



SUPERCONDUTIVIDADE NO LABORATÓRIO DIDÁTICO DA LICENCIATURA EM FÍSICA: UMA ESTRATÉGIA PARA INSERÇÃO DA FMC NO ENSINO MÉDIO

Guilherme Martins Bombardi¹

Milton Batista Ferreira Junior², Michael Dowglas de Gois Silva³, Rafael Zadorosny⁴

¹Universidade Estadual Paulista / guilherme.bombardi@unesp.br

²Universidade de Rio Verde / milton.junior@unirv.edu.br

³Universidade de Rio Verde / michael@unirv.edu.br

⁴Universidade Estadual Paulista / rafael.zadorosny@unesp.br

Resumo:

Este artigo relata uma experiência acerca da aplicação de uma atividade experimental sobre o fenômeno da supercondutividade para alunos de um curso de Licenciatura em Física, durante a disciplina de Laboratório Didático. A inserção do tópico de supercondutividade na formação inicial destes futuros professores foi pensada para que se sintam aptos a discutirem o tema quando lhes for oportuno. Os relatos dos licenciandos revelam que houve a compreensão das principais propriedades do estado supercondutor, e sugerem a possibilidade de inserção do conteúdo no Ensino Médio. Dessa forma, a atividade experimental desenvolvida, bem como a reflexão sobre as finalidades da educação básica, se mostrou ferramentas em potencial na formação inicial do professor para a subsequente inserção deste tópico de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio.

Palavras-chave: Física Moderna e Contemporânea. Supercondutividade. Licenciatura em Física.

Introdução

Desde a década de 90 há uma tentativa de se inserir Física Moderna e Contemporânea (FMC) na educação básica brasileira. Vários pesquisadores apontam a relevância da construção desses conhecimentos para a formação de cidadãos conscientes em relação aos avanços científicos e tecnológicos.

Para Ostermann, Ferreira e Cavalcanti (1998), o ensino de tópicos de FMC no ensino médio pode despertar a curiosidade do estudante, favorecendo a compreensão da Física como construto social e, portanto, aproximando-a dele. Permite, ainda, o contato do estudante com o conhecimento físico atual, para além da Física desenvolvida até o século XIX, além de estimular jovens estudantes a seguir a carreira científica.

A partir da reflexão sobre as finalidades da educação, do papel do currículo como interlocutor entre habilidades e competências a serem desenvolvidas em âmbito escolar e, com a promulgação da Lei de Diretrizes e Bases (BRASIL, 1996), seguida pelo lançamento dos Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002), esse movimento é evidenciado.

Porém, alguns obstáculos para a consolidação do ensino de FMC na educação básica

precisam ser superados. Questões como, carga horária reduzida da disciplina, falta de material didático, pouco apoio pedagógico e insegurança conceitual, são fatores apontados com frequência por professores que ministram aulas de Física quando indagados sobre a possibilidade de se contemplar tópicos de FMC em suas aulas (OLIVEIRA, VIANA e GERBASSI, 2007).

A Sociedade Brasileira de Física (SBF), tem se engajado para transformar essa realidade nas escolas da educação básica. Em 2003, a instituição organizou uma série de livros que abordam conteúdos de FMC, destinados a esses professores. No mesmo ano, foi criada uma comissão para debater e traçar as metas do ensino de Física para os próximos anos. Em 2005, no Simpósio Nacional de Ensino de Física (XVI SNEF), a comissão apresentou que um dos desafios a ser superado, seria a formação dos professores, pois geralmente a Licenciatura enfatiza o ensino da Física Clássica (SALES et al., 2008).

Desde então, tópicos como natureza dual da luz, teoria da relatividade, radiação, física de partículas, estrutura da matéria, mecânica quântica, física nuclear, astronomia e cosmologia, nanociência e nanotecnologia, semicondutores e supercondutores, lasers, podem ser encontrados em periódicos brasileiros. Entretanto, a supercondutividade é um dos tópicos que aparece em menor quantidade de publicações (ARAÚJO, 2018).

Parece haver certa resistência dos professores em explorar fenômeno da supercondutividade. Segundo Pereira e Felix (2011), os próprios livros didáticos comumente adotados pelas universidades brasileiras nos cursos de Física, Química e Engenharias, dão pouca ênfase nesse tópico. Isso pode ser pelo grau de complexidade na formulação teórica/matemática do tópico e a necessidade de laboratórios sofisticados para realização de experimentos.

É notório que a formação inicial do professor é determinante para sua atuação enquanto docente. As práticas de ensino e os modelos científicos tendem a ser reproduzidos na transposição didática.

Cabe ressaltar que a supercondutividade é um fenômeno responsável por grande parte do avanço tecnológico do final do século XX, estando presente em aceleradores de partículas, possibilitando a compreensão de aspectos relacionados às questões intrínsecas da matéria, e até mesmo em aparelhos de Ressonância Magnética, revolucionando a medicina.

Além disso, o potencial tecnológico de dispositivos que se beneficiam do fenômeno em questão, é capaz de revolucionar o modo de vida da sociedade contemporânea, seja nas formas

de transmissão e armazenamento de energia elétrica ou ainda no transporte de pessoas em grandes centros urbanos, como por exemplo, em *Superconducting Magnetic levitation transport* (MagLev supercondutor). Dessa forma, o tópico de supercondutividade é indispensável no ensino de Física por tratar as relações entre a Ciência, a Tecnologia e a Sociedade (OSTERMAN e MOREIRA, 2001; OSTERMAN, 2006).

Diante do exposto, pretende-se neste trabalho relatar uma experiência realizada em uma turma de graduação em Licenciatura em Física da Universidade Estadual Paulista, campus de Ilha Solteira, cujo objetivo foi explorar o fenômeno da supercondutividade a partir de uma atividade experimental qualitativa. A atividade experimental que será apresentada desmistifica a ideia de que é necessário laboratórios altamente sofisticados para realização de experimentos que evidenciam o fenômeno. Dessa maneira, espera-se que este grupo de futuros professores adquiram consciência teórica para que se sintam aptos a discutir sobre esse tópico quando lhes for oportuno em sua vida profissional.

Na sequência será apresentada a metodologia empregada no desenvolvimento deste trabalho, uma breve fundamentação histórica e teórica apresentando as propriedades do estado supercondutor, a descrição da atividade experimental, as reflexões dos licenciandos em relação a inserção do tópico de supercondutividade na educação básica e, por fim, as considerações finais.

Metodologia

A turma com a qual foi realizado este trabalho era constituída de 5 acadêmicos do sexo masculino, com idades entre 21 e 25 anos, cursando o 3º semestre do curso de Licenciatura em Física, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp-Ilha Solteira), na disciplina de Laboratório Didático de Física III. Sua ementa contempla os seguintes tópicos: Teoria sobre o ensino por meio de atividades experimentais, Multímetro; campo elétrico; lei de Ohm e resistividade; associação de resistores e ponte de Wheatstone; Circuitos com indutores e capacitores.

Na ocasião, um dos autores deste trabalho (graduando), tendo em vista a problemática descrita na parte introdutória e conhecendo matriz curricular do curso, que não contempla de forma específica o tópico de supercondutividade, elaborou e ministrou uma aula de duração de 110 min dividida em dois momentos: (1) discussão teórica e histórica do fenômeno da supercondutividade e (2) realização de atividade experimental.

O primeiro momento foi destinado à discussão histórica e fenomenológica da supercondutividade, objetivando discutir as principais propriedades do estado supercondutor usando-se de uma exposição dialogada mediada por uma apresentação de *slides*. O segundo momento teve como objetivo evidenciar a diferença entre o estado normal de condução e o estado supercondutor utilizando-se de uma fita supercondutora comercial, a partir de medidas de tensão e corrente elétrica quando em temperatura ambiente e após sua submersão em nitrogênio líquido.

Ao finalizar a aula, foi realizada uma avaliação conceitual, buscando identificar se houve compreensão das propriedades básicas do estado supercondutor e uma reflexão para verificar a percepção dos licenciandos em relação a possibilidade e relevância do ensino de supercondutividade na educação básica.

Supercondutividade

Em 1911, ao investigar a resistência elétrica de alguns metais, em temperaturas extremamente baixas, Heike Karmeligh Onnes, pioneiro em técnicas de refrigeração (liquefez o gás hélio, cuja temperatura é de 4,2 K) e seu assistente Gilles Holst, verificaram que a resistência elétrica do mercúrio (Hg) diminuía de forma abrupta em torno de 4,2 K, como pode ser visto na Figura 1.

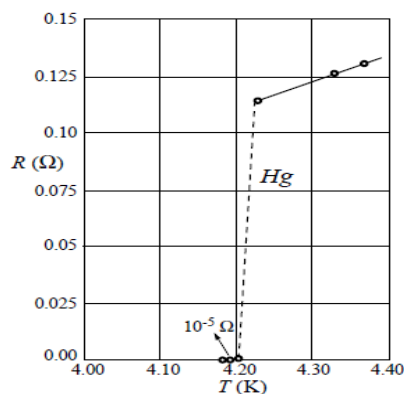


Figura 1: Dados experimentais da Resistência x Temperatura para o Hg. Fonte: MOURACHKINE, 2004.

Tal evidência chamou muita atenção dos pesquisadores e, ao longo de 22 anos, imaginava-se que a supercondutividade era um fenômeno relacionado apenas à perda de resistência elétrica de alguns metais em uma determinada temperatura (Temperatura crítica - T_c). Após a descoberta da supercondutividade do mercúrio, observou-se que outros metais, tais como, chumbo (1913) e nióbio (1930), também apresentam tal comportamento.

Cabe ressaltar que embora boa parte dos elementos metálicos apresentem o fenômeno da supercondutividade, nem todos os metais considerados “bons condutores” em temperatura ambiente (ouro, cobre e prata, por exemplo), apresentam o estado supercondutor.

Em 1933, os físicos alemães Meissner e Ochsenfeld descobriram que quando um campo magnético \vec{H} é aplicado sobre um material supercondutor acima da T_c (temperatura crítica abaixo da qual o material se torna supercondutor) e em seguida é resfriado abaixo desta temperatura, ocorre a expulsão de todo fluxo magnético de seu interior (Figura 2).

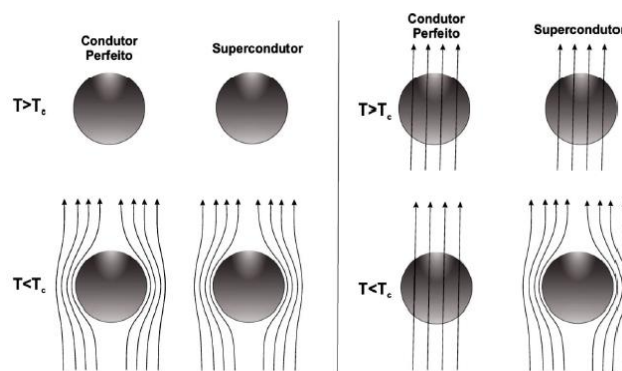


Figura 2: Resposta magnética de um condutor perfeito e de um supercondutor a aplicação de um campo magnético externo. Fonte: PRESOTTO, 2017.

Logo, o campo de indução magnética, $\vec{B} = 0$ no interior do supercondutor e, conseqüentemente, a magnetização \vec{M} , que é uma função-resposta de determinados materiais quando sob ação de campos magnéticos, vale $-\vec{H}$, conforme a relação constitutiva dos campos magnéticos como descrita pela Equação 1.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

Equação 1: Relação constitutiva dos campos magnéticos.

Essa magnetização surge devido ao aparecimento de correntes superficiais que blindam o material do campo magnético externo, gerando, assim, um campo de igual intensidade, porém de sentido oposto ao do campo aplicado. Em síntese, foi constatado que a distribuição de campo magnético no interior de um supercondutor é nula quando resfriado na presença de um campo magnético \vec{H} , ou seja, $\vec{B} = 0$.

Cabe ressaltar que a expulsão de campo magnético do interior de um supercondutor não é consequência da lei de Faraday, já que, como descrito no parágrafo anterior, a resposta ao campo magnético externo ocorre mesmo em campos estáticos. Dessa forma, as propriedades básicas de um supercondutor são: resistividade elétrica nula (condução de energia elétrica sem

dissipação) e diamagnetismo perfeito ou efeito Meissner (expulsão do fluxo magnético).

Nesse sentido, o estado supercondutor depende do controle de três parâmetros: campo magnético externo, densidade de corrente elétrica aplicada no material e temperatura. A aplicação de um \vec{H} provoca a diminuição da T_c até certo valor e que, se superado, o material deixa de apresentar o estado supercondutor. O mesmo ocorre quando uma densidade de corrente contínua superior a um valor limite (densidade de corrente crítica) percorre o material. Só lembrando que $I = JA$, sendo A a área de seção transversal por onde a densidade de corrente flui.

Embora as propriedades supercondutoras se mostrem interessantes do ponto de vista de aplicações tecnológicas, o grande gargalo da supercondutividade são os baixos valores de T_c . Porém, a compreensão do estado supercondutor instigou pesquisadores do mundo todo pela busca de materiais que apresentassem tal propriedade em temperaturas mais próximas da temperatura ambiente. Nesse sentido, o ano de 1987 é um marco com a descoberta do material cerâmico constituído pelos elementos de Ítrio-Bário-Cobre-Oxigênio (YBCO), que apresenta T_c de aproximadamente -181°C (92 K) em pressão ambiente. Cabe ressaltar que o nitrogênio líquido possui uma temperatura de ebulição de 77 K, dessa forma, a obtenção de líquido criogênico para o resfriamento desses materiais se tornou mais fácil e barato.

Em outubro de 2020, uma publicação na Revista *Nature* descreve um composto de hidreto de enxofre que apresenta o estado supercondutor a 15°C (288 K), porém sob uma pressão de 220 GPa, que é superior à metade da pressão no núcleo da Terra.

Atividade experimental

Considerando um material no estado supercondutor, isto é, resfriado abaixo da T_c , pode-se determinar a corrente crítica a partir de um gráfico da diferença de potencial V em função da corrente elétrica I , tal como representado na Figura 3.

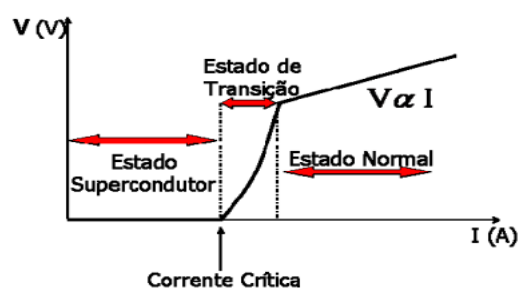


Figura 3: Gráfico $V \times I$ da transição do estado supercondutor para o estado normal de condução elétrica. Fonte: FREITAS, 2009.

Nota-se que V é nula quando o material está no estado supercondutor, como consequência da resistividade nula. A partir de certo valor de corrente elétrica V se torna diferente de zero, implicando na existência de um estado resistivo (estado normal). Este valor de corrente corresponde à corrente crítica, I_c , e indica o início do estado de transição supercondutor-normal.

Dessa forma, a partir do valor de corrente crítica, o material apresenta um estado parcial de supercondutividade, no qual há regiões supercondutoras coexistindo com regiões normais. A partir de outro valor de corrente, se encerra este estado de transição e a amostra apresenta apenas o estado normal de condução, exibindo, portanto, resistência à passagem de corrente elétrica.

A atividade experimental desenvolvida com os licenciandos permite a verificação do estado supercondutor por meio da resistividade nula apresentada pelo supercondutor, a partir do levantamento de uma curva característica ($V \times I$), tal como representada na Figura 4, bem como a determinação da I_c do material supercondutor estudado.

Materiais e procedimentos da atividade experimental

Para a montagem do circuito foram utilizados: uma fita supercondutora cerâmica de Ítrio-Bário-Cobre-Oxigênio (YBCO) da *SuperPower*®, modelo SF12050, cuja T_c corresponde a 92 K (-181°C), coberta por folhas finas de cobre; um multímetro digital configurado para medir a corrente elétrica no circuito; um osciloscópio analógico para medir a tensão elétrica sobre a fita supercondutora; uma *proto-board*; um resistor de cerâmica de 150Ω-50W para proteger os equipamentos de uma possível corrente de curto-circuito; uma fonte de tensão DC ajustável; e cabos conectores.

A Figura 4 apresenta uma fotografia da fita supercondutora, utilizada na atividade experimental, com quatro contatos de cobre soldados com estanho, para serem feitas as medidas elétricas. Na Figura 5 é apresentado o esquema do circuito elétrico para a realização das medidas e a fotografia da montagem do aparato experimental.



Figura 4: Fotografia da fita de YBCO com terminais para medidas elétricas.

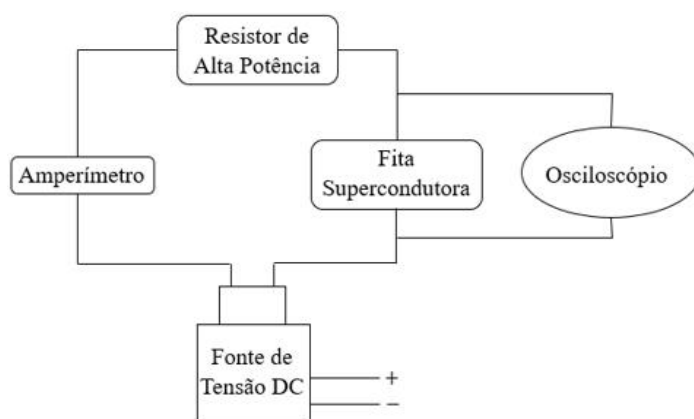


Figura 5: Representação do circuito elétrico do experimento e fotografia do aparato experimental.

O estudo do comportamento elétrico da fita supercondutora foi realizado a partir das medidas de tensão e corrente elétrica quando a fita se encontra em temperatura ambiente (Etapa I) e quando é resfriada com nitrogênio líquido (Etapa II). Na etapa I, as medidas elétricas foram realizadas à temperatura ambiente (29°C) para verificar o comportamento do material (parâmetro de controle). Variando o valor da tensão da fonte DC, mediu-se a corrente no circuito (multímetro), bem como a tensão sobre a fita supercondutora (osciloscópio). Na etapa II, a fita supercondutora foi colocada em um recipiente de isopor (calorímetro) contendo nitrogênio líquido (-196°C). Após o equilíbrio térmico ser atingido, registrou-se valores de corrente e tensão, variando a tensão aplicada. Foram registrados cinco valores de corrente e tensão nas duas etapas.

Resultados e discussão da atividade experimental

Os dados experimentais foram registrados pelos licenciandos e organizados na Tabela 1. A partir dos dados da Tabela 1 e com auxílio de software específico, gráficos de tensão em função da corrente foram construídos. Na Figura 6, o gráfico (a) é referente às medidas da Etapa

I. Um ajuste linear dos pontos, que permite observar com clareza o comportamento ôhmico (proporcionalidade entre a tensão e a corrente), foi realizado. Tal comportamento, à temperatura ambiente, se refere à condução da corrente elétrica pelas folhas de cobre que encerram o material supercondutor da fita, já que o YBCO é um isolante à temperatura ambiente e, então, a corrente flui pelo condutor.

Tabela 1: Dados experimentais na Etapa I (29°C) e na Etapa II (-196°C)

Etapa I		Etapa II	
Corrente elétrica (mA)	Diferença de potencial (mV)	Corrente elétrica (mA)	Diferença de potencial (mV)
49,3	0,3	43,9	0,1
66,1	0,4	103,3	0,1
81,8	0,5	136,0	0,1
96,7	0,6	160,3	0,1
115,5	0,7	188,2	0,2

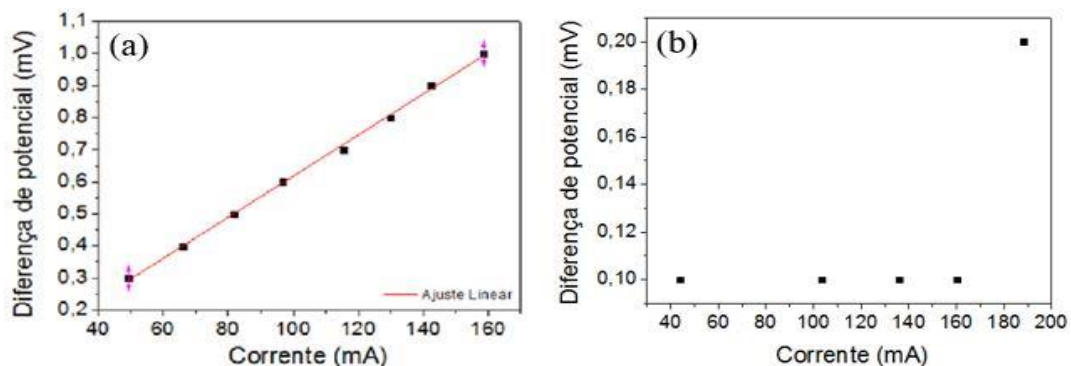


Figura 6: Gráficos da tensão em função da corrente na etapa I (a) e na etapa II (b).

Já o painel (b) da Figura 6 representa os dados da Etapa II. Observa-se que os quatro primeiros pontos estão contidos em uma linha paralela ao eixo da corrente, semelhantemente ao comportamento do estado supercondutor apresentado na Figura 3. Embora os pontos não estejam em V nulo, essa divergência é esperada devido à resistência dos contatos feitos com solda de estanho.

Neste sentido, conclui-se que a fita, ao ser resfriada com nitrogênio líquido, apresenta comportamento característico do estado supercondutor. Além disso, ainda em relação ao gráfico (b), o último valor de corrente registrado de $188,2\text{ mA}$ é, provavelmente, o valor

correspondente a corrente crítica (I_c), ou seja, a corrente responsável por desfazer o estado supercondutor.

Percepção dos licenciandos

Ao finalizar a aula foi realizada uma avaliação conceitual sobre as propriedades e os parâmetros críticos que caracterizam um material supercondutor. Todos os licenciandos conseguiram responder os questionamentos com êxito, demonstrando compreensão do fenômeno.

Em relação à atividade experimental, consideraram-na relativamente simples de execução e análise, evidenciando com clareza a perda de resistência elétrica quando a fita é resfriada abaixo de T_c . Entretanto, ponderaram ser de difícil reprodução na educação básica, visto que os materiais utilizados, tais como, multímetros, nitrogênio líquido e a própria fita supercondutora, não serão de fácil acesso.

Cabe ressaltar que o objetivo da atividade experimental foi oportunizar o contato dos licenciandos com o fenômeno da supercondutividade, de modo a facilitar a compreensão dos conceitos envolvidos contribuindo para a formação de conceitos relacionados a FMC. Dessa forma, esses conteúdos podem ser difundidos com clareza quando da sua atuação em sala de aula. Nesse sentido, é possível notar que a experiência provocou a reflexão sobre tal possibilidade. Nas palavras dos licenciandos:

Licenciando A: *“Hoje posso afirmar que tenho um pouco mais de clareza em relação ao fenômeno da supercondutividade, pois em Física III até vimos a relação da temperatura com a resistividade elétrica para metais, mas não chegamos a discutir profundamente”*.

Licenciando B: *“Embora acho meio complexo abordar temas de Física Moderna no Ensino Médio, vejo que não temos escapatória. Tenho certeza que falar sobre MagLev para os alunos, é algo que chama muita atenção. Já tinha ouvido falar sobre, mas hoje entendi que a levitação magnética tem relação com a supercondutividade”*.

Licenciando C: *“Considero importante tratar temas de FMC desde Ensino Médio, pois eles estão presentes no dia-a-dia em toda parte. Abordar a supercondutividade partindo de aplicações, mostrando como elas podem auxiliar na vida do homem, é muito válido”*.

Licenciando D: *“É importante tratar temas de FMC, mas que isso seja feito de maneira mais teórica, porque é impossível discutir esses temas sendo que muitas vezes não se dá para discutir nem o básico da Física por conta da carga horária da disciplina. A*

supercondutividade pode ser usada para ensinar conceitos básicos de eletricidade e magnetismo”.

Defende-se aqui que, para que conteúdos de FMC, tais como a supercondutividade sejam inseridos na educação básica, é necessário que esse movimento se inicie nos cursos de formação inicial dos professores. Quando se volta o olhar para os cursos de Licenciaturas em Física, os programas que contemplam tópicos de FMC, geralmente desvinculam a teoria da prática, utilizam o mesmo programa e enfoque metodológico do bacharelado, enfatizam a metodologia expositiva, o que acaba dificultando a aquisição de autonomia e segurança pelo licenciado para ensinar esses conteúdos futuramente (ARAÚJO e ZAGO, 2016).

Considerações finais

Não restam dúvidas que há interesses políticos e sociais na inserção do ensino de FMC na educação básica. Esforços de pesquisadores têm se acentuado principalmente após essa discussão ter surgido nas diretrizes da educação nacional brasileira. Porém, ainda há um grande distanciamento do que se espera em relação ao que se pratica. O encurtamento dessa distância passa por questões culturais que vão desde a formação inicial do professor às condições de trabalho que são oferecidas a eles.

Compreende-se que o conhecimento físico acumulado historicamente não é passível de ser amplamente explorado num curso de graduação. Mas momentos como o descrito neste trabalho, devem ser estimulados nas Licenciaturas, promovendo uma formação reflexiva no sentido de atender os anseios da educação para a sociedade contemporânea.

Referências

ARAÚJO, R.; ZAGO, L. Física Moderna e Contemporânea nos cursos de Licenciatura Em Física: Uma análise das marcas da racionalidade técnica. **Latin-American Journal of Physics Education**, vol. 10, n. 4, 2016.

ARAÚJO, F. C. **Revisão de Literatura Sobre Intervenções Didáticas para o Ensino de Conceitos de Física Moderna no Ensino Médio**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Física, Florianópolis, 2018.

BRASIL. Ministério de Educação e Cultura. LDB - Lei nº 9394/96, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da Educação Nacional. Brasília: MEC, 1996.

BRASIL. Ministério da Educação e do Desporto. PCNs+ Ensino Médio: Orientações

Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais, Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2002.

FREITAS, T. R. S. **Modelo para simulação de supercondutor HgRe-1223 para aplicações como limitador de corrente resistivo.** Dissertação, 69 p. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Vitória, 2009.

MOURACHKINE, A. **Room-Temperature Superconductivity.** Cambridge International Science Publishing, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, 2004.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007.

OSTERMANN, F.; FERREIRA, M. L.; CAVALCANTI, C. H. Tópicos de Física Contemporânea no Ensino Médio: um Texto para Professores sobre Supercondutividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol. 20, n. 03, 1998.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 18, n. 2: p. 135-151, 2001.

OSTERMANN, F. A inserção de Física Moderna no Ensino Médio: um projeto que visa à introdução do tema da supercondutividade em escolas brasileiras. **Caderno de Física da UEFS**, v. 4, p. 81-88, 2006.

PEREIRA, S. H; FELIX, M. G. 100 anos de supercondutividade e a teoria de Ginzburg-Landau. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, 1313, 2013.

PRESOTTO, A. **Efeitos de campos magnéticos externos e de correntes de transporte na dinâmica de vórtices em uma constricção mesoscópica.** Dissertação, 91 p. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais. Ilha Solteira, 2017.

SALES, et. al. Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 3, 3501, 2008.

SOUZA, A. J.; ARAÚJO, M. S. T. A produção de raios X contextualizada por meio do enfoque CTS: um caminho para introduzir tópicos de FMC no Ensino Médio. **Educar em Revista** (Impresso), v. 37, p. 191-209, 2010.