compreenderam a ideia básica do ensino/aprendizagem como souberam realçar o mapa com uma cor para destacar o assunto, mas o objetivo foi alcançado pela forma com que colocaram as ideias em poucas palavras, resultando na construção do mapa conceitual, que ao formatarem destacaram os diagramas na cor rosa.

Considerações Finais

A motivação destes estudos foi desenvolver trabalhos de pesquisa sobre a supercondutividade, por que acredita-se que destas pesquisas venham trazer, futuramente, soluções que contribuam para melhorar economia pela utilização da energia e assim, aprimorar as tecnologias mundiais, pois há muito que se descobrir.

No estudo da teoria que envolve as equações de Ginzburg-Landau foi analisado que a variação da energia livre depende dos parâmetros fenomenológicos α e β em função do parâmetro de ordem, para que a equação de GL seja funcional, principalmente com β positivo, porque ela não funciona adequadamente sendo negativo, pois precisaria de uma magnetização muito grande e α é decisivo para a minimização de energia, porque quando for positivo o $|\Psi|^2=0$ e ocorre um mínimo, quando negativo ocorre o mínimo se $|\Psi|^2 = -\alpha / \beta$.

Os parâmetros α e β dependem da temperatura do supercondutor, $T \leq T_c$, por isso, foram desenvolvidas as equações de energia livre com estes parâmetros sendo estimados em função das temperaturas.

A aplicação do campo magnético foi preciso usar o momento canônico, para que o estado supercondutor apresentasse uma energia livre nas proximidades da transição de fase.

Utilizou-se então, para a variação da energia livre de GL, a integral de volume para fazer a ligação da energia livre do fluxo normal e as energias de condensação, cinética e campo magnético, onde encontrou-se a primeira equação de G.L..

Das equações de energia livre de G.L. foram obtidas as curvas nos gráficos (Figuras 1.11 e 1.12) da energia livre de G.L. no estado supercondutor quando $\alpha > 0$ e $T > 0$, confirmando a minimização da energia e a outra curva, pela variação de $\alpha < 0$ e $T < 0$, mostrando que havia uma mínima magnetização.

Na aplicação do campo magnético ocorrera um desvio na superfície do supercondutor (λ_L), visto na Figura 1.13, pela exponencial em relação a $(-x / \lambda_L)$, separando o estado normal, em que o campo magnético não penetrava no interior do supercondutor devido as supercorrentes.

Tirou-se a curva de dependência da temperatura para o comprimento λ_L e percebeu-se que a concavidade era acentuada, devido a temperatura e o comprimento λ_L relacionar-se com a densidade n_s (Figura 1.14).

Através da curva de dependência do parâmetro Ψ com a função x/ξ (Figura 1.15), observou-se a ascensão pela razão de Ψ/Ψ_0 , por haver um estado ordenado dos superelétrons, relacionados ao comprimento ξ e do vórtice na estrutura do supercondutor.

Pelo estudo da teoria de G.L. foi possível compreender que as equações da energia livre, aplicada estatisticamente, pelo parâmetro de ordem que depende da temperatura e também do campo aplicado, mostra que o funcional terá um mínimo de energia.

Na pesquisa preliminar de campo realizada com acadêmicos de Física da UFAM em janeiro de 2012, o propósito era saber se os mapas conceituais teriam boa receptividade, sendo analisados pelos resultados obtidos, que os mapas conceituais são ferramentas metodológicas de boa aceitação e de boa compreensão, eles permitiram com facilidade compreender os conteúdos de Física, pois os resultados podem ser observados na apresentação dos alunos pelos Exemplos 1 a 5 (*Apêndice B*).

Outra consideração a ser analisada são os graus de relevância e os de conhecimento, predominando favoravelmente, o grau “Relevante” para o uso de mapas conceituais no ensino/aprendizagem dos alunos de Graduação de Física da UFAM e os Graus de “Conhecimento”, nas respostas escritas sobre o que é e para que serve o mapa conceitual, finalizando com a construção dos mapas conceituais constantes dos Exemplos 1 a 5 (*Apêndice B*), permitindo analisar criticamente as ideias dos alunos a respeito da parte cognitiva e significativa de cada um.

A pesquisa contou com a participação somente de alunos matriculados na Graduação de Física, incluindo dentre eles os do Programa de Educação Tutorial (PET), do Programa Brasileiro de Iniciação a Docência (PIBID), do Programa Brasileiro de Iniciação Científica (PIBIC), da Casa da Física e dos alunos matriculados que apenas estudam regularmente, em que dentre os modelos de mapas conceituais exemplificados nos Exemplos 1 a 5, três foram de alunos do PET e dois foram de alunos normalmente matriculados na Graduação de Física.

Os gráficos das Figuras 2.4 a 2.7, destacam “Muita Relevância” no processo ensino/aprendizagem usando mapas conceituais para assimilação de conceitos de Física Clássica e de Física Moderna e “Relevância” na capacidade dos alunos de Física em criar mapa conceitual. Outros dados importantes são os graus de “Muita Relevância” e “Relevância”, na confirmação de que o Professor pode atribuir como tarefa os mapas conceituais no processo de criação e de avaliação na apresentação.

Estes dados ajudaram a decidir no trabalho de pesquisa preliminar, sobre o uso de mapas conceituais no ensino/aprendizagem, onde se constatou que a média de “Relevante” favoreceu a utilização de mapas em aulas ou instruções para ensino e avaliação dos alunos, que neste primeiro caso, foram de graduação em Física.

A aplicação do minicurso teve como objetivo o de avaliar o aprendizado dos alunos sobre os conceitos ministrados de supercondutividade e o conhecimento de mapas conceituais, e suas respectivas aplicações seguidos da construção de mapas pelo programa *Cmap Tools*. Os resultados mostram (Gráfico da Figura 2.8) que os participantes interessados foram de cursos variados, como Física, Matemática, Física-Química e Engenharia, revelando que os conteúdos com mapas conceituais podem ser adotados em vários níveis.

No início do minicurso os alunos não haviam recebido ensinamentos sobre os conteúdos de supercondutividade, mostrando que a maioria estava insuficiente no aprendizado (Figura 2.9), porém muitos deles apresentavam conhecimentos pré-existentes sobre o assunto, em que parte destes conhecimentos obtiveram na graduação (Figura 2.10), mas quando assistiram a primeira aula, perceberam que suas mentes clarearam mais nos conceitos.

Antes do início da primeira aula do minicurso, foi aplicado o primeiro questionário (*Apêndice E*) fins de saber sobre o grau de conhecimento antes das aulas, conforme representados pelos gráficos das Figuras 2.11 a 2.14: onde 73% dos alunos afirmaram que a área da Física a que pertence a supercondutividade foi a Física Moderna, dentro do grau muito bom para um conhecimento prévio; 55% e 18% dos alunos acham entre “Relevante” e “Muito Relevante” utilizar mapas conceituais nas aulas de supercondutividade; 72%, dentro dos graus “Relevante” a “Muito Relevante”, em que um professor aplique tarefas com mapas conceituais; de 73%, entre “Pouco Relevante” a “Relevante”, apresentaram insegurança na capacidade de criar mapas conceituais sobre a supercondutividade, devido não terem recebido ainda as aulas sobre o assunto.

Nas respostas escritas: 73% dos alunos souberam o que era supercondutividade e 55% sabiam sobre suas aplicações nas áreas tecnológicas; 36% tinham conhecimentos sobre o que era mapa conceitual, entretanto, como não haviam adquirido os conceitos sobre a criação de mapas conceituais, então este último item foi insatisfatório que tendeu a evoluir com o ensino/aprendizagem.

Após as aulas do minicurso sobre supercondutividade, mapas conceituais, criação de mapas e utilização do *software Cmap Tools* (*Apêndice D*), em que os alunos foram formados em quatro grupos, para a prática de criação mapas no *Cmap Tools*, procedeu-se a entrega de seus modelos para avaliação final.

Ao término das aulas do minicurso e a prática de criação de mapas no *Cmap Tools*, aplicou-se o segundo questionário (*Apêndice F*), onde os resultados apresentados ficaram na média de muito satisfatório, conforme os gráficos das Figuras 2.15 a 2.20.

Na avaliação dos conhecimentos adquiridos no minicurso, 90% dos alunos obtiveram aprendizagem significativa, na faixa de 40% “Excelente”, 20% “Ótimo” e 30% “Bom”; 100% de rendimento na aprendizagem com recursos visuais (Vídeos, Imagens e Mapas Conceituais), dentro da faixa de 90% “Muito Relevante” e 10% “Relevante”; 100% foram satisfatórios no conhecimento de mapas conceituais, distribuídos entre 50% “Bom”, 20% “Ótimo”, 20% “Regular” e 10% “Excelente”; 100% muito satisfatório em que um professor deve ministrar aulas com mapas conceituais, na faixa de 60% “Relevante” e 40% “Muito Relevante”; 100% muito satisfatório para um professor com conhecimento sobre o assunto atribuir tarefas para os alunos com mapas conceituais, entre 90% e 10%, “Relevante” e “Muito Relevante”, respectivamente; e 100% dos alunos ficaram capacitados na criação de mapas, devido aos modelos (Figuras 2.21 a 2.24) que apresentaram no final do curso, onde o percentual ficou distribuído em 90% “Relevante” e 10% “Muito Relevante”.

Nas questões de respostas abertas, ao término do minicurso, 90% dos alunos responderam acertadamente o significado de mapa conceitual e 10% responderam parcialmente correto, por confundirem instrumento didático com aplicação prática; 80% conceituaram corretamente no que significam o efeito Meissner, a Teoria de Ginzburg-Landau e a Teoria BCS e 20% conceituaram somente o efeito Meissner, mas não souberam explicar as outras teorias; e 90% souberam responder sobre a existência de diversas aplicações da supercondutividade que ajudam na tecnologia e 10% não souberam responder.

Com base no percentual, citado neste último parágrafo, a média de 86,6% \approx 87%, mostra que os alunos tiveram um rendimento muito satisfatório na avaliação dos conhecimentos adquiridos sobre supercondutividade e mapas conceituais, considerando entre o “Relevante” e o “Muito Relevante” adotar no ensino/aprendizagem a utilização de mapas conceituais nos conteúdos de determinadas disciplinas na Física.

Os modelos de mapas conceituais das Figuras 4.21 a 2.24 são as comprovações de que os alunos assistiram as aulas de supercondutividade e conhecimentos de mapas conceituais, aplicaram seus conhecimento na construção dos mapas que ficaram muito bem elaborados, tendo em vista a utilização do programa *Cmap tools*.

Apêndice A

Aspectos Básicos sobre Mapas Conceituais

1. Breve histórico sobre mapas conceituais

A história referente aos Mapas conceituais pelo que se conhece, destaca-se quando o empresário, professor e navegador norte-americano, Joseph Donald Novak, nascido em 1932, com o objetivo de ajudar a administração de uma companhia de navegação voltada para estratégias de Comando e Estado Maior, desenvolve em 1970 os mapas conceituais, o qual define como ferramenta administrativa de organização e representação do conhecimento.

Sua pesquisa foi centralizada na aprendizagem humana, relativa a estudos de ensino e representação do conhecimento, onde a teoria de mapa conceitual teve por finalidade orientar a investigação e instrução, onde a importância na publicação foi datada pela primeira vez em 1977 e atualizada em 1998. E quando ele se referiu a “humana”, ficou baseada na teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel.

2. Mapas Conceituais e a sua utilização

A utilização de Mapas Conceituais possibilita mostrar de forma clara e interpretada, os conceitos e as teorias relativos à Supercondutividade, onde o docente apresenta os conteúdos de suas aulas e avaliações. Os “*Mapas conceituais são apresentados como instrumentos potencialmente úteis no ensino, na avaliação da aprendizagem e na análise do conteúdo curricular*” [42].

A importância da utilização dos mapas conceituais no ensino/aprendizagem está voltada para a melhoria da qualidade da instrução, visando contribuir para que um acadêmico compreenda e assimila claramente os conteúdos [43].

Para compreender mapas [43], entenda que estes são diagramas que indicam relações entre conceitos. Os mapas especificamente podem ser entendidos como diagramas hierárquicos que têm propósitos de dar mais reflexão a organização conceitual de um corpo de conhecimento ou fragmento dele e de compreensão quando da visualização apresentada na lousa.

Os diagramas podem ter uma, duas ou mais dimensões, entretanto os mapas unidimensionais são apenas listas de conceitos que tendem a apresentar uma organização

linear vertical, que fornece uma visão de estrutura conceitual. E os mapas bidimensionais podem ser vistos tanto na dimensão vertical como na horizontal que possibilitam uma representação mais completa das relações entre os conceitos.

Os mapas conceituais como instrumentos didáticos poderão ser apresentados em aulas ou instruções, para mostrar as relações hierárquicas entre os conceitos.

3. Teoria da aprendizagem Significativa

A aprendizagem significativa [44, p.23-24] implica na relação da tarefa de aprendizagem, não que seja arbitrária e não literal, mas com uma nova informação inserida àquelas às quais o discente já tenha conhecimento e que o mesmo venha a adotar procedimentos para sua compreensão. A aprendizagem significativa, dentro da aprendizagem acadêmica, tem maior importância em relação ao envolvimento de outros tipos de aprendizagens similares, onde há resistência para se admitir que as condições de aprendizagem significativa aplicam-se aos métodos de resolução de problemas. Entretanto, as soluções de problemas e de experimentos devem estar alicerçados em uma base de princípios e conceitos muito compreensíveis, onde as operações sejam significativas.

A aprendizagem significativa [44, p.32; 45] não refere à mesma coisa que a aprendizagem de material significativo, por que o material de aprendizagem é potencialmente significativo ao passo que tem que haver um espaço para a aprendizagem significativa pelo discente.

A aprendizagem significativa está relacionada em adquirir novos significados por parte do discente, que terá destes novos significados os produtos desta aprendizagem, que se relaciona aos conhecimentos adquiridos previamente.

Os conhecimentos prévios são os conteúdos adquiridos em um dado período de sua vida e que poderão ser concebidos novos conteúdos, para dar outros significados aos pré-existentes, que implica em dizer que o discente já sabe algum assunto ou conteúdo relacionado com o que está aprendendo.

4. Mapas conceituais e Aprendizagem significativa

Os mapas conceituais [45, p. 1-2] são referidos também como mapas de conceitos, sendo diagramas de significados que relacionam conceitos seguindo hierarquias, onde não devem ser confundidos com mapas mentais, os quais não relacionam conceitos e não tem organização hierárquica, nem tão pouco com quadros sinópticos, os quais são diagramas de classificação.

Apenas um mapa conceitual pode ser construído, com todos os conceitos incluídos, ou seja, conceitos gerais que terão o objetivo de ensinar todo o conteúdo de um curso completo. E esse mapa tendo os conceitos gerais servirá como referência em seu planejamento pedagógico ao passo que um mapa de conceitos específicos somente serve para organizar uma pequena aula ou instrução.

O conceito básico da teoria cognitiva de aprendizagem de David Ausubel [45, p.6-7] é a aprendizagem significativa onde: *“A aprendizagem será significativa se uma informação nova, seja conceito, ideia ou proposição, tenha significado para quem está aprendendo pela combinação das informações recebidas e as existentes (ancoragem), isso em aspectos de relevância na estrutura cognitiva (conhecimento) pré-existente no indivíduo.”*

A aprendizagem significativa [46] também é como um processo em que essa informação nova se junta à estrutura cognitiva prévia, chamada de subsunçor do aprendiz, devido relacionar e organizar esse conhecimento prévio. A estrutura cognitiva do aluno está também relacionada a um material potencialmente significativo que pode ser uma figura, imagem, conceito, princípio e outros. E depois da assimilação do novo conceito, o conceito subsunçor previamente existente no indivíduo se modifica.

Existem os organizadores prévios [47] que são as informações e os recursos introduzidos antes dos conteúdos ministrados que se referem a grade curricular, sendo este recurso usado para interligar o que o estudante sabe ao que ele precisa, a fim de caracterizar a aprendizagem significativa.

O ponto importante na aplicação de mapas conceituais está na teoria de [48], que são ferramentas para organizar e representar o conhecimento do discente.

Os mapas conceituais depois de elaborados devem ser explicados de maneira significativa de forma que o aluno compreenda a sua finalidade de conceituar o assunto contextualizado, que pode estar em corpo de conhecimentos, em uma disciplina ou em uma matéria de ensino. E conforme o seu exemplo seja docente ou discente que construa o mapa, ele deverá estar habilitado a explicar o significado dos conceitos daquele mapa [48, p. 15].

Os mapas conceituais poderão ser apresentados em termos de significados como recursos mediante as etapas, dentro de uma análise de currículo e de ensino conforme a teoria ausubeliana [48, p.22], que implicará em: *“1) identificação da estrutura de significados pelo contexto da matéria de ensino; 2) identificação dos subsunçores para a aprendizagem significativa da matéria de ensino; 3) identificação dos significados preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz; 4) organização em seqüências do conteúdo e seleção de*

materiais curriculares, com as ideias de diferenciação crescente e reconciliação integrada como princípios programáticos; 5) ensino com o uso de organizadores prévios, fazendo ligações com significados os quais o aluno possui somados aos que ele precisa ter para sua aprendizagem significativa e às relações entre o novo conhecimento que irá dar significados.”

No processo de elaboração do mapa deve ser entendido [49, p.39] que: “(...) “*mapa conceitual*” é uma técnica criada por Joseph D. Novak, que o apresenta como “*estratégia*”, “*método*” e “*recurso esquemático*.” Nas explicações sobre: Estratégia: “procuram exemplificar as estratégias simples visando ajudar os alunos no aprendizado e os educadores na organização dos materiais objeto dessa aprendizagem”; no Método: “a construção dos mapas conceituais (...), visa ajudar estudantes e educadores na captação de significado dos materiais que vão aprender”; e no Recurso esquemático: “usam o mapa para representar conjunto de significados conceituais inseridos em uma estrutura de proposições”.

5. Modelos de Mapas Conceituais

Como modelos de mapas conceituais, seguem abaixo dois exemplos [50, p.33-57], que podem servir de base para elaboração de outros modelos. O primeiro modelo relaciona-se com a Física Clássica e a Física Moderna, traçados por um aluno de Graduação em Engenharia e o segundo por alunos do Ensino Médio, ambos orientados por professores.

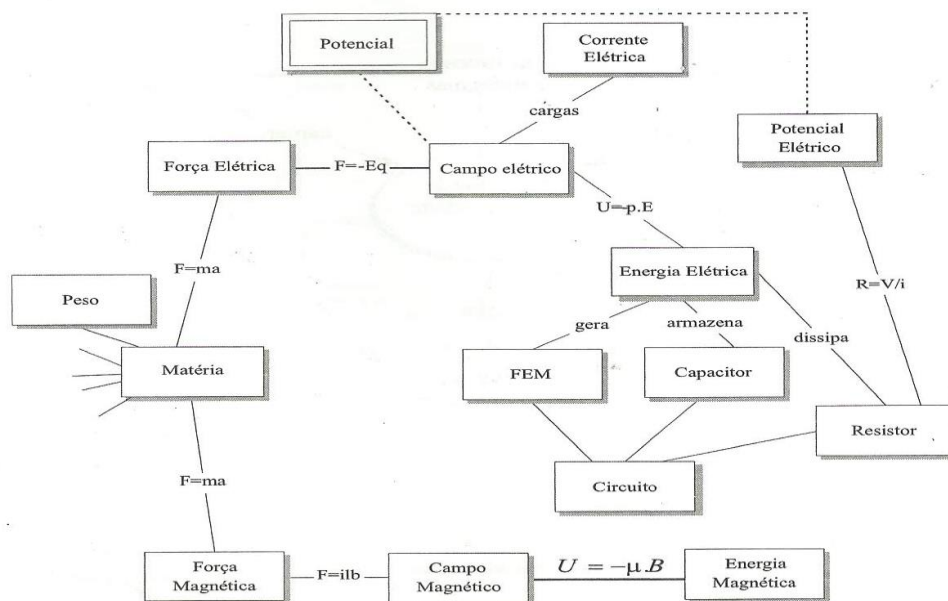


Figura A.1. Mapa Conceitual traçado por um aluno de Engenharia cursando a disciplina de Física Geral [50, p. 40].

O primeiro modelo de mapa conceitual selecionado (Figura A.1), o aluno é de Engenharia, cursava uma disciplina de Física Geral e na análise do professor, na parte inferior do mapa houve enxertos na explicação pelo aluno e que na parte superior com as linhas tracejadas, foram correções feitas pelo professor após conversar com o aluno. Mas o principal conceito transmitido é o da interação energia elétrica fora da carga.

O segundo exemplo de mapa conceitual a seguir foi construído por estudantes do ensino médio para conceitos de Mecânica Quântica (Figura A.2).

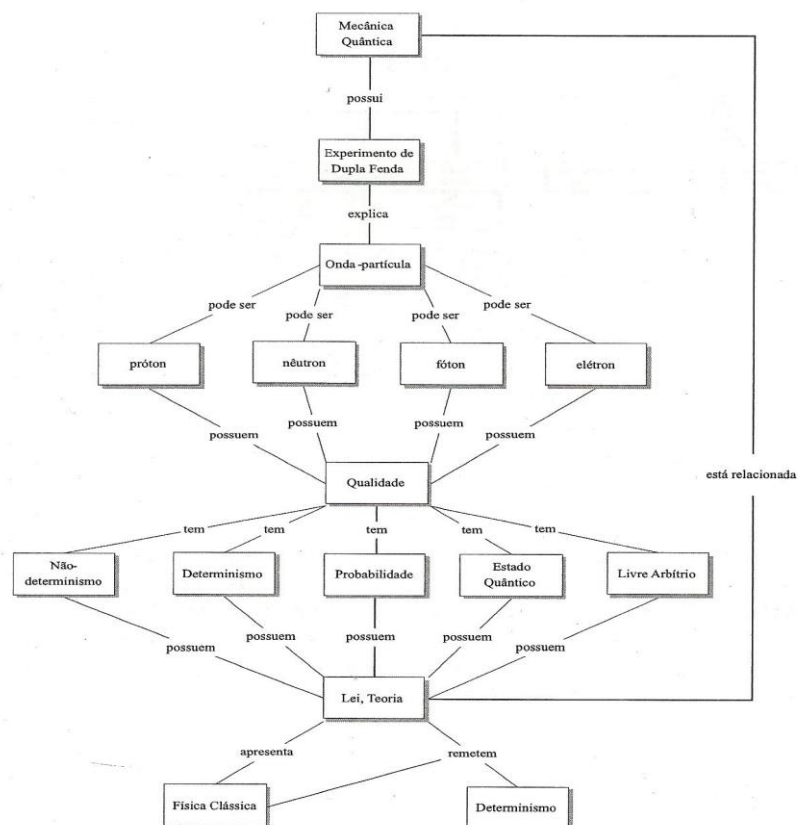


Figura A.2. Mapa Conceitual construído por alunos de Ensino Médio, para conceitos de Mecânica Quântica [50, p. 51].

Neste mapa o autor chama a atenção em uma Nota sobre um conceito (determinismo) que aparece repetido, citando que este caso não deve acontecer.

Apêndice B

Pesquisa preliminar de campo realizada em 12.01.12 - relevância do conhecimento e aceitação dos Mapas Conceituais.

1. De acordo com o grau de conhecimento e de relevância, abaixo é apresentada a Tabela B.1 de respostas do questionário (*Apêndice B*) da pesquisa:

Tabela B.1. Respostas dos alunos ao questionário na utilização de Mapas Conceituais.

QUESTIONÁRIO DE RESPOSTAS DOS ALUNOS DE FÍSICA PARA MAPA CONCEITUAL						
Questões	Sim	Não	Não Relevante	Pouco Relevante	Relevante	Muito Relevante
1.Conhece ou sabe o que é Mapa Conceitual?	6	4	-	-	-	-
2.O que é Mapa Conceitual (escrita)?	7	3	-	-	-	-
3.Para que serve Mapa Conceitual?	8	2	-	-	-	-
4.Você conseguiria fazer um Mapa conceitual...?	-	-	1	2	6	1
5.O uso de Mapas Conceituais no ensino/aprendizagem de Física.	-	-	0	2	5	3
6.Podem ajudar no ensino/aprendizagem da Graduação de Física?	-	-	0	0	3	7
7.Utilização pelos docentes em aulas de Física Clássica, o aluno terá possibilidade de assimilar os conceitos?	-	-	0	0	4	6
8.Utilização pelos docentes em aulas de Física Moderna, o aluno terá possibilidade de assimilar os conceitos?	-	-	1	1	3	5
9.O Professor pode atribuir como tarefa os mapas conceituais para os alunos?	-	-	1	1	4	4
10.Pode inserir aos conceitos equações?	-	-	2	3	2	3
11.Construção de mapas pelos alunos.	8	2	-	-	-	-

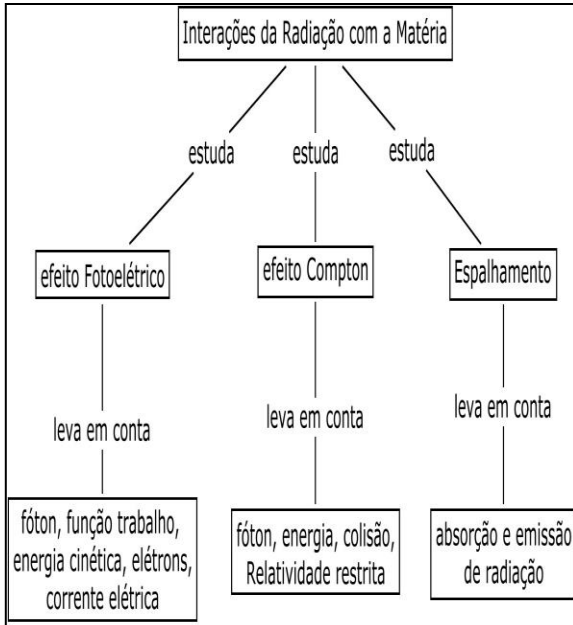
Na Tabela B.1 foram distribuídas as perguntas do questionário por graus de conhecimento e relevância, incluindo a última que trata da construção de um mapa conceitual, para saber como se estabeleceram a aprendizagem cognitiva e a significativa do acadêmico.

A questão 1 foi de resposta direta Sim ou Não, as questões 2 e 3 foram de respostas escritas, as questões 4 a 10 foram de respostas sobre os graus de relevância e a questão 11 foi para construção de um mapa conceitual. Na última questão 11, construíram cada qual o seu mapa conceitual conforme os modelos exemplificados no *Apêndice A*.

2. Exemplos de modelos de mapas conceituais feitos à caneta por alunos da graduação de Física da UFAM e convertidos para os diagramas pelo programa *Cmap Tools*, mostrados

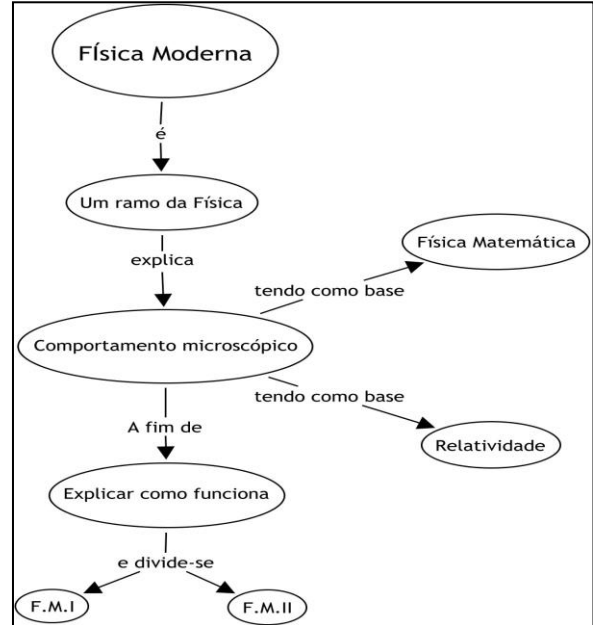
abaixo, conforme questão 11 do questionário, fins de análises das ideias e observações dos procedimentos na organização hierárquica dentro dos conceitos:

Exemplo 1:



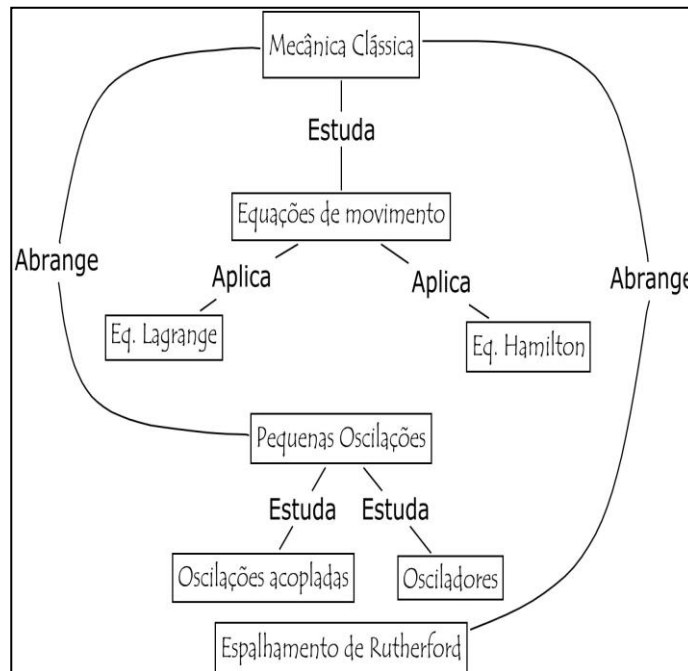
Mapa Conceitual simples das Interações da radiação com a matéria, mostrando os conceitos básicos. (Aluno: 7ºper., Grad. Física da UFAM).

Exemplo 2:



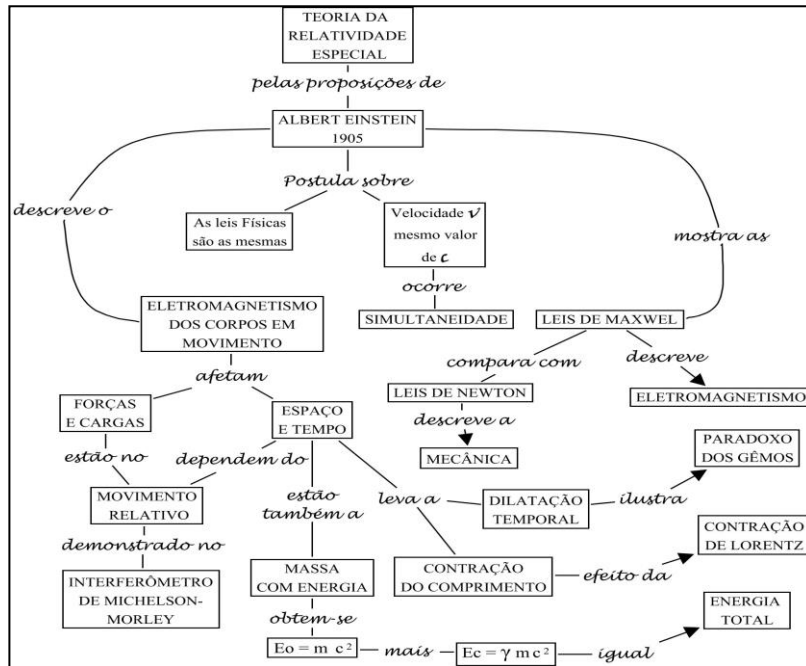
Mapa Conceitual simples dos conceitos básicos da Física Moderna, mostrando ao final que ela resume-se em FMI e FMII (Físicas Modernas I e II). (Aluno: 7ºper. – Grad.Física da UFAM).

Exemplo 3:



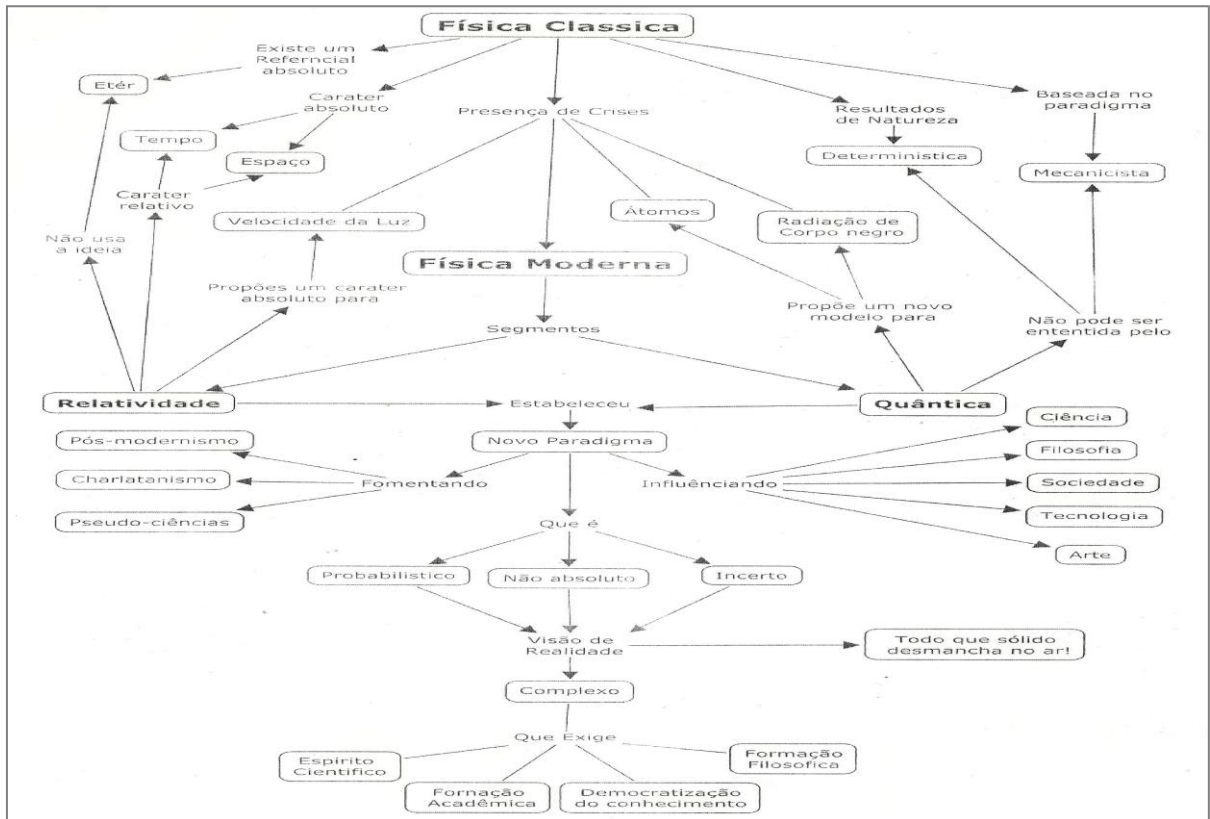
Mapa Conceitual simples, conceituando Mecânica Clássica, ligando conceito de Equações de movimento, pequenas oscilações e Espalhamento de Rutherford. (Aluna: 3ºper., Grad. Física UFAM).

Exemplo 4:



Mapa Conceitual bem definido conceituando a Teoria da Relatividade Especial, com postulados de Einstein, mostrando equações da energia total no final. (Aluno: 7ºper., Grad. Física da UFAM).

Exemplo 5:



Mapa Conceitual, construído com programa de mapas, bem definido, conceituando tópicos da Física Clássica, ligando conceitos da Física Moderna. (Aluno: 7ºper., Grad. Física da UFAM).

Apêndice C

Questionário da Pesquisa de Campo Preliminar em 12.01.12

Ilmº Sr Acadêmico de Física da Universidade Federal do Amazonas

Nome Completo:

Curso:..... Período:/ano:

Foste convidado a participar de uma pesquisa, tendo em vista o seu conhecimento em Física que ajudará na elaboração de um trabalho sobre metodologia de ensino de Física na UFAM.

e-mail: aadalbertomiranda@ig.com.br

Questionário Sobre: “Os Mapas Conceituais de Conteúdos Específicos da Física Clássica e Física Moderna: Ferramenta metodológica no processo de ensino/aprendizagem na Graduação em Física.”

1. Você conhece ou sabe o que é um Mapa Conceitual?

Sim ou Não

2. O que é o Mapa Conceitual? (Pode pesquisar)

R.:

3. Para que serve o Mapa Conceitual?

R.:

4. Você conseguiria fazer um mapa conceitual?

Não relevante Pouco relevante relevante muito relevante

5. Queira pesquisar e responder se o uso de Mapas Conceituais no ensino/aprendizagem de Física é :

Não relevante Pouco relevante relevante muito relevante

6. Os Mapas Conceituais podem ajudar no ensino/aprendizagem da Graduação de Física na UFAM?

Não relevante Pouco relevante relevante muito relevante

7. Os Mapas Conceituais se utilizados pelos docentes em aulas de Física Clássica, o aluno terá mais possibilidades de assimilar os conceitos?

Não relevante Pouco relevante relevante muito relevante

8. Os Mapas Conceituais se utilizados pelos docentes em aulas de Física Moderna, o aluno terá mais possibilidades de assimilar os conceitos?

Não relevante Pouco relevante relevante muito relevante

9. O Professor pode atribuir como tarefa os mapas conceituais para os alunos de Física e eles poderão elaborá-los, construí-los e apresentá-los.

Não relevante Pouco relevante relevante muito relevante

10. Nos mapas conceituais pode inserir aos conceitos equações?

Não relevante Pouco relevante relevante muito relevante

11. Como aluno de Física, construa (crie) manualmente ou graficamente um Mapa Conceitual de conceitos da Física Clássica ou da Física Moderna, com base nos modelos a seguir:

Apêndice D

“Software” “Cmap Tools”

A metodologia utilizada para construção de mapas é a do programa *Cmap Tools*, conforme sequência de passos abaixo:

- 1º. No site da Internet, em pesquisar digite: *Cmap Tools* Grátis em português - Clique: “Enter”;
- 2º. Clique: *CmapTools* - Download (cmaptools.softonic.com.br/) - aparecerá o site: <http://cmaptools.softonic.com.br/>, clique: **Download grátis** - siga as instruções de uso do software no site e faça o “Download Grátis”;

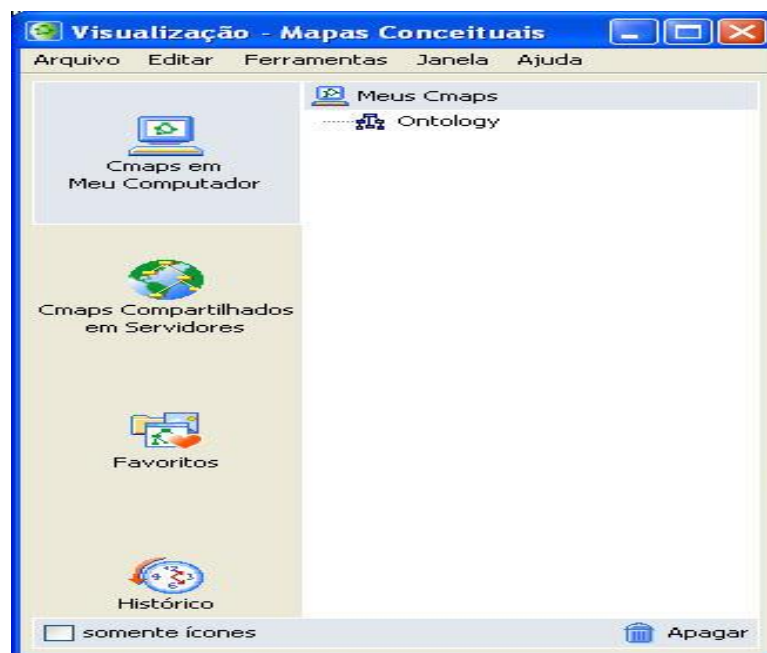


Figura D.1. Exemplo de Janela do Programa “*Cmap Tools*”, aberta para iniciar e salvar os Modelos de Mapas Conceituais criados.

- 3º. Instale o programa no computador e aparecerá na área de trabalho os ícones: “IHC_CmapTools_v5.03_InstallLog” e “CmapTools”.
- 4º. Clique no ícone da área de trabalho: “CmapTools” - aparecerá uma janela de “Visualização – Mapas Conceituais” (Figura D.1):
 - a) Clique em “Arquivo” e depois “Novo Cmap” ; e

b) Aparecerá uma janela “Sem título 1” (*Untitled 1*): “dê um clique-duplo para criar um conceito” (Figura D.2), junto dela aparece a caixa de “Estilos” (*Styles*) para formatação do mapa conceitual.

c) Ao aparecer a primeira caixa do mapa conceitual, digite a(s) ideia(s) e use o mouse para puxar as setas de ligação dos conceitos a outras caixas, até formar o mapa conceitual desejado.

5°. Ao final salve o mapa conceitual em uma pasta com o nome da pesquisa.

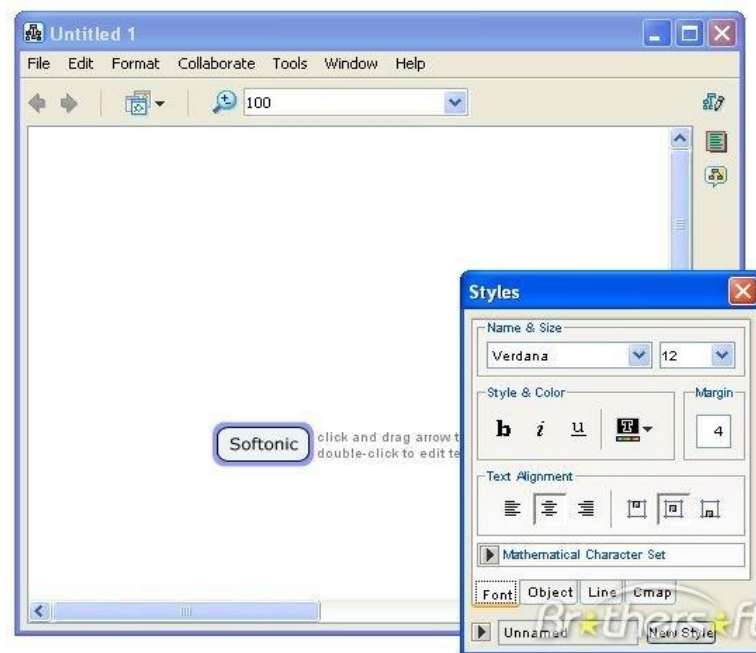


Figura D.2. Exemplo de Janelas do Programa “Cmap Tools” abertas para construção de um Novo Mapa Conceitual “Sem Título”, acompanhada da outra de formatação do estilo de mapa.

Apêndice E

Questionário 1 (Mini-curso:03 a 05.12.12)

Questionário com o objetivo de avaliar os conhecimentos sobre a supercondutividade através de mapas conceituais, que contribuem para uma melhor qualidade de apresentações, aulas, instruções, seminários, palestras, dentre outras. A sua participação mediante este questionário contribuirá com sua experiência e observações relativas ao minicurso.

ATENCIOSAMENTE DEIXO MEU AGRADECIMENTO

Nome Completo:Grad.:

Marque um X na resposta relativa ao seu grau de instrução.

() Aluno de graduação. () Aluno de pós-graduação. () Professor do ensino médio.

Assinale a(s) resposta(s) com X para as questões que tenham parênteses:

1. Qual o seu grau de conhecimento sobre supercondutividade?

- () Excelente.
- () Ótimo.
- () Bom.
- () Regular.
- () Insuficiente.

2. Assinale uma ou mais respostas, se for o caso, quanto ao local que você tenha adquirido conhecimentos em supercondutividade.

- () Curso Preparatório.
- () Ensino Médio.
- () Graduação.
- () Pós-Graduação.
- () Não adquiriu conhecimentos neste assunto.

3. A que área(s) da Física pertence a supercondutividade?

- () Física Clássica.
- () Física Moderna.
- () Física Contemporânea.
- () Não lembra mas estudou sobre o assunto.
- () Não sabe.

4. Qual o seu grau de conhecimento sobre mapas conceituais?

- () Excelente.
- () Ótimo.
- () Bom.
- () Regular.
- () Insuficiente.

5. Qual o seu grau de conhecimento quanto ao uso de Mapa conceitual na explicação da supercondutividade?

- () Não Relevante.
- () Pouco Relevante.
- () Relevante.
- () Muito Relevante.

6. Um professor com conhecimento de supercondutividade pode atribuir como tarefa: elaboração, construção e apresentação de mapas conceituais para os alunos?

- () Não Relevante.
- () Pouco Relevante.
- () Relevante.
- () Muito Relevante.

7. Responda qual o grau de relevância quanto a sua capacidade em criar um mapa conceitual sobre a supercondutividade ou conceitos relacionados a ela?

- () Não Relevante.
- () Pouco Relevante.
- () Relevante.
- () Muito Relevante.

8. Responda com poucas palavras o que é Supercondutividade e quais as suas aplicações?

.....
.....

9. Responda com poucas palavras o que é Mapa Conceitual?

.....

10. Quais os meios que você pode utilizar ou empregar para criar Mapas Conceituais?

.....

Apêndice F

Questionário 2 (Mini-curso:03 a 05.12.12)

Questionário com o objetivo de avaliar os conhecimentos sobre a supercondutividade através de mapas conceituais, que contribuem para uma melhor qualidade de apresentações, aulas, instruções, seminários, palestras, dentre outras. A sua participação mediante este questionário contribuirá com sua experiência e observações relativas ao minicurso.

ATENCIOSAMENTE DEIXO MEU AGRADECIMENTO

Nome Completo: Grad.:

Marque um X na resposta relativa ao seu grau de instrução.

() Aluno de graduação. () Aluno de pós-graduação. () Professor do ensino médio.

Assinale a(s) resposta(s) com X para as questões que tenham parênteses:

1. Qual o seu grau de avaliação quanto aos conhecimentos adquiridos neste minicurso sobre a supercondutividade?

- () Excelente.
- () Ótimo.
- () Bom.
- () Regular.
- () Insuficiente.

2. Responda quanto ao grau de relevância se as teorias ministradas com ilustrações e animações, seguidas de Vídeo clips, ajudou na aprendizagem sobre supercondutividade?

- () Não Relevante.
- () Pouco Relevante.
- () Relevante.
- () Muito Relevante.

3. Qual o seu grau de conhecimento sobre mapas conceituais?

- () Excelente.
- () Ótimo.
- () Bom.
- () Regular.
- () Insuficiente.

4. Qual o grau de relevância ministrar aulas com Mapas Conceituais sobre a supercondutividade?

- () Não Relevante.
 () Pouco Relevante.
 () Relevante.
 () Muito Relevante.

5. Um professor com conhecimento de supercondutividade pode atribuir como tarefa: elaboração, construção e apresentação de mapas conceituais para os alunos?

- () Não Relevante.
 () Pouco Relevante.
 () Relevante.
 () Muito Relevante.

6. Qual o grau de relevância quanto a sua capacidade em criar um mapa conceitual sobre a supercondutividade ou conceitos relacionados a ela?

- () Não Relevante.
 () Pouco Relevante.
 () Relevante.
 () Muito Relevante.

7. Qual a sua concepção sobre Mapa Conceitual?

.....

9. Pesquise e responda com poucas palavras o que são: Efeito Meissner, Teoria de Ginzburg-Landau e a Teoria BCS?

.....

.....

.....

8. Quais aplicações da supercondutividade contribui para a tecnologia?

.....

10. Utilize o *Software Cmap Tools* e construa um mapa conceitual sobre o fenômeno da supercondutividade ou conceitos relacionados a ela. (salvar em pen-drive, entregar na última aula ou enviar por e-mail). Escreva o tema principal:

Apêndice G

Tabela Periódica

A tabela periódica dos elementos químicos abaixo tem como objetivo favorecer as consultas de elementos que fazem parte das características dos supercondutores do Tipo I e do Tipo II conhecidos.

Tabela G.1. Tabela periódica para consulta dos elementos supercondutores conhecidos.

KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS																							
■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE ■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE																							
1	2																	10	11				
3	4																	5	6	7	8	9	10
11	12																	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86						
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112												

SUPERCONDUCTORS.ORG

* Lanthanide Series

+ Actinide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Apendice H

Figuras: aplicação da supercondutividade

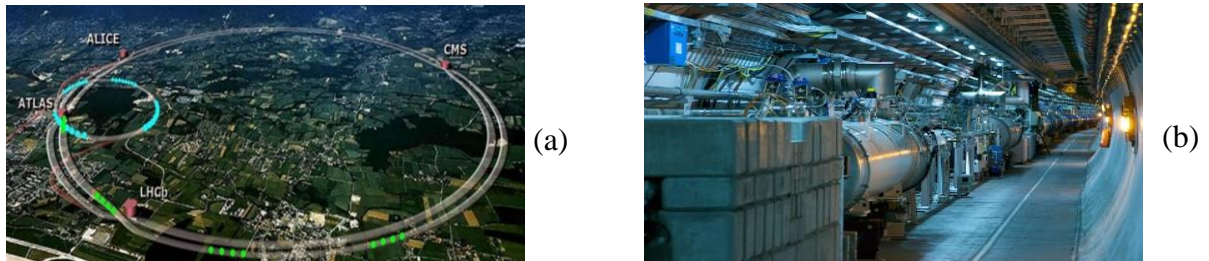


Figura H.1. (a) Acelerador de Partículas (LHC) localizado na Suíça estendendo-se até parte da França; (b) Interior do Acelerador de Partículas onde os fios supercondutores são utilizados nos eletroímãs do LHC (foto2: Rainer Hungershausen/ CC BY-NC-ND 2.0)

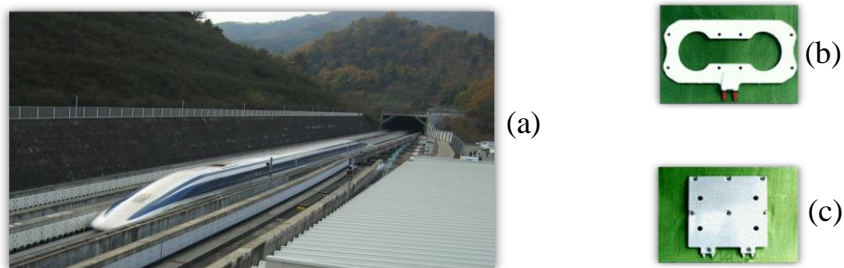


Figura H.2. (a) a imagem de um trem MAGLEV, sob levitação magnética, deslocando-se sobre uma pista (corredor) contendo nas laterais bobinas supercondutoras; (b) bobinas de levitação; e (c) bobinas de propulsão.

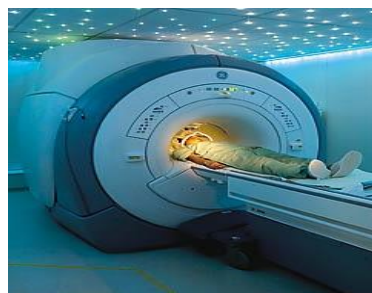


Figura H.3. Equipamento de Ressonância Magnética.

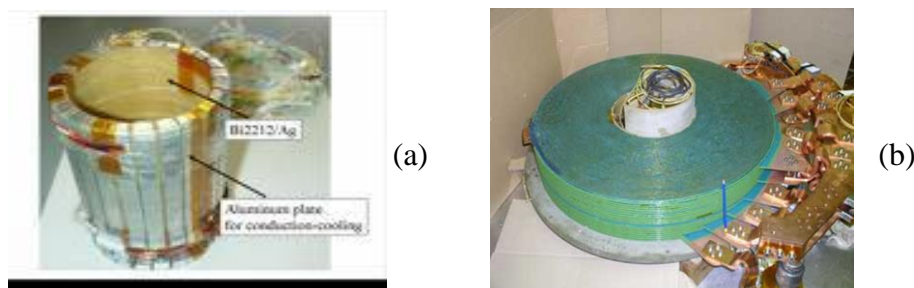


Figura H.4. (a) Imagem da bobina magnética supercondutora usada no SMES. (imagem: DIGINFO); (b) Bateria supercondutora SMES.

Referências

- [1] I. S. Oliveira. *Introdução à Física do Estado Sólido/Ivan S. Oliveira, Vitor L. B. de Jesus*. 1ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física (2005)
- [2] D. A. Stariolo. *Introdução a Física da Matéria Condensada*. Rio Grande do Sul: UFRS, Departamento de Física (2009)
- [3] R. Eisberg and R. Resnick. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Editora Campus/Elsevier (1979)
- [4] C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. Seventh Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. (New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore) (1996)
- [5] F. Ostermann and P. Pureur. *Supercondutividade: Temas Atuais de Física*. 1ª edição. São paulo: Editora Livraria da Física e SBF (2005)
- [6] P. B. Silva. *Propriedades estruturais, microestruturais e supercondutoras de $Ca_{0,5}La_{0,5}Ba_{1,5}[(CuO)_{1-x}(MS)_x]_3$ com $M = Zn$ e Ni* . Recife-PE: UFPE (2004)
- [7] M. G. Silva. *Assimetria no GAP dos supercondutores de Altas Temperaturas*. Manaus: UFAM, Departamento de Física (2009)
- [8] C. L. S. Lima. *Efeito de dopagem de sulfetos de metais 3d nas propriedades supercondutoras de Bi-2212*. Recife: UFPE (2002)
- [9] C. P. Poole Jr. *Handbook of Superconductivity*. San Diego, Academic Press (2000)
- [10] K. D. Machado. *Teoria do Eletromagnetismo*. Volume 2. Ponta Grossa-PR: Editora UEPG (2002)
- [11] M. B. S. Costa and A. C. Pavão *Supercondutividade: um século de desafios e superação*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 2, 2602 (2012). Pernambuco: UFPE (2012)
- [12] A. Moreira *et al.* *Materiais Supercondutores*. Minas Gerais: UFMG (2000) <www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/disciplinas/materiais/trab2.pdf>.
- [13] A. J. C. Lanfredi. *Propriedades Elétricas, Estruturais e Magnéticas de Supercondutores Hole-Doped e electron-Doped dos Tipos $YBa_2Cu_3O_{7-d}$, $Pr_{2-x}Ce_xCuO_{4-y}$ E $Sm_{2-x}Ce_xCuO_{4-y}$* . São Carlos-SP: UFSCar, PPGFÍS (2001)
- [14] P. S. Branício. *Introdução a Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MgB2: Uma Abordagem Didática*. São Carlos-SP: UFSC, Departamento de Física (2001)
- [15] L. Bleicher and J. M. Sasaki. *Introdução a Difração de Raios-X em Cristais*. Ceará: UFCE (2000)

- [16] E. B. Ortiz. *Interface de Controle e Caracterização de MicroSQUIDS Histeréticos*. Rio de Janeiro: CBPF (2007)
- [17] J. M. Blatt. *Theory of Superconductivity*. (Applied Mathematics Department, University of New South Wales). Volume 17 in Pure and applied Physics. Kensington, N.S.W., Australia: Academia Press (AP) - New York e London (1964)
- [18] F. S. Rocha and H. A. Fraquelli. *Roteiro para a experiência de levitação de um ímã repelido por um supercondutor no Ensino de Física*. Revista Brasileira do Ensino de Física (v. 26, n. 1, p. 11-18). Rio Grande do Sul: UFRS (2004)
- [19] L. S. Amorim. *Efeito Casimir em placas de plasma e energia de Condensação do supercondutor do tipo (Hg, Pb) $Ba_{2-x}Sr_xCa_2Cu_3O_{8+\delta}$* . Vitória-ES: UFES-PPGFÍS (2010)
- [20] S. Fujita and S. Godoy. *Quantum Statistical Theory of Superconductivity*. (Selected topics in Superconductivity). United States of America: Kluwer Academic Publishers (New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow) (2002)
- [21] L. D. Landau and G. L. Ginzburg. *On the Theory of Superconductivity Collected Papers of L. D. Landau*, Pergamon Press (1965)
- [22] G. C. Costa. *Estudo da Levitação Magnética e Determinação da corrente crítica de blocos supercondutores de alta T_c pelo métodos dos elementos finitos*. Rio de Janeiro: UFRJ, COPPE (2005)
- [23] M. C. V. Pascolati. *Dinâmica de Vórtices em Filmes Finos Supercondutores de Superfície Variável*. Bauru-SP: UNESP-PPGCTM (2010)
- [24] S. R. A. Salinas. *Introdução à Física Estatística*. 2º ed. 2ª reimpr. São Paulo: Edusp (2008)
- [25] P. A. Tipler and R. A. Llewellyn. *Física Moderna*. Terceira edição. Rio de Janeiro-RJ: LTC Editora, p.154-156 (2001)
- [26] A. Mourachkine. *Room-Temperature Superconductivity*. Cambridge International Science Publishing. 7 Meadow Walk, Great Abinton, Cambridge CB1 6AZ, UK (2004)
- [27] C. Cohen-Tannoudji; B. Diu; and F. Laloe. *Quantum Mechanics*. 1a edicao. Wiley, Vol.1 (1977)
- [28] C. R. A. Lima. *Superfluidéz e Supercondutividade (Estrutura da Matéria)*. Capítulo 14. Primeira Edição. São Paulo: USP (2005)
- [29] C. V. Deimling. *Propriedades Inter e Intragranulares de Amostras Mesoscópicas de $YBa_2Cu_3O_{7-3}$ Preparadas por Síntese Química*. São Carlos: UFSCAR (2010)
- [30] D. F. Souza. *Supercondutividade: um estudo sobre os seus 100 anos*. Manaus: UFAM (2012)
- [31] V. L. Ginzburg. *On Superconductivity and Superfluidity (Nobel Lecture, December 8, 2003 by Vitaly L. Ginzburg)*. P. N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia: (2003)

- [32] V. L. Ginzburg and L. Landau, *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki* 20, 1064 (1950)
- [33] M. Motta. *Inhomogeneidades estruturais em amostras nanoscópicas de supercondutores de alta temperatura crítica*. Bauru: UNESP (2009)
- [34] A. M. Luiz. *Aplicações da Supercondutividade*. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo (1992)
- [35] C. Polk *et al.* *Superconductive Magnetic Energy Storage (SMES)*. External Fields and Safety Considerations. USA: IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No.1, January (1992)
- [36] I. J. C. De Paulo. *A Aprendizagem Significativa Crítica de conceitos da Mecânica Quântica Segundo a Interpretação de Copenhagem e o Problema da Diversidade de Propostas de Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio*. Tesis Doctoral. Burgos: Universidade de Burgos e UFRS (2006)
- [37] A. G. Miranda. *Os Mapas Conceituais dos Conteúdos Específicos da Física Clássica e da Física Moderna: Ferramenta Metodológica no processo de ensino/aprendizagem na Graduação em Física*. Artigo. Manaus-AM: UFAM-PPGFIS (2012)
- [38] R. P. Junior. *O Uso de Mapas Conceituais na Avaliação: um estudo da viabilidade de utilização em um curso de Física de Ensino Médio*. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: UFMG (2003)
- [39] V. O. Almeida. *Os Mapas Conceituais como Instrumentos Potencialmente Facilitadores da Aprendizagem Significativa de Conceitos da Óptica Física*. Dissertação de Mestrado em Física. Porto Alegre: UFRS (2006)
- [40] O. C. Araujo. *O Efeito Meissner em super turbinas eólicas*. Brasília-DF: UCB, Pró-Reitoria de Graduação - Física (2011)
- [41] R. R. Souza. *Usando Mapas Conceituais na Educação Informatizada Rumo a um Aprendizado Significativo* (Trabalho final para Introdução à Mídia e ao Conhecimento). Artigo (1999) Disponível em: <<http://www.edutecnet.com.br/Textos/Alia/MISC/edrenato.htm>>. (in 30/01/2012)
- [42] M. A. Moreira. *Mapas Conceituais e Diagramas V*. Rio Grande do Sul: UFRGS, Instituto de Física, p.9-10 (2006)
- [43] M. A. Moreira *et al.* *Mapas conceituais como instrumento de avaliação em um curso introdutório de Mecânica Quântica*. Artigo. Rio Grande do Sul: R.E.B.E.C.T., Vol.1, num. 3 (2008)
- [44] D. P. Ausubel *et al.* *Psicologia Educacional*. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Interamericana (1980)
- [45] M. A. Moreira. *Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa (Concept maps and meaningful learning)*. Porto Alegre-RS: Instituto de Física, UFRGS (1997) <www.if.ufrgs.br/~moreira>

[46] S. C. Yamazaki. *Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel (Material preparado para a disciplina de Estágio Supervisionado em Ensino de Física)*. Mato Grosso do Sul: Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (2008)

[47] D. P. Ausubel *et al.* *Psicología Educativa: un punto de vista cognoscitivo*. México: Trilhas (1983)

[48] J. D. Novak. *Concep maps: What the heck is this? (Excerpted, rearranged (and annotated) from an online manuscript by Joseph D. Novak, Cornell University)*. Ithaca, NY: Cornell University Press (2008)

[49] M. A. Moreira. *Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa*. 1ª Edição. São Paulo: Centauro Editora (2010)

[50] A. O. Peña *et al.* *Mapas Conceituais: Uma técnica para aprender*. Tradução: Maria José Rosado-Nunes / Thiago Gambi. São Paulo: Edições Loyola (2005)