

Supercondutividade: aplicação em veículos de levitação magnética

Superconductivity: application in magnetic levitation vehicles

Superconductividad: aplicación en vehículos de levitación magnética

Supraconductivité: application dans les véhicules à lévitation magnétique

Resumo

Este artigo visa descrever os fenômenos físicos associados à supercondutividade em materiais condutores utilizados em veículos de levitação magnética, especificando os efeitos da resistência e de magnetismo. Os dados que corroboram a pesquisa foram coletados a partir de pesquisas em trabalhos já publicados e partem a descoberta do estado de supercondutividade da matéria, observada pela primeira vez em 1911, pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes. Além disso, haverá uma breve abordagem sobre os custos envolvidos, bem como a aplicação dos efeitos da supercondutividade no meio de transporte supracitado.

Palavras-chave: Física. Supercondutores. Magnetismo. MagLev. Efeito Meissner. Teoria BCS.

Abstract

This paper aims to describe the physical phenomena associated with superconductivity in conductive materials used in magnetic levitation transport, specifying the effects of resistance and magnetism. The data that corroborate the research were collected from researches in published works and started from the discovery of the state of superconductivity of the matter, first observed in 1911 by the Dutch physicist Heike Kamerlingh Onnes. In addition, there will be a brief approach on the costs involved, as well as the application of the effects of superconductivity on the means of transport mentioned above

Keywords: Physics. Superconductors. Magnetism. MagLev. Meissner effect. BCS Theory.

Resumen

Este trabajo objetiva describir los fenómenos físicos asociados a la superconductividad en materiales conductores utilizados en vehículos de levitación magnética, especificando los efectos de la resistencia y del magnetismo. Los datos que comprueban la investigación fueron colectados a partir de investigaciones en trabajos ya publicados y parten desde el descubrimiento del estado de superconductividad de la materia, observada por primera vez en 1911 por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes. Además de eso, habrá un breve enfoque sobre los costes involucrados, la aplicación de los efectos de la superconductividad en el medio de transporte ya citado.

Palabras-clave: Física. Supercondutores. Magnetismo. MagLev. Efecto Meissner. Teoría BCS.

Résumé

Cet article a pour objectif de décrire les phénomènes physiques associés à la supraconductivité dans les matériaux conducteurs utilisés dans les véhicules à lévitation magnétique, en

**Cícero Igor Freire de
Morais** 

igorfreire.pb@gmail.com
Centro Universitário
Farias Brito (FBUi)

**Antonio Philipi Alves
Moreira** 

philmec@gmail.com
Centro Universitário
Farias Brito (FBUi)

précisant les effets de la résistance et du magnétisme. Les données qui corroborent ce recherche ont été recueillies à partir des travaux déjà publiés. Notre point de départ est la découverte de l'état de supraconductivité de la matière, observée pour la première fois en 1911 par la physicienne néerlandaise Heike Kamerlingh Onnes. Au-delà, il y a une brève approche des coûts impliqués, ainsi que l'application des effets de la supraconductivité sur le moyen de transport susmentionné.

Mots-clés: Física. Supercondutores. Magnetismo. MagLev. Efeito Meissner. Teoria BCS.

1 Introdução

Dentre os fenômenos físicos existentes, a supercondutividade destaca-se como uma propriedade que um material condutor adquire ao ser submetido a temperaturas próximas ao zero absoluto. Essa característica foi observada pela primeira vez pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1911), que comprovou a existência do estado de supercondutividade da matéria a partir de experimentos com o mercúrio, observando o aparente desaparecimento súbito da resistência do material a 4,2 K (COSTA; PAVÃO, 2012).

Assim, todo supercondutor poderia ser considerado um condutor elétrico perfeito, entretanto, no ano de 1933, os físicos alemães Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram o chamado efeito *Meissner*, que é caracterizado pela expulsão do fluxo magnético do interior de um material supercondutor, tornando-se nulo, independente do histórico de magnetização, fato que o diferencia de um condutor perfeito, com fluxo magnético constantemente nulo em seu interior. Mas, para a ocorrência do efeito Meissner, se faz necessário que o material esteja no estado de supercondutividade e seja exposto a um campo magnético externo, o que só é alcançado quando atinge um valor de temperatura crítica, T_c (COSTA; PAVÃO, 2012 e SOUZA, 2012).

As ideias alemãs foram de grande importância para o avanço dos estudos na área da supercondutividade, sendo base para a expansão de novas teorias, como as teorias das propriedades termodinâmicas de transição do estado normal para o de supercondutividade, elaborada pelos russos Ginzburg e Landau, responsáveis também pela introdução de uma nova grandeza: o comprimento de coerência (SOUZA, 2012).

Todos os estudos na área de supercondutividade haviam sido feitos em um espectro macroscópico. O primeiro estudo feito no âmbito microscópico foi realizado pelos americanos Jon Bardeen, Leon Cooper e Robert Shrieffer, mais conhecida como teoria BCS, em referência aos sobrenomes dos pesquisadores (OSTERMANN; PEREIRA; CAVALCANTI, 1998; SOUZA, 2012).

Além de todos os parâmetros apresentados acima, a temperatura crítica limita a praticidade da experimentação em projetos mais simples. Atualmente, em alguns compostos metálicos, é possível encontrar o estado de supercondutividade em temperatura de 135K (SOUZA, 2012).

Essas características, como o efeito Meissner, podem ser aplicadas em transportes alternativos em que o campo magnético externo exerce uma força capaz de elevar a uma altura em que o atrito seja causado apenas pelo ar, reduzindo as perdas de energia.

Este artigo se destina a identificar quais elementos e propriedades estão envolvidas nos sistemas de transporte por levitação magnética.

2 Metodologia

Dentre as várias propriedades que podem ser inerentes ao material, três em específico devem ser atendidas para que esse material possa ser classificado como supercondutor, são elas: o efeito Meissner ou diamagnetismo perfeito; a resistência elétrica nula, que acarreta ausência de efeito Joule; e um ponto de temperatura crítica.

2.1 Propriedades dos materiais supercondutores

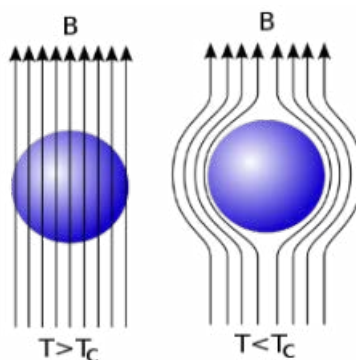
2.2 Efeito Meissner

Após a descoberta da supercondutividade por Onnes, em 1911, com o mercúrio, outros materiais foram descobertos e catalogados por novos especialistas na área. Durante alguns anos, muitos estudos foram feitos, mas sem grande impacto. Os especialistas, até então, classificavam materiais supercondutores como condutores perfeitos, mas, em 1933, foi verificada uma característica que corroborava com a hipótese de que a supercondutividade não era apenas mais uma característica, e sim um novo estado da matéria. Dois cientistas alemães verificaram uma propriedade que diferenciava totalmente supercondutores de condutores perfeitos (COSTA; PAVÃO, 2012).

Os alemães Karl Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram que os materiais em estado de supercondutância são diamagnéticos perfeitos, ou seja, o campo magnético em seu interior é nulo. O chamado efeito Meissner é uma das características mais evidentes de um material no estado supercondutor, desde que esse material seja resfriado até certo ponto, conhecido como ponto de temperatura crítica (COSTA; PAVÃO, 2012).

O efeito Meissner é caracterizado pela expulsão das linhas de campo do interior do material, quando este se encontra no estado de supercondutância e exposto a um campo magnético externo. As linhas, agora deformadas devido à expulsão, exercem uma força sobre o material, o que torna o material um diamagnético perfeito, como mostra a Fig. 1 (COSTA; PAVÃO, 2012).

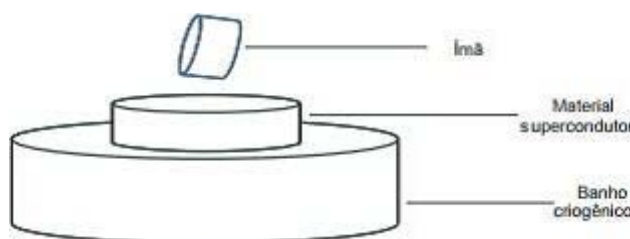
Figura 1 – Representação do efeito Meissner



Fonte: Costa, Pavão, 2012.

Como se pode observar, após o material atingir o estado supercondutor, as linhas de campo são expulsas de seu interior e concentram-se na superfície da amostra.

Figura 2 – Representação de material supercondutor em banho criogênico.



Fonte: Costa, Pavão, 2012.

Na Figura 3 pode-se verificar que o material supercondutor se encontra imerso em um banho criogênico ($N_{2(L)}$, por exemplo). Como as linhas de campo são expulsas do supercondutor, o ímã levita espontaneamente (COSTA; PAVÃO, 2012).

2.2 Temperatura crítica e resistividade nula

Uma condição especial que um dado material deve ser submetido para que este possa atingir o estado de supercondutância é a chamada temperatura crítica, T_c . A temperatura crítica é o ponto de temperatura específico em que o material transcende do estado de condutividade normal para o estado de supercondutividade (COSTA; PAVÃO, 2012).

A resistividade nula é atingida desde que o material atinja seu ponto de temperatura crítica, ou seja, quando a amostra transcende o estado de condutância normal. Inicialmente, tinha-se a ideia de que caso a temperatura fosse muito baixa, como os 4,2 K do mercúrio do experimento de Onnes, os elétrons livres se “congelariam”, proporcionando uma resistência elétrica infinita. Este era o pensamento de Lord Kelvin, uma das maiores autoridades na época, quando o assunto era temperatura. Onnes discordava dessa hipótese e achava que a resistência iria decaindo gradativamente até chegar a zero, quando a temperatura fosse nula, pois as vibrações na rede cristalina cessariam. Entretanto esse pensamento do físico holandês se pautava em uma amostra perfeita, ou seja, sem impurezas ou imperfeições. Como não é possível a obtenção desse nível de pureza, Onnes verificou que existia uma resistência residual oriunda dessas impurezas na amostra, como se pode observar na Fig. 3. Mesmo com essa resistência residual, nos supercondutores é possível ver a resistência indo a zero em uma escala de temperatura finita, T_c , como se pode observar na Fig. 4 (DA ROCHA; FRAQUELLI, 2004).

Figura 3 – Resistência residual

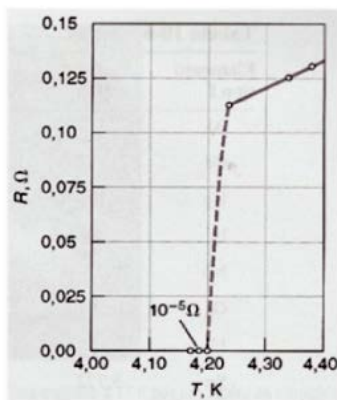
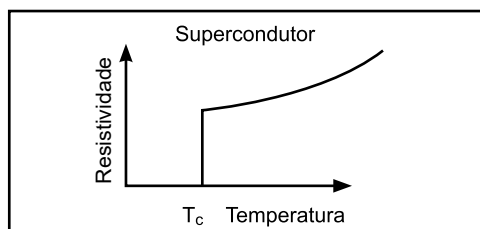


Gráfico para a resistência residual na amostra de mercúrio obtido por Onnes.

Fonte: Souza, 2012.

Figura 4 – Queda da resistência elétrica



Fonte: Rocha, Fraquelli, 2004.

Como podemos ver no gráfico, ao atingir um, o ponto de temperatura crítica, finita, a resistência elétrica do material decai para zero bruscamente (ROCHA; FRAQUELLI, 2004).

2.4 Os irmãos London

A característica do diamagnetismo perfeito, ou efeito Meissner, era um fenômeno observado apenas visualmente, ou seja, não possuía uma esquematização matemática. Responsáveis pela representação fenomenológica, os irmãos Heiz e Fritz London foram os responsáveis pela elaboração da teoria que explicava o efeito Meissner e pelo descobrimento de um parâmetro fundamental dos supercondutores: o comprimento de penetração de London, representado por λ . Tal grandeza mede a penetração do campo magnético da superfície lateral da amostra supercondutora, e varia de material para material (COSTA; PAVÃO, 2012).

Segundo Costa e Pavão (2012) e Ostermann, Pereira e Cavalcanti (1998), a teoria de London prevê matematicamente a existência do efeito Meissner, tendo em vista que sua elucidação indica a presença de um campo magnético que tende a zero no interior da amostra. A principal base da teoria de London é a interação de dois fluidos que assume a existência de elétrons normais e os chamados superelétrons, responsáveis pela supercondutividade. Ela foi elaborada a partir da resolução das equações de Maxwell e com uma solução complementar que dá conta do efeito Meissner. Dessa forma, foram necessárias apenas algumas mudanças nas equações usuais da eletrodinâmica para que o fenômeno, efeito Meissner, pudesse ser explicado. Tal modelo prevê que apenas uma parte dos elétrons de condução se encontra no estado supercondutor, enquanto outros se encontram em estado de condutividade normal. O comprimento de penetração, equação 1, λ_L é dado por:

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m^*}{\mu_0 n_s e^{*2}}} \quad (1)$$

Fonte: Costa, Pavão, 2012.

Onde:

λ_L = Comprimento de penetração de London.

m^* = Massa dos portadores de carga no estado supercondutor.

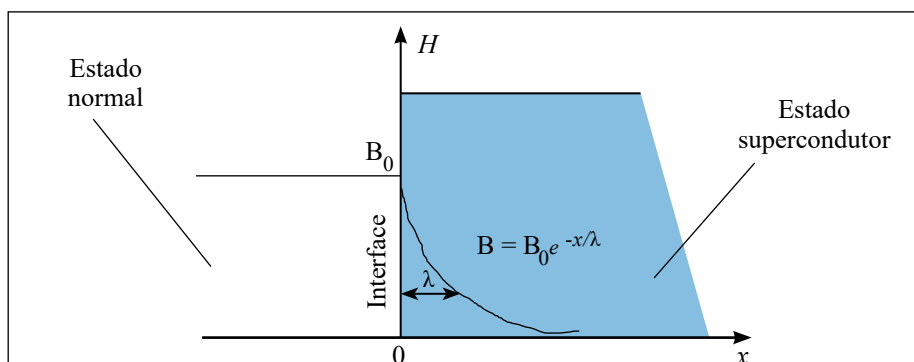
μ_0 = Permeabilidade magnética no vácuo.

n_s = Densidade de elétrons supercondutores.

e^* = Carga do elétron supercondutor.

A Figura 5 demonstra o comportamento do campo magnético após penetrar a superfície de um supercondutor. O gráfico da figura 5 é obtido a partir da resolução da equação de London para casos unidimensionais (COSTA; PAVÃO, 2012).

Figura 5 – Penetração do fluxo magnético no interior do supercondutor



Fonte: Costa, Pavão, 2012.

A teoria dos irmãos London foi de grande importância para a elucidação matemática do comportamento do campo magnético no interior de materiais supercondutores na presença de um campo magnético externo. Entretanto a supercondutividade deve existir mesmo na ausência de um campo magnético externo, ponto em que a teoria de London falha (PEREIRA; FÉLIX, 2013).

2.5 Os russos Ginzburg e Landau

No ano de 1950, os físicos Lev Davidovich Landau e Vitaly Lazarevic Ginzburg formularam uma nova teoria com o intuito de explicar as propriedades termodinâmicas da transição de fase dos materiais supercondutores. A teoria de Ginzburg-Landau é considerada uma teoria fenomenológica, tendo em vista que precisamos partir de alguns pressupostos para chegarmos ao entendimento do fenômeno da supercondutividade a partir desses pressupostos. De maneira geral, significa que alguns valores precisam ser aceitos sem qualquer justificativa prévia, e alguns parâmetros só podem ser obtidos quando postos frente a frente com o experimento (PEREIRA; FÉLIX, 2013; OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998).

O primeiro pressuposto da teoria Ginzburg-Landau se pauta na ideia intuitiva de que um dado supercondutor contém uma densidade de superelétrons, n_s , bem como uma densidade de elétrons normais, $n - n_s$, onde n é a densidade total de elétrons no metal. A forma de comportamento dos superelétrons é descrita por uma função de onda efetiva Ψ , que assume a seguinte interpretação física: $|\Psi|^2 = n_s$. Onde $\Psi \neq 0$ no estado supercondutor, todavia sendo zero no estado de condutividade normal. Dessa forma, ψ é o parâmetro de ordem da transição, ou seja, existe apenas abaixo da temperatura crítica T_c (OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998).

De acordo com Costa e Pavão (2012) e Ostermann, Ferreira e Cavalcanti (1998), a teoria de Ginzburg-Landau introduz um novo parâmetro para o efeito da supercondutividade, o comprimento de coerência, ξ . O comprimento de coerência, ξ , indica o comprimento típico sobre o qual o parâmetro de ordem, $\Psi(r)$, pode variar dentro de um supercondutor de maneira não brusca, e é obtido a partir da resolução da equação da energia livre quando não se possui um campo aplicado ao parâmetro de ordem, equação 2, ou seja:

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

Fonte: Ostermann, Ferreira, Cavalcanti, 1998.

Dessa relação nasce o parâmetro Ginzburg-Landau, parâmetro GL, dado por: $\kappa = \lambda/\xi$. E daí surge a classificação dos supercondutores, que podem ser do tipo I ou II. Se $\kappa < 1/\sqrt{2}$, teremos então um supercondutor do tipo I, o qual apresenta efeito Meissner e somente um campo crítico. Se $\kappa > 1/\sqrt{2}$, teremos então um supercondutor do tipo 2, o qual apresenta três campos críticos e o estado de vórtices (COSTA; PAVÃO, 2012).

A introdução do parâmetro GL foi proposta pelo físico russo A.A. Abrikosov. Na publicação de seu trabalho, o físico russo demonstrou que a penetração do fluxo magnético dentro de supercondutores do tipo II ocorre em formato de vórtices, ou seja, em pacotes de fluxo magnético, o que acarreta formação de uma rede triangular homogênea no interior do supercondutor (COSTA; PAVÃO, 2012).

2.6 A Teoria BCS

Grande parte dos estudos na área de supercondutividade foram realizados em um espectro macroscópico. Um dos principais estudos feitos no âmbito microscópico foi o conduzido pelos americanos Jon Bardeen, Leon Cooper e Robert Shrieffer, mais conhecido como teoria BCS, em referência aos sobrenomes dos pesquisadores. Essa teoria microscópica pressupunha que alguns elétrons dos materiais podem se comportar como “superelétrons”, ou seja, podem se mover sem sofrer nenhum tipo de resistência das partículas do material, o que não ocorre com elétrons normais (OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998; SOUZA, 2012).

O fundamento básico dessa teoria é a existência de uma atração entre os pares de elétrons, que se dá em meio à rede cristalina. Com tal interação, será obtido um estado mais estável em relação ao estado fundamentais do metal. Ao passar pela rede cristalina, o elétron (no estado fundamental BCS) interage atrativamente, pois,

em baixas temperaturas essa atração supera a repulsão coulombiana, o que faz com que a rede cristalina seja deformada. A partir dessa deformação, um segundo elétron pode interagir com a rede cristalina e fazer uso dessa deformação para reduzir sua energia, formando um estado ligado. Dessa maneira, o segundo elétron interage com o primeiro através da deformidade presente na rede. Tal maneira de comportamento entre os pares de elétrons ficou conhecida como pares de Cooper (DA COSTA; 2005; COSTA, 2010).

Em temperaturas muito baixas, a atração coulombiana é superada e os elétrons que formam o par de Cooper possuem spins iguais e opostos, formando um sistema com spin nulo. Podemos inferir, a partir dessa constatação, que cada par de Cooper trabalha como se fosse apenas uma única partícula de spin nulo. Dessa maneira, cada par de elétrons pode ocupar o mesmo estado quântico munido da mesma energia, o que não é válido para os elétrons dos materiais convencionais que obedecem aos níveis de Pauling, ou seja, não podem ocupar o mesmo nível quântico. Em outras palavras, no estado de supercondutividade, com $T_c = 0$, todos os elétrons presentes no material são pares de Cooper e estão no mesmo nível quântico, bem como possuem a mesma energia (DA COSTA; 2005; OLIVEIRA; 2005).

A teoria BCS se tornou amplamente aceita pela comunidade científica por explicar de maneira satisfatória a maioria das propriedades supercondutoras, conduzindo os seus autores ao Nobel de Física em 1972. Entretanto, a teoria é válida apenas para metais, pois, para os novos materiais supercondutores, que são cerâmicos e de temperaturas críticas menos criogênicas, não existe uma teoria bem definida para explicar o comportamento dos elétrons, sendo um campo muito atrativo para pesquisas. A teoria BCS exige um entendimento prévio em mecânica quântica e complexas equações para descrever o fenômeno em níveis microscópios, o que não será abordado aqui, pois fugirá do foco deste trabalho (DA COSTA; 2005; LANFREDI; 2001).

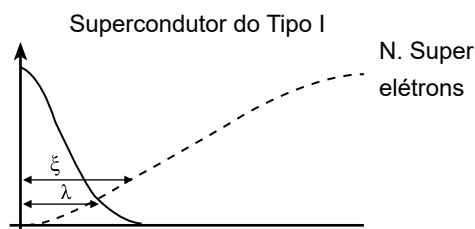
2.7 Tipos de supercondutores

Foi debatido em seções anteriores que o fator de profundidade de penetração, λ_L , e o comprimento de coerência, ξ_0 , são parâmetros muito importantes para a classificação dos tipos de supercondutores. Podemos fazer a distinção entre os dois tipos de supercondutores de acordo com a comparação de grandeza desses dois parâmetros (OLIVEIRA; 2005).

Para um supercondutor ser classificado como sendo do tipo I, a profundidade de penetração é significativamente menor que o comprimento de coerência, ou seja:

$$\lambda_L \ll \xi_0 \quad (3)$$

Figura 6 – Representação gráfica para supercondutores tipo I



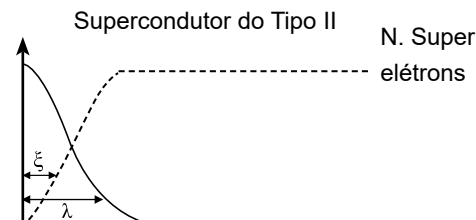
Fonte: Oliveira, 2005.

Podemos inferir, a partir do gráfico, que para um supercondutor ser classificado como sendo do tipo I, a profundidade de penetração deve ser inferior ao comprimento de coerência.

Já para supercondutores do tipo II, acontece justamente o contrário. O comprimento de coerência é significativamente menor em relação ao fator de profundidade de penetração, ou seja:

$$\lambda_L \gg \xi_0 \quad (4)$$

Figura 7 – Representação gráfica para supercondutores tipo II



Fonte: Oliveira, 2005.

A partir de uma breve análise do gráfico é possível inferir que, para um supercondutor ser classificado como sendo do tipo II, a profundidade de penetração deve ser superior ao comprimento de coerência.

Essa diferenciação entre os dois tipos de supercondutores é de suma importância para definirmos para qual aplicação de cada tipo tem maior grau de eficiência. Os supercondutores do tipo II suportam um campo magnético crítico muito mais elevado quando comparados aos supercondutores do tipo I, entretanto a penetração do campo magnético em um material do tipo II depende diretamente da existência de vórtices quantizados, que são responsáveis pela criação de campos magnéticos locais e que estão em plena concordância com a regra de quantização do fluxo magnético (OLIVEIRA; 2005).

3 Aplicações da supercondutividade

3.1 MagLev – Transrapid

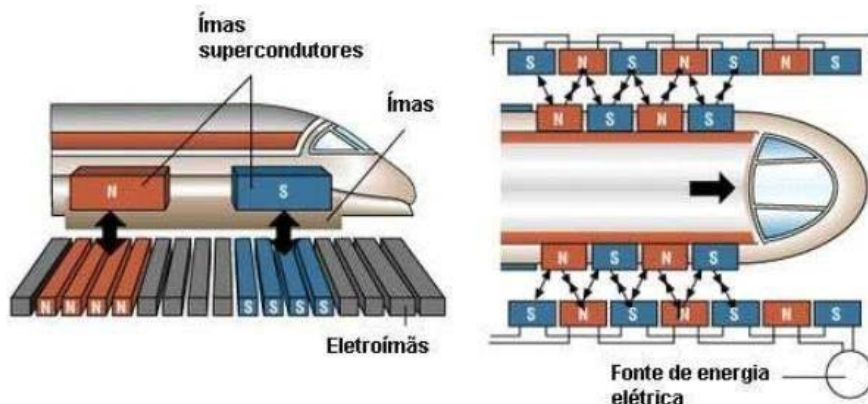
O MagLev ou “magnetic levitation”, levitação magnética, é o termo utilizado para especificar os trens que fazem o uso desse fenômeno. A principal característica desse tipo de transporte é a ausência de atrito entre o trem e os trilhos, sobrando somente o ar como fonte de atrito. A levitação do trem baseia-se na propriedade diamagnética dos supercondutores, efeito Meissner, que é a exclusão do campo magnético dentro de um supercondutor na presença de um campo magnético externo (Santos et al, 2017).

3.1.1 Funcionamento

Ao longo da parte inferior do corpo do veículo, e nas laterais que englobam o trilho, existem eletroímãs de material supercondutor que são controlados eletronicamente, garantindo o afastamento constante nominal de 10 mm. Os materiais supercondutores geram campos magnéticos fortíssimos, devido às baixas temperaturas a que são submetidos, sendo possível o aparecimento do efeito Meissner. Os eletroímãs localizados nas laterais que envolvem os trilhos obedecem ao mesmo princípio (RODRIGUES et al, 2009).

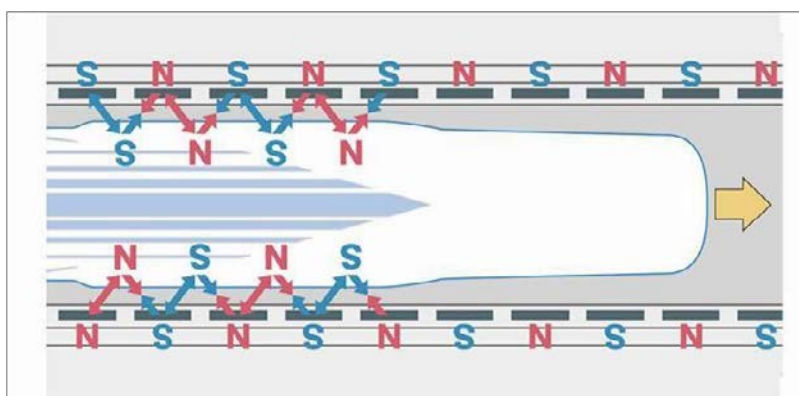
Os trilhos, mencionados anteriormente, são compostos de materiais supercondutores, geralmente cerâmicos, pois possuem altas temperaturas de transição ou temperaturas críticas. Assim, o mesmo efeito que ocorre nos eletroímãs na parte de baixo do veículo, ocorre também nas laterais que envolvem os trilhos. O sistema é montado de maneira que os eletroímãs fiquem em uma sequência invertida nas laterais dos trilhos e na parte de baixo dos vagões, como mostra a Figura 8 (Santos et al, 2017).

Figura 8 – Representação da posição dos ímãs supercondutores.



Fonte: Santos et al, 2017.

Figura 9 – Representação das posições dos ímãs supercondutores.



Fonte: Santos et al, 2017.

Como se pode inferir a partir da ilustração acima, os ímãs que estão dispostos no trem e nos trilhos estão dispostos de maneira sequencialmente invertida.

Para a frenagem e propulsão do veículo, é utilizado um motor síncrono linear. Os motores síncronos lineares fazem parte de um seletivo grupo de máquinas elétricas que convertem ininterruptamente energia elétrica em energia mecânica na forma de translação. Ainda é possível destacar o fato de o motor linear ser superior ao motor rotativo por eliminar os ruídos e o excesso de vibrações, uma vez que não há contato mecânico entre os componentes que compreendem o sistema. Dentro dos enrolamentos do motor, passam correntes alternadas que geram um campo magnético alternado que move o veículo, com a completa ausência de contato entre o trilho e a parte inferior dos vagões (VAZ; 2009).

A velocidade com a qual o veículo irá transitar pode ser alterada de acordo com a regulação da frequência da corrente que circula nos enrolamentos do motor. Para que se possa fazer a frenagem do veículo, é necessário que se inverta o sentido do campo magnético, tornando o motor um gerador que irá frear o trem sem qualquer contato físico (VAZ; 2009).

3.1.2 Aplicação e custo

Os trens de levitação magnética são usados, geralmente, com o propósito de atingirem altas velocidades para que assim possam ligar regiões mais próximas em pouco tempo. A média pode chegar a 500 km/h. Um exemplo do uso comercial de trens de levitação magnética é o *Shanghai Maglev* ou "*Shanghai Transrapid*",

localizado na China e administrado pela empresa *Shanghai Maglev Transportation Development Co. Ltd (SMTDC)*¹. O trem faz o percurso entre a estação de Longyang Road, em Pudong, e o aeroporto internacional de Pudong. Segundo a empresa, o trajeto feito pelo trem se estende por 30 km e é percorrido em até oito minutos, com uma velocidade máxima permitida de 431 km/h

A aplicação feita na china custou cerca de US\$ 1,2 bilhão de dólares. Com um investimento desse porte, os meios de transporte, como aviões e ônibus, vão continuar operando por um bom tempo, já que fazem esse papel a um custo inferior ao requerido pelos MagLev. Todavia, uma boa aplicação para esse tipo de transporte poderia ser a ligação entre cidades ou regiões próximas, como a China. O investimento necessário não seria grande e poderia culminar em uma melhoria significativa na mobilidade dos grandes centros urbanos.

3.2 Japan Railways

Considerado o trem mais rápido do mundo, atingindo velocidades superiores a 530 km/h, o JR-Maglev foi desenvolvido como um sistema progressista pelo *Japan Railway Reserch Institute*. Diferente do *Maglev Transrapid*, o JR-Maglev é corpo de um sistema misto, ou seja, possui roda e trilhos comuns aos trens convencionais, destacando-se por fazer o percurso ao longo de um corredor composto por bobinas condutoras. As bobinas são divididas em dois grupos. O primeiro grupo é responsável por fazer o comboio levitar, enquanto o segundo grupo é responsável pela frenagem do sistema (VAZ; 2009).

No interior do trem existem espiras supercondutoras que geram um campo magnético responsável por induzir correntes nas bobinas localizadas nos corredores dos trilhos que o trem irá percorrer. O sistema de levitação magnética se dá, quando o trem atinge a velocidade de 120 km/h (VAZ; 2009).

O veículo desenvolvido pelo instituto japonês utiliza uma tecnologia parecida como o motor de indução linear utilizado pelo veículo anterior, *Maglev Transrapid*, ou seja, um motor de indução linear. Todavia esse motor não é muito eficiente para este tipo de aplicação, pois, a distância entre o trilho e o trem varia de 80 a 150 mm, o que não caracteriza um distanciamento constante, como o citado na aplicação anterior (CASSAT; 2002).

3.3 MagLev – Cobra

As duas aplicações mencionadas anteriormente são exemplos de aplicações que fazem uso de supercondutores do tipo I, ou seja, supercondutores com o campo magnético totalmente expulso de seu interior, causando o diamagnetismo perfeito. Podemos citá-los, também, como exemplos de transportes que fazem conexões entre pontos distantes, como algumas cidades. Mas e se a aplicação não visar a ligação entre cidades próximas e, ao invés disso, visar o meio transporte urbano? (VAZ; 2009).

A Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ apresenta uma iniciativa diferente das citadas anteriormente. Baseando-se nos supercondutores do tipo II, nos quais a expulsão do campo magnético é apenas parcial e não completa, como ocorre nos supercondutores do tipo I, a iniciativa Maglev Cobra, visa atender as necessidades do transporte urbano brasileiro. Entretanto, por se tratar de um projeto em andamento, ainda não existe uma linha em tamanho real, tendo o modelo de testes brasileiro cerca de 30 m de extensão, percorrendo um sentido oval. Mas a iniciativa a princípio é ligar dois pontos da própria universidade, distantes cerca de 223 m de distância (VAZ; 2009).

Segundo Stephan (2007), o veículo brasileiro é formado por anéis conectados entre si por juntas flexíveis, que lembram as articulações de uma serpente – por esse motivo sua denominação: Maglev – Cobra. como mostra a Fig. 10.

1 Empresa responsável pela linha chinesa. Disponível em: www.smtdc.com/en – Acessado em 17 Out. 2017

Figura 10 – Design do veículo brasileiro

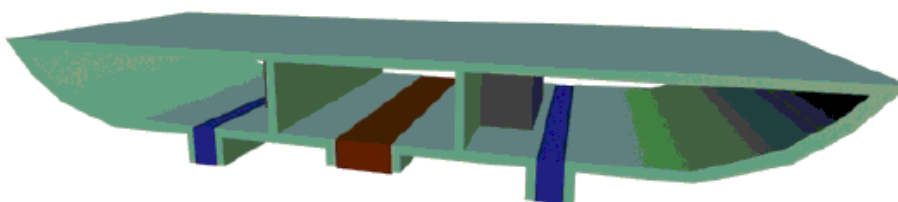


Fonte: Vaz, 2009.

Idealização do Maglev – Cobra feita pela Divisão de Desenho Industrial do INT (VAZ; 2009).

O componente fundamental por trás do Maglev brasileiro é a base de levitação, em que se encontram repousados os módulos dos passageiros, ou seja, é a parte onde se encontram os supercondutores resfriados a nitrogênio líquido ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), os chamados criostatos, mostrados na Fig. 11, em azul. A parte central, na cor marrom, são as bobinas alimentadas com energia elétrica. Tais bobinas permitem movimentação do veículo através de um motor linear instalado ao longo da via (VAZ; 2009).

Figura 11 – Base de levitação



Fonte: Vaz, 2009.

Conforme descrito anteriormente, as linhas em azul são os criostatos e a linha marrom, as bobinas de alimentação (VAZ; 2009).

4 Conclusões

No decorrer do trabalho foram mostrados tópicos a partir dos quais é possível fazer um apanhado geral de muitos assuntos relacionados à supercondutividade no intuito de elucidar os problemas e objetivos apresentados no início deste estudo. As informações mostradas ao longo do trabalho ajudam na compreensão de como os supercondutores se comportam e de grande parte do aparato tecnológico exigido por eles.

Os demais estudos que sucederam Onnes foram de igual importância para a compreensão, e para futuras aplicações, sendo de tal maneira que muitos dos estudiosos na área da supercondutividade foram laureados com prêmios Nobel por suas consideráveis contribuições para esse âmbito de estudo.

Os materiais supercondutores possuem características singulares e que lhes conferem destaque quando comparados aos demais materiais. As mais notórias e que trazem maior número de aplicações consigo é a perda da resistência elétrica e o diamagnetismo perfeito na presença de um campo magnético externo. Essas duas características são fundamentais para diversas aplicações, como os MagLev, que fazem uso do efeito Meissner para seu funcionamento. A ausência de atrito com os trilhos, causada pelo uso do efeito Meissner, é o que possibilita uma eficiência mais elevada quando comparados aos demais meios de transporte da categoria, como trens convencionais, trens-bala e metrô, pois os MagLev só possuem apenas o ar como fonte de atrito, já que levitam sobre os trilhos, e isso possibilita atingir altas velocidades.

O fator custo é o principal ponto a ser melhorado, visto que o investimento é muito elevado e o retorno financeiro pode não compensar, o que acaba afugentando a construção de linhas mais extensas, por exemplo.

Com o avanço da ciência nessa área e em áreas subjacentes no século XX e XXI, não deve tardar para que a manipulação dos materiais possa ser feita de maneira mais eficiente. O desenvolvimento de materiais com temperaturas críticas menos criogênicas irá impactar diretamente no investimento necessário para a construção, manuseio e manutenção desses materiais, cujo maior contraponto é o aparato tecnológico exigido para que possam funcionar de maneira satisfatória e possam integrar todo o potencial que os materiais supercondutores possuem.

Referências

- COSTA, M. B.S.; PAVÃO, A. C. Supercondutividade: um século de desafios e superação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 34, n. 2. p. 2602-2615, 2012.
- SOUZA, D. F. de. **Supercondutividade, um estudo sobre os seus 100 anos**. Elementos para sua Divulgação Científica. 2012. 223 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.
- OSTERMANN, F.; PUREUR, P. **Supercondutividade: temas atuais de física**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- ROCHA, F. S.; FRAQUELLI, H. A. Roteiro para a experiência de levitação de um ímã repelido por um supercondutor no Ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 11-18, 2004.
- OSTERMANN, F.; FERREIRA, L. M.; CAVALCANTI, C. J. H. Tópicos de física contemporânea no ensino médio: um texto para professores sobre supercondutividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 270-284, 1998.
- PEREIRA, S. H.; FÉLIX, M. G. 100 anos de supercondutividade e a teoria de Ginzburg-Landau. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 1-10, 2013.
- COSTA, G. C. **Estudo da levitação magnética e determinação da corrente crítica de blocos supercondutores de alta T_c pelo método dos elementos finitos**. 2005. 127 f. Dissertação (Doutorado em Ciências e Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- COSTA; M. B. da S. **Análise da distribuição de cargas atômicas no modelo RVB para supercondutores**. 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- OLIVEIRA, F. D. C. **Limitador de corrente de falta supercondutor**. 2005. 78 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.
- LANFREDI, A. J. de C. **Propriedades elétricas, estruturais e magnéticas de supercondutores hole-doped e electron-doped dos tipos $YBa_2Cu_3O_{7-d}$, $Pr_2XCeXCuO_{4-y}$ E $Sm_2XCeXCuO_{4-y}$** . 2001. 138 f. Dissertação (Mestre em Física) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001
- SANTOS, E. C. et al. Cerâmicas supercondutoras: Características e aplicações. **ETIC - Encontro de Iniciação Científica**, Presidente Prudente, v. 13, n. 13, 2017.
- RODRIGUES, Augusto; SENA, Hamilton José da Silva; MARTINI, Ramon; MOLGARO, Robson Josué. – **Levitação Magnética**. 28 f. Trabalho apresentado à disciplina de Eletromagnetismo II, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, PR, 2009. Disponível em: <https://document.onl/engineering/levitacao-magnetica.html>. Acesso em 12 dez. 2018. em 10 dez. 2018.

VAZ; O. H. de L. **Levitação magnética**: uma aplicação no transporte.. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2009.

CASSAT, A. **MAGLEV projects technology aspects and choices**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 915–925, mar. 2002.

STEPHAN, R. M. **MAGLEV-COBRA**: o transporte urbano sobre trilhos magnéticos. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

Sobre os autores

Cícero Igor Freire de Moraes

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Farias Brito – FBUni. Fortaleza, CE

Antonio Philipi Alves Moreira

Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Ceará – UFC (2014) e Licenciado em Física pela Universidade Estadual do Ceará – UECE (2012) e Graduando em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário Farias Brito - FBUni.

Recebido: 22/03/2019

Aceito: 24/06/2019