

Análise do meio de transporte através de levitação
eletromagnética supercondutora
Analysis of the means of transport through superconducting
electromagnetic levitation

Hérlei José Modesto Júnior* †

Resumo

O objetivo deste artigo é fazer uma análise técnica e descritiva sobre a levitação magnética supercondutora, sendo este um tema bastante atual, onde vários modelos têm sido estudados em razão da alta complexidade na determinação precisa das forças sobre os ímãs permanentes imersos em um campo magnético presentes nos circuitos magnéticos abertos para transporte. Significativos progressos foram alcançados nos últimos anos, sendo assim o artigo a seguir revisa e resume os principais pontos técnicos e propõe a clareza do assunto quando em expansão a nível de escala mundial. A sociedade vive uma época de mudança, onde a resposta para maioria dos problemas sociais está relacionada com a evolução da ciência e da tecnologia, neste artigo o leitor tem a oportunidade de conhecer um pouco mais da evolução tecnológica que pode transformar a realidade do transporte de passageiros que conhecemos hoje.

Palavras-chave: MAGLEV. Levitação Magnética Supercondutora. Levitação Eletrodinâmica. Levitação Magnética Ativa.

Abstract

The purpose of this article is to make a technical and descriptive analysis on the superconducting magnetic levitation, being this a fairly current subject, where several models have been studied because of the high complexity in the precise determination of the forces on the permanent magnets immersed in a magnetic field present in opened magnetic circuits for transport. Significant progress and important information were achieved in the last years. Having that in mind this article reviews and summarizes the main technical points and proposes the clarity of the subject when it is expanding at a global scale. Society is in a period of change, where the answer to most social problems

*Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara - UNIARA. Araraquara-SP
E-mail: herlei1994@hotmail.com

†Trabalho orientado pelo prof. Ms. Alexandre Munhoz. Docente do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara - UNIARA. Araraquara-SP.

is Related to the evolution of science and technology, in this article the reader has the opportunity to know a little more about the technological evolution that can transform the reality of passenger transport that we know today.

Keywords: MAGLEV. Superconductive Magnetic Levitation. EDL. SML. EML.

1 INTRODUÇÃO

Durante a transição de processos artesanais, de manufatura, de produção e desenvolvimento das máquinas-ferramentas no período entre 1760 a algum momento entre 1820 e 1840 ocorreu a chamada evolução industrial na qual as mais importantes modificações nos meios de transportes aconteceram. Maglev(Magnetic Levitation), ou levitação magnética, é um método de transporte recente sendo um dos meios de transportes desenvolvidos no final da última revolução industrial, esta tecnologia irá se juntar ao tipo de meio de locomoção de alta velocidade como o avião, porém, em vias terrestres.

O desenvolvimento da nova tecnologia de transporte por levitação teve sua prova no japão, no ano de 2014, que em meios terrestres é possível facilmente atingir a velocidades acima de 500 Km/h.([SATO; KONAGAI; MAEDA, 2006](#))

De acordo com [Lee, Cho e Su-Yeon](#) , "a necessidade de um transporte de alta velocidade tem-se intensificado nas últimas décadas, os países industrializados têm enfrentado graves problemas nos transportes das regiões urbanas e interurbanas."Tais problemas causam nos tempos de viagem uma ineficácia econômica, a deterioração do ambiente e degrada a qualidade de vida.

Destaca-se o problema que é representado pelo aumento da população nas grandes cidades, os automóveis e os serviços aéreos já não são mais uma solução para as pequenas viagens. Para servir adequadamente o público uma nova geração de sistema de transporte deve atingir certos requisitos como rapidez, confiabilidade e segurança.Além disso, deve ser conveniente que o ambiente seja agradável, tenha baixa manutenção, seja compacto e leve tornando-o adequado para o transporte em massa.([LEE; KIM; LEE, 2006](#))
As características acima citadas são exemplos práticos demonstrativos da pertinência em que o meio de transporte via levitação magnética encontra-se e da previsibilidade de um futuro promissor.

OBJETIVO

Apresentar de forma técnica descritiva a análise da tecnologia de transporte por levitação magnética através do uso de supercondutores , podendo então descrever vantagens e desvantagens do tema abordado.

HISTÓRIA

O trem Maglev datado de 1934, quando Hermann Kemper, da Alemanha, o patenteou, desde então no período dos anos de 1960 o desenvolvimento do trem sofreu larga expansão. Teve sua maturidade nas décadas de 1970 e 1980, tendo por fim o período final de testes e inicializações de projetos na década de 1990. Os primeiros programas de trem-bala por meio de levitação magnética nasceram como propostas para solucionar esses problemas de poluição ambiental e qualidade de vida.([LEE; CHO; SU-YEON, 2009](#))

2 Tecnologia da Levitação Magnética

A palavra levitação tem origem no latim *levis*, que significa leveza, e é o processo no qual se consegue suspender um objeto numa posição estável contrariando assim, as forças de gravidade, mediante o uso de forças exercidas sem contato com o objeto. Manter um corpo suspenso no ar, sem qualquer apoio aparente, como que desafiando a lei da gravidade, é reconhecido como fenômeno de levitação.

A força que age sobre um objeto sem entrar fisicamente em contato com ele é chamada de força sem contato. O exemplo mais familiar de uma força sem contato é o peso. Em contraste, uma força de contato é uma força aplicada a um corpo por outro corpo que está em contato com ele. No entanto, deve-se notar que a origem de todas as forças de contato (tais como fricção) pode ser rastreada para forças sem contato. Todas as quatro interações fundamentais como a gravidade, o eletromagnetismo, a "forte e fraca nuclear", são fontes primárias de forças sem contato. Ocasionalmente, quando as forças sem contato que sustentam o objeto não vêm de um aparato abaixo ou acima do objeto levitado este é também referido como um dispositivo de suspensão. Nesta sequência de estudos será feita a inclusão de 3 tipos de levitação e suspensão.

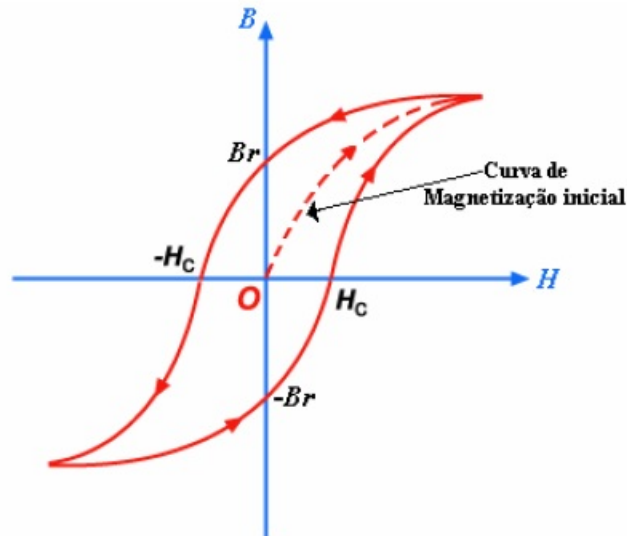
A mais relevante das forças é a força magnética presentes nos materiais magnéticos, incluindo os supercondutores. A magnitude das forças de levitação que pode-se obter depende dos tamanhos e formas da sua interação magnética e supercondutora em suas posições relativas e suas orientações, bem como as propriedades intrínsecas dos materiais supercondutores, tais como a magnetização dos ímãs e densidades críticas de corrente dos supercondutores. O tipo de processamento do supercondutor e a história de movimento e resfriamento de magneto e o supercondutor em relação um ao outro também são fatores influenciáveis na sua curvatura de magnetização.

Um método para alcançar a levitação é colocar o corpo a ser suspenso numa posição de equilíbrio estável sob a ação combinada da gravidade estas são nomeadas neste caso de forças eletromagnéticas.

Contudo, quando examina-se as forças sem contato, no momento de equilíbrio instável ou neutro, ou seja, após o objeto ser afastado de sua posição de equilíbrio e continuar afastando-se cada vez mais acontece um fenômeno em que os corpos que possuem seu centro de massa acima do ponto onde estão suspensos de forma estática. Logo, podemos notar individualmente ou em combinação da distribuição de massas, cargas, correntes ou momentos magnéticos envolvidos permanecem constantes. Para forças magnéticas, isto é conseguido mantendo-o magnetizado através de correntes na bobina de forma constante. Caracteriza-se assim então a curva de histerese exemplificada na figura 1.

Na figura tem-se os eixos β , dado em tesla, que é identificado como campo magnético presente num material ferromagnético e o eixo H , dado em Ampere/metro, é a intensidade de campo magnético. Identificando assim por exemplificação do gráfico a variação dos chamados: "ímãs duros" (aqueles que quando situados no gráfico de histerese encontram-se em um formato de "banana" pequenos) e "ímãs moles" (aqueles que quando situados no gráfico de histerese encontram-se em um formato de "banana" grandes).

Figura 1 – Ciclo de Histerese de um material magnético

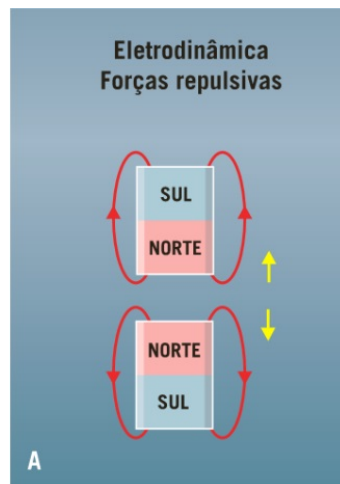


Fonte: (BOTELHO, 2008)

2.1 Levitação Eletrodinâmica (Electrodynamic Levitation)

De acordo com Stephan,2015 este método necessita do movimento de um campo magnético nas proximidades de um material condutor, onde correntes elétricas serão induzidas. Estas correntes geram um outro campo magnético o qual, pela lei de Lenz, opor-se-á à variação do campo criado pelo material magnético. A interação entre ambos gerará uma força de repulsão responsável pela levitação, representado pela figura 2.

Figura 2 – Levitação Eletrodinâmica



Fonte:(STEPHAN, 2015).

Uma outra força também existente neste modo de levitação, só que contrária ao movimento do material magnético (força de arrasto) origina-se devido às perdas ôhmicas no material condutor.

A levitação eletrodinâmica pode ser realizada tanto por uso de ímãs quanto de bobinas. Se uma superfície condutora de material não ferromagnético apresentar movi-

mento relativo com um ímã permanente próximo a ela, ambos também repelir-se-ão . Fato semelhante ocorre quando uma bobina de circulação de corrente alternada (CA) encontra-se próxima à superfície, de área equivalente ou superior à da bobina, de um condutor não ferromagnético espesso. Entre os simples e conhecidos tipos de levitação eletrodinâmica, cabe citar o experimento “Anel de Thompson” (SILVEIRA; AXT, 2003), por um comparativo à levitação controlada de chapas metálicas sobre bobinas (BERKELMAN; DZADOVSKY, 2008), que é um exemplar menos comum.

Por meio do quadro 1 podemos notar que este tipo de levitação possui pontos positivos e negativos.

Quadro 1 – Prós e Contras da Levitação Eletrodinâmica

| Prós | Contras |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - Campos magnéticos fortes através do grande espaçamento entre o trilho e o próprio trem faz com que seja possível o alcance de grandes velocidades (501Km/h). - Tem-se recentemente através de avanços de pesquisas mostrado que são capaz de ser resfriados por nitrogênio de baixo preço. | <ul style="list-style-type: none"> - Por ter fortes campos magnéticos Usuários do trem que façam o uso de Marcapassos estarão inacessíveis ao mesmo; Sendo também a possibilidade de ser conflitantes com objetos que possuam altas taxas de dados magnéticos em mídia de armazenamento como: Cartões de Créditos, HD's, etc. |

Fonte: (ROTE; CAI, 2002)

2.2 Levitação Eletromagnética Ativa (Active Electromagnetic Levitation)

A levitação eletromagnética ativa é garantida por um sistema on-board de baterias, as quais são carregadas pelos geradores lineares, não sendo dependentes do sistema de propulsão. A propulsão do trem, bem como a sua frenagem, é realizada através de um motor linear síncrono, o qual fica localizado em cada comboio. Assim como os outros equipamentos do sistema, o mesmo também se encontra nas braçadeiras inferiores dos comboios.

Esta abordagem se baseia na proposta alemã Transrapid, que está atualmente implantada em Shangai, na China, numa conexão de 30 km entre o aeroporto internacional de Pudong e o centro da cidade, seu maior exemplo de sucesso. Tal tecnologia consiste nas forças de atração, na qual os trilhos ficam na parte de baixo da superestrutura. Por ser um sistema instável, a estrutura conta com sensores a laser que monitoram a distância do “GAP”, que é a distância entre o trem e os trilhos (distância de levitação), tanto na parte inferior, quanto na parte lateral. Os prós e os contras desta tecnologia podem ser analisados no quadro 2.

O fundamento físico básico explora a força de atração que existe entre um ímã e um material ferromagnético, que é representado pela figura 3.

2.3 Levitação Magnética Supercondutora (Superconducting Magnetic Levitation)

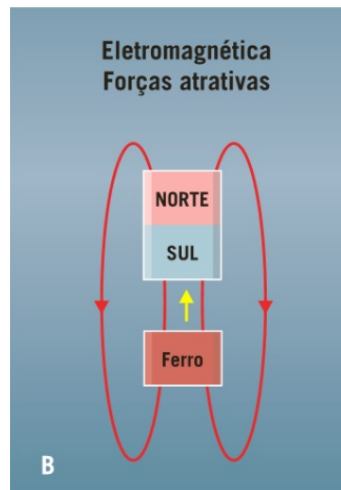
A tecnologia de levitação pode por fim ser baseada na estruturação de uma composição de um supercondutor de alta temperatura como por exemplo $YBa_2Cu_3O_7$

Quadro 2 – Prós e Contras da Levitação Eletromagnética

| Prós | Contras |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - Campos magnéticos dentro e fora do veículo são menores que os campos que ocorrem na tecnologia de levitação eletrodinâmica. - Provado comercialmente uma tecnologia com maior disponibilidade, sem rodas, com maior velocidade e um sistema secundário de propulsão. | <ul style="list-style-type: none"> - A separação entre o veículo e o trilho deve ser constantemente monitorada and corrigida por forma eletrônica a fim de evitar colisões ou acidentes em geral; Devido ao formato eletromagnético da tecnologia utilizada para levitação pode-se ocorrer constantes vibrações no trem afetando a comodidade em transporte urbano. |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3 – Levitação Eletromagnética



Fonte:(STEPHAN, 2015).

(óxido de ítrio,cobre e bário) e o campo magnético de composição de ímãs neodímio, ou também conhecidos como *ímãs neo* ($Nd_2Fe_{14}B$).

Conforme citado por Stephan "Supercondutores de alta temperatura (abreviado alta- T_c ou **HTS**) são materiais que possuem reações químicas e físicas ao atingir temperaturas elevadas. O primeiro supercondutor de alta- T_c foi descoberto em 1986 pela IBM através dos Pesquisadores Georg Bednorz e Karl Alexander Müller.

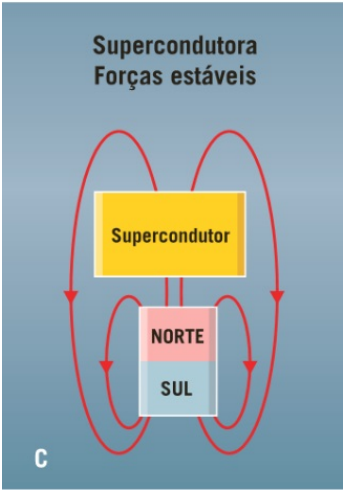
Acionado por um motor linear, o Maglev constituinte do fenômeno de supercondução é alimentado por um inversor de frequência, realizando a função de movimento do veículo. Os supercondutores, responsáveis pela levitação, se encontram dentro de quatro criostatos e a levitação ocorre em cima de trilhos magnéticos que utiliza ímãs dispostos em um esquema de coletor de fluxo, que possui peças de ferro entre dois compostos de ($Nd_2Fe_{14}B$) com os mesmos pólos magnéticos.

Em virtude da baixa energia consumida pelo Maglev, e da preocupação em sempre buscar fontes de energia alternativas, renováveis e limpas, projetou-se para o projeto brasileiro Maglev-Cobra o sistema para o que o mesmo pudesse usar a energia solar, com

placas fotovoltaicas. Tendo em vista que uma placa sozinha fornece 0,99 kWh/dia, são necessárias sete placas, para que energia fosse completamente suprida, havendo ainda uma sobra de 0,853kWh, a qual poderia ser utilizada para outros fins, tornando-a totalmente auto sustentável.(SOUSA et al., 2016)

Em uma classe de supercondutores a estabilidade do sistema de levitação forma o chamado 'efeito de aprisionamento' por caracterização da diminuição da força de levitação, fazendo assim que o efeito estabilize as linhas de campo magnético que o penetram." O efeito da força supercondutora estável, é representado na figura 4, e os prós e os contras desta tecnologia podem ser analisados no quadro 3.

Figura 4 – Levitação Supercondutora



Fonte:(STEPHAN, 2015).

Quadro 3 – Prós e Contras da Levitação Eletromagnética Supercondutora

| Prós | Contras |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - O consumo energético é muito reduzido em relação aos outros tipos de levitação. - Tem-se recentemente através de avanços de pesquisas mostrado que são capaz de ser resfriados por nitrogênio de baixo preço, tornando cada vez que a tecnologia de resfriamento avança, um método mais eficaz. Seu ângulo de raio para curvatura e inclinação são extremamente mais eficientes que qualquer outro tipo de trem existente. | <ul style="list-style-type: none"> - Seu preço é extremamente mais alto - Sua tecnologia de resfriamento é de alta complexidade. |

Fonte: Elaborada pelo autor

2.4 Trilhos eletromagnéticos supercondutores

Os rolamentos são componentes essenciais em estruturas mecânicas. São ferramentas projetadas como uma interface a fim de minimizar os efeitos entre partes móveis e estacionárias. Por exemplo, a ação de rolamentos circulares dependem de um menor atrito substituindo por um maior de deslizamento. Este, contanto, poderia ser reduzido ainda mais pela incorporação de lubrificantes sólidos ou líquidos.

Entretanto, o contato físico direto entre os sólidos estacionários ainda existem dentro de tais rolamentos, concretizando um desgaste mecânico. Isso acaba por limitar a vida útil do rolamento. Com rolamentos de película de fluido e de ar, contato entre peças móveis e estacionárias mediado por um fluido movente em movimento rápido sob alta pressão. Na figura 5 encontra-se uma ilustração de um rolamento magnético.

Figura 5 – Rolamento Magnético



Fonte: ¹Site Kracht

A perda de potência é reduzida a associada ao fluido sendo assim os únicos rolamentos que eliminam contatos entre componentes móveis e estacionários, seja sólidos ou fluidos, são dispositivos de levitação.

Atualmente, os rolamentos magnéticos, considerando os supercondutores uma subseção do mesmo representam a versão mais desenvolvida de rolamentos de levitação. Uma forma extrema de usar uma combinação de ímãs e supercondutores para o estator levitante é sob a forma de um compósito de ímã supercondutor. Os rolamentos feitos a partir deste têm a capacidade de carga e a rigidez dos rolamentos magnéticos com estabilidade adicional de um tipo material supercondutor.

No entanto, esta combinação de atributos ainda não foi explicitamente demonstrada. Observou-se que um ponto fraco dos rolamentos magnéticos É valores baixos para as forças e rigidez disponíveis. A partir de momento, não há solução que possa superar todas as essas lacunas. Esta situação permite desenvolvimento de todos os tipos de variações em torno do tema, todos com seus nichos especiais e duvidosos. (ZHANG et al., 2002)

Os tipos de ímãs suplementares foram examinados na tabela 1, que contém a comparação direta entre os importantes termos presentes, ou não, nos rolamentos magnéticos. Esta abordagem se restringe à utilização das três formas analisadas, entre o meio mecânico o meio magnético e o avanço de magnetização com os supercondutores.

¹ Disponível em: <<https://www.kracht.nl/index.php?l=enid=7c=103>>. Acesso em ago. 2017.

Tabela 1 – Comparação do rolamento magnético supercondutor, rolamento magnético ativo e rolamento mecânico circular

| | Rolamento Magnético Supercondutor | Rolamento Magnético ativo | Rolamento Mecânico |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| Coeficiente de fricção | 10^{-7} | 10^{-4} | 10^{-3} |
| Contato ao trilho | Não | Não | Sim |
| Possui controle de sistema | Não | Sim | Não |
| Partes Auxiliares | Sim (Cooler Criogênico) | Sim (Sensor e controle eletrônico) | Não |
| Velocidade Angular ilimitada | Sim | Sim | Não |
| Suporte à Pressão | Baixa | Baixa | Alta |
| Rigidez | Baixa | Baixa | Alta |

3 Motores elétricos lineares

3.1 Conceito

Motores lineares ou **LIM** (Linear Motors) são motores elétricos de indução que produzem movimento em uma linha reta em vez de movimento rotacional. Em um motor elétrico tradicional, o rotor (parte giratória) gira dentro do estator (parte estática); Num motor linear, o estator é desembrulhado e colocado de forma plana e o "rotor" move-se para além dele numa linha reta.

Motores lineares frequentemente usam ímãs supercondutores, que são resfriados a baixas temperaturas para reduzir o consumo de energia e potencializar o efeito da supercondutividade através da diminuição da sua resistência elétrica e aumenta da permissividade magnética.

3.2 História

O princípio básico por trás do motor linear foi descoberto em 1895, mas os dispositivos práticos não foram desenvolvidos até 1947. Durante os anos 1950, o engenheiro britânico Eric Laithwaite (1921-1997) começou a considerar se os motores lineares poderiam ser usados em tecelagem elétrica. A pesquisa de Laithwaite no Imperial College, em Londres, atraiu o reconhecimento internacional na década de 1960, após um discurso à Instituição Real intitulado "Máquinas Elétricas do Futuro". (LAITHWAITE, 1987)

Nessa mesma época, o Professor Eric Laithwaite iniciou pesquisas e experimentos sobre o motor linear de indução, como o motor conhecido como "rotor lâmina". Esse motor possuía enrolamento do primário curto, e conduzia discos de alumínio através de vias ferroviárias testes construídas em laboratório. Mais tarde foi utilizado em outras diversas locomotivas. Esse experimento provocou grande interesse para novas aplicações por parte dos engenheiros e pesquisadores do mundo todo, conforme registrado no Japão e na França. Em seguida, na década de 1960, foram desenvolvidos sistemas para simulação de colisões de automóveis. (BENES, 2014)

3.3 A tecnologia dos motores elétricos indutores lineares

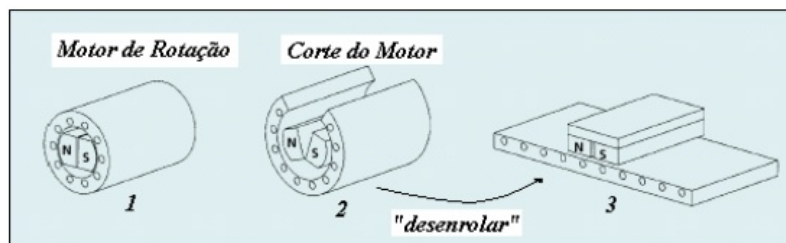
Segundo Chris [Woodford,1999](#): O principal problema com os motores lineares tem sido o custo e a dificuldade de desenvolver eletroímãs adequados. Poderosos eletroímãs são necessários para levitar e mover algo tão grande como um trem, e estes normalmente consomem quantidades substanciais de energia elétrica. Atualmente, os motores lineares usam agora ímãs supercondutores para resolver este problema.

Se os eletroímãs são resfriados a baixas temperaturas usando hélio líquido ou nitrogênio, sua resistência elétrica desaparece quase inteiramente, o que reduz consideravelmente o consumo de energia necessária para manutenção e funcionamento do trem, até atingir uma quantidade mínima razoável e de fácil alcance para recepção contínua de eletricidade e conseqüentemente um pico menor no momento de partida do mesmo. Este efeito tem sido objeto de intensa pesquisa desde meados dos anos 80 e faz com que os motores lineares de grande escala sejam muito mais viáveis.

Os motores lineares pertencem a um grupo especial de máquinas elétricas que convertem diretamente energia elétrica em energia mecânica na forma de translação. A máquina linear pode ser obtida através de uma transformação geométrica da máquina rotativa. Considera-se um motor rotativo com um rotor constituído por dois pólos. Uma boa analogia que explica a constituição do motor linear é a seguinte; pode-se obter um motor linear cortando um motor de rotação da sua periferia para o seu centro, o qual depois de cortado é desenrolado. ([OLIVEIRA; RODRIGUES, 2000](#))

Para entendimento da analogia acima citada é demonstrada em forma gráfica adaptada de [Vaz](#) a partir da figura 6.

Figura 6 – Transformação: motor de rotação em um motor linear



Fonte: Adaptado de ([Vaz,2009](#))

Por todo o comprimento do veículo, tanto na parte de baixo quanto nas laterais que envolvem o trilho existem eletroímãs que são controlados eletronicamente. O sistema eletrônico é garantia de que o afastamento entre o veículo e os trilhos permanecem constantes (nominalmente 10 mm). Transrapid é um comboio de alta velocidade para o transporte público, desenvolvido com tecnologia Alemã pela empresa *Transrapid International GmbH and Co. KG*, operada em conjunto pela *Siemens AG* e *ThyssenKrupp AG*. Pairar o Transrapid requer menos energia do que o seu equipamento de ar condicionado.

O sistema de levitação é fornecido por baterias on-board e, portanto, independente do sistema de propulsão. O veículo é capaz de pairar acima de uma hora sem energia externa. Ao viajar, as baterias on-board são recarregadas pelos geradores lineares integrados aos ímãs de apoio.

Em conformidade com [Cassat e Jufer,2002](#) em sua obra "*Maglev projects technology aspects and choices*." foi notado que:

O motor linear síncrono que compõe o sistema de levitação magnética do Transrapid é

utilizado tanto para a propulsão quanto para a frenagem. Ele está funcionando como um motor rotativo elétrico cujo estator é cortado e estendido ao longo dos trilhos. Dentro dos enrolamentos do motor, correntes alternadas estão gerando um campo magnético viajante que move o veículo, sem contato.

O sistema de propulsão no trilho é ativado apenas no momento em que o veículo realmente funciona. A velocidade pode ser continuamente regulada através da variação da frequência da corrente alternada. Se a direção do campo de viajar é invertido, o motor torna-se um gerador que freia o veículo sem qualquer contato. A energia de frenagem pode ser reutilizada e alimentado de volta para a rede elétrica.

De acordo com a Lei de Lenz, a interação do campo de levitação com a corrente nas ranhuras do carril(cada uma das barras de ferro paralelas sobre as quais giram as rodas de locomotivas, bondes, vagões etc.) resultam em uma propulsão contrária, também chamada de força de frenagem. Durante o movimento do ímã ao longo do carril, o enrolamento do gerador linear do pólo principal é acoplado com um Fluxo não-constante, o que induz uma tensão e recarrega as baterias de bordo.

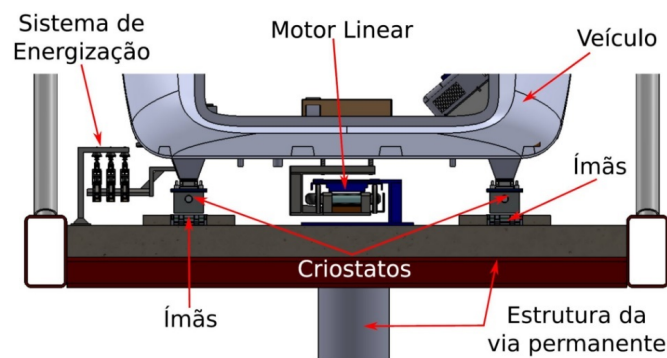
O processo de geração começa na faixa de 15 km/h e é igual às perdas dos sistemas de suspensão magnética em 90 km/h. Todas as perdas de energia do veículo são compensadas a uma velocidade de 110 km/h. Logo, o ímã integra três tarefas:

levitação, propulsão e transferência de energia para o veículo.([YAGHOUBI; AOLIAEI; BARAZI, 2012](#))

3.4 A utilização dos motores elétricos lineares

A China vem utilizando o motor linear para transporte de passageiros desde 2003 com o trem de levitação eletromagnética alemã Transrapid, este percorre um trecho de 30km. O Japão também vem operando seu trem de levitação num trecho de 9km em Nagoya desde 2005: o **HSST** utiliza um motor linear para sua tração. No Brasil, o MagLev-Cobra utiliza o motor linear de indução para a sua propulsão, tendo como percurso a ligação do Centro de Tecnologia 1 com o Centro de Tecnologia 2 da UFRJ, através de uma via contendo, atualmente, 200m de comprimento.([SOUSA et al., 2016](#))

Figura 7 – Principais componentes da estrutura do Maglev - Cobra



Fonte:([SOUSA et al., 2016](#))

4 Vantagens e Desvantagens dos veículos Levitados Magneticamente

Através da análise técnica é possível apontar certas qualificações positivas e negativas para a utilização do mesmo de forma ampliada e funcional como método de transporte. É apontado a seguir as principais vantagens:

- Diferentemente da maioria dos meios de transportes convencionais não há superfície de contato, ou fricção , tornando-o assim o meio de transporte com menor taxa de reparo.
- Maglev é aproximadamente 20 vezes mais seguro que aviões, 250 vezes mais que trens convencionais, e 700 vezes mais seguro que automóveis de transporte convencionais. (RAUT; WARKADE; MADHAVI,)
- Apesar das altíssimas velocidades alcançadas pelo veículo, os passageiros tem total liberdade de movimento dentro do mesmo enquanto em movimento.
- Menor poluição sonora.
- Viagens mais rápidas.
- Excessivamente maior vida-útil em relação aos trens convencionais.
- Custo do petróleo utilizado para resfriamento das cerâmicas supercondutoras é baixo, consequentemente possui maior eficiência energética
- Menos suscetível a adversidades climáticas.
- O Maglev utiliza 30% de energia de um trem de alta velocidade viajando na mesma velocidade (1/3 mais potente em relação ao mesmo consumo de energia) .
- Maior capacidade de lotação que qualquer outro veículo atual, há projetos com pelo menos 12.000 passageiros ou mais em movimento diariamente.(AGRAWAL; SONI,)

Nota-se um grande número de vantagens,e apesar de haver desvantagens em menor número, estes são pontos cruciais e que são grandes obstáculos na implantação do meio de transporte. É apontado, então, a seguir as principais desvantagens:

- Maior instabilidade por ser baseado na tecnologia de levitação por forças magnéticas atrativas.
- Perdas de energia no controle dos circuitos ou nos eletroímãs, podem causar a perda da levitação.
- Alto custo de implementação dos trilhos devido aos recursos necessários para o mantimento do veículo em bom estado ser escassos na natureza e/ou obtidos de formas custosas.
- Baixa adaptabilidade, sendo que o meio de transporte não é capaz de adaptar-se as linhas antigas, tornando-as obsoletas.
- Ainda não há métodos de controle de freio totalmente efetivos do veículo a não ser que exijam rodas,ou travas físicas.

5 Projetos de Trens via Levitação Magnética

Podemos ter 2 tipos de aplicações para Trens via levitação magnética: Transporte de pessoas ou diversas opções de transporte.

5.1 Transporte Diverso

Algumas das aplicações a seguir são relevantes a fim de saber a importância variada do projeto MAGLEV em escala mundial.

- A NASA planeja usar a tecnologia de levitação magnética do Indutrack I para lançamento de veículos espaciais em órbita terrestre baixa.
- A Boeing está investigando no Maglev com fim de fornecimento da instalação de teste hipersônico terrestre para a Força Aérea.
- Para [Rote e Cai](#) a indústria de mineração também se beneficiará do Maglev, de forma autossustentável na redução do consumo de energia e , conseqüentemente, da poluição.

5.2 Transporte Urbano

Há realmente variados projetos em andamento da tecnologia de transporte por levitação magnética, onde 4 destes projetos no mundo possuem destaque, sendo eles:

- Transrapid(Alemanha)
- Linimo(Japão)
- Swiss Metro (Suíça)
- Incheon Airport Maglev(Coreia do Sul)

HSR (High Speed Rail), é definido como um trilho construído especialmente para viagens de alta velocidade ou especialmente atualizados para viagens de alta velocidade. Como exemplo destes trens vemos abaixo na tabela 2 uma comparação entre esta tecnologia, representada pelos 3 trens mais atuais e significantes em seu meio, versus a tecnologia mais atual representante da levitação magnética de transporte em operação exemplificado na coluna do Transrapid.

Encontram-se atualmente operantes os trens:

- Shanghai Maglev Train (Também conhecido como Transrapid), situado na cidade de Shanghai. Shanghai Maglev Train (Também conhecido como Transrapid), situado na cidade de Shanghai, que conecta o aeroporto da cidade com Pudong. Este trem utiliza da tecnologia EML para indução magnética em seus carrilhos.
- Linimo. trem com tecnologia japonesa HSST(High Speed Surface Transport), teve seu início de operação em Março 2005, possui motor indutor linear que chega a conduzi-lo a velocidades de 100km/h, este trem utiliza da tecnologia EML para indução magnética em seus carrilhos.

Tabela 2 – Comparação do HSR e o rolamento magnético supercondutor, rolamento magnético ativo e rolamento mecânico circular

| Tecnologia | TGV-A | ICE | X2000 | Transrapid |
|------------------------------|-------|-------|-------|------------|
| Comprimento(m) | 237.6 | 410.7 | 140 | 153.1 |
| Peso Total(t) | 484 | 950 | 338 | 342 |
| Capacidade(passageiros) | 485 | 759 | 255 | 608 |
| Velocidade Máxima(km/h) | 320 | 300 | 240 | 500 |
| Elevação Máxima (graus) | 7,1 | 7,1 | 6 | 12 |
| Força Mínima de Partida (kN) | 212 | 200 | 160 | - |

Fonte: (NAJAFI; NASSAR, 1996)

Figura 8 – Exemplo do trem Chinês em operação: Shanghai Maglev Train



Fonte:²Site Brickshelf

Figura 9 – Exemplo do trem Japonês em operação: Linimo



Fonte:³Site Nippon Sharyo

- Incheon Airport Maglev, situado na ilha de Yeongjong onde encontra-se o aeroporto de Incheon na Coreia do Sul, comparado com Linimo ele tem um design mais futurista, graças a que é mais leve, com custos de construção reduzidos para a metade, este trem também utiliza da tecnologia EML para indução magnética em seus carrilhos.

¹ Disponível em: <<http://www.brickshelf.com/gallery/Clarki/Monorail/transrapid.jpg>>. Acesso em ago. 2017..

² Disponível em: <<http://www.n-sharyo.co.jp/business/tetsudo/images/hsst.jpg>>. Acesso em ago. 2017.

Figura 10 – Exemplo do trem Coreano em operação: Incheon Airport Maglev



Fonte:⁴Site Korea.net

Já o SwissMetro encontra-se em desenvolvimento abandonado devido às duas de suas empresas desenvolvedoras do produto serem dissolvidas e estar passando por fase de reestruturação empresarial.

Considerações finais

O Trem Maglev é considerado para os sistemas de transporte urbano e interurbano uma forma eficiente, rápida e de grande diversidade nos tipos de transporte (seja de passageiros como de materiais de grande importância). Portanto, a tecnologia EDL é preferida do ponto de vista do custo de construção. No entanto, em operação, a tecnologia EML eo SML são preferidos para controle e confiabilidade. Além disso, assim como o desenvolvimento do supercondutor de alta temperatura e novo tipo de Ímãs, energia magnética mais forte que é mais rentável será usado para futuros projetos de trem Maglev tornando-os mais viáveis no ponto de vista financeiro. A proposta destaca-se por ser ecologicamente correta, com menor poluição sonora e ambiental e menor consumo de energia. Ela é economicamente viável, pois apresenta baixo custo de manutenção. Tecnicamente ideal, tendo em vista que a levitação magnética supercondutora é mais vantajosa que o método eletromagnético ou eletrodinâmico. Politicamente conveniente uma vez que está calçada em tecnologia nacional devido a construção do projeto MAGLEV COBRA, com oportunidades para crescimento industrial e científico. Socialmente correta, já que facilitará a mobilidade nas grandes cidades.

"Tornou-se chocantemente óbvio que a nossa tecnologia excedeu a nossa humanidade."Einstein, Albert

Referências

AGRAWAL, A.; SONI, A. K. Maglev: A new promise.

BENES, M. M. *FRENAGEM REGENERATIVA DO MOTOR DE INDUÇÃO DO VEÍCULO MAGLEV-COBRA*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

³ Disponível em: <<http://www.korea.net/upload/content/editImage/20160203Incheon%20Train01new.jpg>>. Acesso em ago. 2017.

BERKELMAN, P.; DZADOVSKY, M. Single magnet levitation by repulsion using a planar coil array. In: IEEE. *Control Applications, 2008. CCA 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 108–113.

BOTELHO, I. J. Modelagem e controle linear de um sistema de levitação de ímã permanente. 2008.

CASSAT, A.; JUFER, M. Maglev projects technology aspects and choices. *IEEE Transactions on applied superconductivity*, IEEE, v. 12, n. 1, p. 915–925, 2002.

LAITHWAITE, E. R. *A history of linear electric motors*. [S.l.]: Macmillan, 1987.

LEE, H.-W.; CHO, C.; SU-YEON. Analysis of the magnetic effect on the tube infrastructure for a super speed tube train. *International Journal of Railway*, Korean Society for Railway, v. 2, n. 4, p. 170–174, 2009.

LEE, H.-W.; KIM, K.-C.; LEE, J. Review of maglev train technologies. *IEEE transactions on magnetics*, IEEE, v. 42, n. 7, p. 1917–1925, 2006.

NAJAFI, F. T.; NASSAR, F. E. Comparison of high-speed rail and maglev systems. *Journal of transportation engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 122, n. 4, p. 276–281, 1996.

OLIVEIRA, R. A.; RODRIGUES, A. L. Desenho e construção de um motor linear de indução de baixa velocidade. *DEE-FCT, Univ. Nova de Lisboa*, 2000.

RAUT, A. A. A. S. G.; WARKADE, V. A.; MADHAVI, R. Maglev monorail and its prototype.

ROTE, D. M.; CAI, Y. Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems. *IEEE Transactions on Magnetism*, IEEE, v. 38, n. 2, p. 1383–1390, 2002.

SATO, Y.; KONAGAI, K.; MAEDA. Supermetro-super-high-speed-train in low pressure tunnel. In: *World Congress on Railway and Research*. [S.l.: s.n.], 2006.

SILVEIRA, F. L. d.; AXT, R. Explicação qualitativa do "anel de thomson". como ocorre a "levitação magnética"? *Revista brasileira de ensino de física. São Paulo. Vol. 25, n. 1 (mar. 2003), p. 81-85*, SciELO Brasil, 2003.

SOUSA, W. T. de et al. Maglev cobra project: Superconducting levitation for public transportation. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 38, n. 4, 2016.

STEPHAN, R. M. Tecnologia de levitação magnética no brasil. 2015. Disponível em: <http://www.cienciahoje.org.br/revista/materia/id/951/n/tecnologia_de_levitacao_magnetica_no_brasil>.

VAZ, O. H. de L. Trabalho de conclusão de curso.

WOODFORD, C. *Linear motors*. Retirado de "http://www.explainthatstuff.com/linearmotor.html", 1999. Disponível em: <<http://www.explainthatstuff.com/linearmotor.html>>.

YAGHOUBI, H.; AOLIAEI, M.; BARAZI, N. *Maglev*. INTECH Open Access Publisher, 2012. ISBN 9789535104483. Disponível em: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs/34787/InTech-Maglev.pdf>>.

ZHANG, Y. et al. Reaction wheel with hts bearings for mini-satellite attitude control.
Superconductor Science and Technology, IOP Publishing, v. 15, n. 5, p. 823, 2002.