

ESTADO DA ARTE DOS SUPERCONDUTORES

Autores: Miguel Marqueti Sathler, Enrico Antunes De Vasconcelos, Adryan Apolo de Alencar Diniz Rodrigues e João Victor Costa Pereira, Wagner Felipe De Souza, Eduardo Jorge De Brito Bastos.

Colégios Univap - Unidade Aquários, Rua Dr. Tertuliano Delphim Júnior, 181, Jardim Aquarius - 12246-080 - São José dos Campos - SP, Brasil, miguelsathler@gmail.com, enricoa477@gmail.com, adryan.rodrigues.profissional@gmail.com, joaone589@gmail.com, wagner.souza@univap.br, ebbastos@univap.br

Resumo

Este trabalho realiza uma análise do estado da arte sobre a supercondutividade. São examinados sua descoberta por Onnes (1911), os primeiros efeitos e descrições fundamentais, como o efeito Meissner (1933) e as equações de London (1934), que inauguraram a abordagem teórica inicial. Em seguida, destaca-se a formulação da teoria BCS por Bardeen, Cooper e Schrieffer (1957), responsável por explicar microscopicamente o fenômeno. A evolução prossegue com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura por Bednorz e Müller (1986), posteriormente ampliada por Chu (1987), o que redefiniu os limites práticos do campo. Além de abordar os marcos históricos e teóricos, o estudo evidencia aplicações consolidadas em ressonância magnética (Ali, 2019) e transporte urbano por levitação magnética, por Lee em 2006.

Palavras-chave: Supercondutividade, eletrodinâmica, condução elétrica, eletromagnetismo.

Curso: Ensino Médio

Introdução:

Os supercondutores, descobertos em 1911, são materiais que apresentam resistência zero à passagem de elétrons. A resistência elétrica é a propriedade de um material que dificulta a passagem dos elétrons. Portanto, em condutores normais, que possuem resistência, é necessária uma fonte de energia externa constante denominada tensão, que possibilita o fluxo ordenado de elétrons cujo nome é corrente elétrica.

Em teoria, o fato dos supercondutores terem resistência zero significa que um elétron poderia passar por tempo indefinido pelo material sem nenhuma perda de energia.

Essa observação, ao longo dos anos, se notou um ponto de ruptura e inovação no campo da eletrodinâmica. Esse trabalho é uma revisão bibliográfica que visa apresentar uma síntese sobre o estado da arte dos supercondutores.

Metodologia:

A partir das pesquisas, é possível traçar uma linha do tempo dos descobrimentos e teorias.

1. A descoberta de Onnes

O estudo de Kes, de 2011, analisa este marco inicial.

Heike Kamerlingh Onnes, professor e cientista holandês, no início do século XIX, realizava experimentos com criogenia e observava o comportamento dos materiais em temperaturas próximas ao zero absoluto. Em 1908, conseguiu liquefazer o Hélio, alcançando a temperatura de 1,5 K (o experimento fez com que ele ganhasse o Prêmio Nobel de Física, em 1913).

A comunidade científica na época teorizava que, ou a resistividade diminuiria à medida que a energia dos átomos reduzisse junto à temperatura, ou aumentaria, pois os elétrons desacelerariam conforme a temperatura reduzisse.

Onnes, em 1910, direcionou seu trabalho ao comportamento da resistividade elétrica em temperaturas próximas ao zero absoluto.

Ao realizar o experimento com um resistor de mercúrio, e posteriormente outro de ouro, o cientista observou que a resistência diminuía, sem indícios que aumentaria novamente ou que se estabilizasse e permanecesse constante. Por limitações na época, ele não pode testar o material com uma pureza maior.

2. Efeito Meissner

Em 1933, W. Meissner e R. Ochsenfeld investigaram o comportamento do campo magnético em supercondutores.

No primeiro experimento, utilizaram cilindros paralelos de estanho e chumbo, medindo o fluxo de indução por meio de uma bobina ligada a um galvanômetro. Observaram variação do fluxo ao atravessar a temperatura crítica, com razões próximas de 1,70 (estanho) e 1,77 (chumbo), sob campo externo de 5 Gauss.

No segundo experimento, aplicaram um campo em torno de um tubo cilíndrico de chumbo, avaliando a distribuição interna e externa do fluxo magnético. Constatou-se a expulsão do campo no estado supercondutor, caracterizando a permeabilidade próxima de zero e evidenciando o fenômeno que ficou conhecido como efeito Meissner.

3. London e London

Em 1935, os irmãos Fritz e Heinz London buscaram compreender a fenomenologia do efeito observado por Meissner, no ano anterior. No estudo, eles priorizaram a independência de qualquer dado empírico, e buscavam retratar o efeito magnético e de supercondução de forma matemática.

Ao formular a primeira equação, eles buscaram fazê-lo de forma a haver uma corrente elétrica que interage com o campo sem que exista dissipação de energia. O objetivo era traduzir em informações calculáveis a hipótese do fluxo de elétrons sem perda de momento.

Na formulação da segunda equação, eles buscaram encontrar uma relação entre a densidade da corrente elétrica, e o campo magnético. Tratando diretamente do efeito Meissner, ela observava o comportamento do campo no interior do supercondutor. Como na primeira equação, o objetivo era traduzir quantitativamente o efeito descrito.

4. BCS

Em 1957, John Bardeen, Leon Cooper, e John Robert Schrieffer, propuseram uma teoria que explicava tanto o efeito da resistividade nula, quanto o efeito Meissner. Diferente de outras propostas teóricas, como a de London e London (1935), que utilizavam uma abordagem matemática dos resultados, a nova proposta tem como objetivo explicar fundamentalmente o que leva a eles. A teoria BCS, como ficou conhecida, explicava o comportamento coerente entre os elétrons que geram os

efeitos da supercondutividade. Em suas análises, os cientistas observaram as interações dos elétrons entre si. Em condições normais de temperatura, os elétrons possuem a tendência de se repelirem, por possuírem cargas iguais. Porém, sob temperatura de supercondução, os elétrons interagem como pares, devido à sua interação com a rede de átomos positivos, também chamada de retículo cristalino. Quando o elétron passa por esse retículo, causa uma vibração, que atrai um segundo elétron. Essa vibração é chamada de fônon. Quando todos os elétrons têm esse comportamento, eles se alinham num mesmo estado quântico singular.

5. J.G. Bednorz e K.A. Müller e os estudos dessas aplicações em nitrogênio

Em 1986, foram preparados compostos policristalinos de bário, lantânio e cobre em diferentes proporções, por coprecipitação e posterior tratamento térmico em torno de 900 °C. O recozimento em condições redutoras mostrou-se essencial para o surgimento da fase de interesse.

A difração de raios-X revelou a presença de três fases cristalinas, incluindo uma perovskita em camadas associada à supercondutividade. As medições de resistividade, pelo método de quatro pontas, confirmaram a transição supercondutora, embora dependente da densidade de corrente, indicando um comportamento granular típico de materiais recém-descobertos.

Essa teoria foi testada por Chu, em 1987, com a substituição do lantânio por ítrio no sistema Y-Ba-Cu-O, alcançando uma transição supercondutora estável entre 80 e 93 K a pressão ambiente, superando pela primeira vez a barreira prática dos 77 K e consolidando o início da era dos supercondutores de alta temperatura.

Sobre as aplicações atuais, Ali comparou a eficiência dos MRIs com supercondutores aos comuns, e Lee e seus colegas realizaram um panorama das características dos trens Maglev com a tecnologia em comparação aos comuns.

Resultados

- Onnes (1911) - A partir dos resultados observados, ele deduziu corretamente que abaixo de uma certa temperatura crítica, alguns materiais perdem toda sua resistividade
- Meissner e Ochsenfeld (1933) - Eles descreveram a propriedade dos supercondutores de expulsar um campo magnético de si, tornando-se diamagnéticos perfeitos.
- London, F. e London, H. (1934) - As equações de London são fundamentais no estudo da supercondutividade, pois a torna mensurável.
- BCS (1957) - A teoria dos chamados pares de Cooper explica microscopicamente a supercondutividade, mostrando um novo tipo de ligação entre partículas.
- Bednorz e Müller (1986) - Descobriram que alguns compostos, como cupratos, possuem alta temperatura crítica, possibilitando formas mais práticas de conseguir a supercondutividade.
- Chu. (1987) - Conseguiram utilizar o nitrogênio líquido para alcançar a temperatura crítica de certos compostos óxidos, fazendo com que a criogenia de supercondutores barateie.
- Ali. (2019) - A análise conclui que os supercondutores contribuem na melhor qualidade de imagens, impactando a precisão de diagnósticos.
- Lee. (2006) - O panorama dos trens de Maglev demonstram a superioridade de sistemas com supercondutores, por sua menor poluição sonora, riscos de acidente e eficiência motriz.

Conclusão:

A supercondutividade vem sendo assunto de grandes descobertas que podem mudar o mundo, facilitando processos que antes eram inimagináveis. Com o avanço de pesquisas sobre o material, hoje em dia, muitos pesquisadores estão engajados em descobrir um supercondutor que seja funcional em temperatura ambiente, o que o tornaria mais usual e de baixo custo. Mesmo assim,

alguns supercondutores já descobertos mostram sua utilidade como um grande avanço à ciência, alguns exemplos são: seu uso na medicina, onde são usados em ímãs de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e de Imagem por Ressonância Magnética (MRI), garantindo campos magnéticos intensos e estáveis, e no transporte, nos trens Maglev do Japão, usando do efeito Meissner para levitação magnética sem atrito, conseguindo velocidades acima de 500 km/h com baixo desgaste mecânico.

Referências

- ALI, Raza; ALI, S. S. Superconductors for Magnetic Imaging Resonance Applications. Materials Research Foundations, v. 132, p. 230-255, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21741/9781644902110-13>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- BARDEEN, J.; COOPER, L. N.; SCHRIEFFER, J. R. A theory of superconductivity. Physical Review, v. 108, p. 1175, dez. 1957. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- BEDNORZ, J. G.; MÜLLER, K. A. Possible high-T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. Z. Physik B - Condensed Matter, v. 64, p. 189-193, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01303701>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- DELFT, D.; KES, P. The Discovery of Superconductivity. Lorentz Institute for Theoretical Physics – Universiteit Leiden, 2011. Disponível em: https://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/cold/DelftKes_HKO_PT.pdf. Acesso em: 28 ago. 2025.
- LEE, Hyung-Woo; KIM, Ki-Chan; LEE, Ju. Review of Maglev train technologies. IEEE Transactions on Magnetics, v. 42, p. 1917-1925, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.875842>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- LONDON, F.; LONDON, H. The electromagnetic equations of the supraconductor. Proc. R. Soc. Lond. A, v. 149, p. 71-88, 1935. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.1935.0048>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- MEISSNER, W.; OCHSENFELD, R. Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. Naturwissenschaften, v. 21, p. 787-788, 1933. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01504252>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- WU, M. K.; ASHBURN, J. R.; TORNG, C. J.; HOR, P. H.; MENG, R. L.; GAO, L.; HUANG, Z. J.; WANG, Y. Q.; CHU, C. W. Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. Physical Review Letters, v. 58, p. 908-910, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.908>. Acesso em: 28 ago. 2025.