

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - CAMPUS BAGÉ

VICTOR AUGUSTO DELIBERAL CAMARGO

**MOTORES LINEARES E SUAS APLICAÇÕES: TRENS DE LEVITAÇÃO
MAGNÉTICA**

BAGÉ

2026

VICTOR AUGUSTO DELIBERAL CAMARGO

**MOTORES LINEARES E SUAS APLICAÇÕES: TRENS DE LEVITAÇÃO
MAGNÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Energia.

Orientador: Carlos Sonier Cardoso do
Nascimento

Bagé

2026

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C172m Camargo, Victor Augusto Deliberal
MOTORES LINEARES E SUAS APLICAÇÕES: TRENS DE LEVITAÇÃO
MAGNÉTICA / Victor Augusto Deliberal Camargo.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2026.

"Orientação: Carlos Sonier Cardoso do Nascimento".

1. motor elétrico. 2. motor elétrico linear. 3. levitação
magnética. 4. trens de levitação magnética. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

VICTOR AUGUSTO DELIBERAL CAMARGO

MOTORES LINEARES E SUAS APLICAÇÕES: TRENS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 24 de julho de 2026.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos Sonier Cardoso do Nascimento

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Caison Rodrigues Ramos

UNIPAMPA

Prof. Dr. Pablo Fernando Soardi Costa

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por PABLO FERNANDO SOARDI COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 24/07/2026, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por CAISON RODRIGUES RAMOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 24/07/2026, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por CARLOS SONIER CARDOSO DO NASCIMENTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 24/07/2026, às 17:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 2087555 e o código CRC 7427D985.

RESUMO

Desde o advento dos motores elétricos primitivos com Michael Faraday no século XIX, essa classe de dispositivos tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento industrial, tecnológico e social, sendo utilizados em inúmeras aplicações convertendo energia elétrica em energia mecânica. Dentre as variações de motores elétricos, destacam-se os motores elétricos lineares, por produzirem movimento diretamente em um eixo linear, evitando mecanismos e reduzindo perdas por atrito e desgaste. Essa característica torna os motores lineares exemplos eficientes e atrativos para diversas aplicações tecnológicas. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo compreender os princípios de funcionamento de motores lineares e analisar as suas aplicações, principalmente as destinadas a transporte através dos trens de levitação magnética (Maglev). São abordados conceitos fundamentais do eletromagnetismo, considerando a arquitetura de motores elétricos convencionais e lineares, incluindo conceitos de levitação eletromagnética e eletrodinâmica. Faz-se especial menção às características construtivas dos Maglevs, incluindo levitação, orientação e. Ainda são apresentados exemplos e projetos reais desenvolvidos e implantados em outros países como Alemanha, Japão, Estados Unidos, Suíça e Brasil, destacando suas particularidades e perspectivas de aplicação. Este estudo evidencia o potencial dos trens de levitação magnética como alternativa avançada e eficiente para o futuro do transporte, principalmente de passageiros, e especialmente considerando a crescente demanda por sistemas de mobilidade de baixo impacto energético, ambiental e social. Realizou-se uma pesquisa bibliográfica de abordagem qualitativa e quantitativa, também foi realizado um procedimento experimental virtual de natureza básica e objetivo exploratório.

Palavras-Chave: motor elétrico; motor elétrico linear; levitação magnética; trens de levitação magnética; mobilidade elétrica.

ABSTRACT

Since the advent of primitive electric motors by Michael Faraday in the 19th century, this class of devices has played a fundamental role in industrial, technological, and social development, being used in countless applications to convert electrical energy into mechanical energy. Among the various types of electric motors, linear electric motors stand out because they produce motion directly along a linear axis, eliminating the need for intermediate mechanisms and reducing losses due to friction and wear. This characteristic makes linear motors efficient and attractive options for a wide range of technological applications. In this context, this study aims to understand the operating principles of linear motors and analyze their applications, particularly those intended for transportation via magnetic levitation (Maglev) trains. Fundamental concepts of electromagnetism are addressed, considering the architecture of conventional and linear electric motors, as well as concepts of electromagnetic levitation and electrodynamics. Special mention is made of the design characteristics of Maglevs, including levitation, guidance, propulsion, and power supply. Examples and real-world projects developed and implemented in other countries such as Germany, Japan, the United States, Switzerland, and Brazil are also presented, highlighting their specific features and prospects for application. This study highlights the potential of magnetic levitation trains as an advanced and efficient alternative for the future of transportation, particularly for passenger transport, and especially given the growing demand for mobility systems with low energy, environmental, and social impacts. A literature review employing both qualitative and quantitative approaches was conducted, and a basic virtual experimental procedure with an exploratory objective was also performed.

Keywords: electric motor; linear electric motor; magnetic levitation; magnetic levitation trains; electric mobility.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CONSUMO DE ENERGIA POR SETORES.....	14
FIGURA 2: MOTOR LINEAR ELEMENTAR A PARTIR DE UM MOTOR CONVENCIONAL...	16
FIGURA 3: COMPONENTES DE UM MOTOR LINEAR DA FAMÍLIA DE PRODUTOS 1FN3..	21
FIGURA 4: EXEMPLO SIMPLIFICADO DE MALHA DE CONTROLE DE UM SERVO CONVERSOR (<i>DRIVE</i>)	22
FIGURA 5: SERVO CONVERSOR SINAMICS S120.	22
FIGURA 6: TORNO CNC CENTUR 300.....	23
FIGURA 7: MOTOR LINEAR SIMOTICS L-1FN3	24
FIGURA 8: APLICAÇÕES CONVENCIONAIS DE MOTORES LINEARES SIMOTICS L-1FN3	24
FIGURA 9: ILUSTRAÇÃO DA SOLUÇÃO DE MOTORES PLANARES XPLANAR DA BECKHOFF	25
FIGURA 10: MOTOR XPLANAR DA BECKHOFF DIVIDINDO CARGA ENTRE DOIS MÓDULOS	25
FIGURA 11: AIRCRAFT LAUNCH AND RECOVERY SYSTEMS	26
FIGURA 12: MATERIAL PUBLICITÁRIO DE UM TAV COM TECNOLOGIA MAGLEV NO BRASIL.....	28
FIGURA 13: ILUSTRAÇÃO DE TREM COM SUSPENSÃO ELETROMAGNÉTICA.....	31
FIGURA 14: SISTEMA DE LEVITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA ONDE: ZO — INPUT DE DISTÂNCIA DO ENTREFERRO, Z — ENTREFERRO ATUAL, VZ — VELOCIDADE DO ELETROÍMÃ NO EIXO Z, M — MASSA SUSPensa.....	31
FIGURA 15: ILUSTRAÇÃO DE TREM COM SUSPENSÃO ELETROMAGNÉTICA.....	32
FIGURA 16: MAGLEV TRANSPERAPID SHANGAI.....	33
FIGURA 17: MODELO DE ORIENTAÇÃO DO MLX PRODUZINDO FORÇAS DE ORIENTAÇÃO E LEVITAÇÃO NO TREM.....	34
FIGURA 18: ESQUEMA DE MOTOR LINEAR	35
FIGURA 19: TRILHO LATERAL DA LINHA DE TESTE MAGLEV DE YAMANASHI ONDE: 1 - ENROLAMENTO DA ARMADURA (PROPULSÃO), 2 - BOBINA DE LEVITAÇÃO E ORIENTAÇÃO, 3 - VIGAS DUPLAS.....	36
FIGURA 20: GASTO DE ENERGIA ELÉTRICA POR OCUPANTE E KM DE ALGUNS MODAIS DE TRANSPORTE.....	37
FIGURA 21: MAGLEV TRANSPERAPID	38
FIGURA 22: SEÇÃO TRANSVERSAL DO MAGLEV TRANSPERAPID ONDE: 1 — ELETROÍMÃ DE SUSTENTAÇÃO; 2 — CONJUNTO DE ARMADURA DO LSM COM ENROLAMENTOS; 3 — ENROLAMENTOS DO GERADOR LINEAR; 4 — ELETROÍMÃ	

DE ORIENTAÇÃO; 5 — ELETROÍMÃ DO FREIO POR CORRENTES DE FOUCAULT; 6 — SAPATAS DE APOIO; 7 — SENSOR INKREFA (LOCALIZAÇÃO DO VEÍCULO); 8 — BOGIE DE LEVITAÇÃO; 9 — SUSPENSÃO DA CABINE; 10 — MOLA PNEUMÁTICA. 38	
FIGURA 23: A- MAPA DA LINHA DE TESTES DO MAGLEV YAMANASHI B- PERFIL ALTIMÉTRICO DO PERCURSO	40
FIGURA 24: PROTÓTIPO DE MAGLEV URBANO CONSTRUÍDO PELA GENERAL ATOMICS NA CALIFÓRNIA	42
FIGURA 25: SEÇÃO TRANSVERSAL DA ESTAÇÃO DO SWISSMETRO	45
FIGURA 26: SEÇÃO TRANSVERSAL DO TÚNEL E DO VEÍCULO SWISSMETRO ONDE: 1 - ANEL DE CONCRETO COM 5M DE DIÂMETRO 2 - ESTRUTURA DO VEÍCULO 3 - SUPORTE EML A ORIENTAÇÃO E LEVITAÇÃO 4 - MOTOR LINEAR SÍNCRONO 5- TRANSFORMADOR LINEAR	45
FIGURA 27: (A) PROTÓTIPO EM ESCALA REDUZIDA, EM 2000. (B) PROTÓTIPO EM ESCALA REAL, EM 2011. (C) PROTÓTIPO EM ESCALA REAL OPERANDO NUMA LINHA ABERTA. (D) PROTÓTIPO USADO PARA TRANSPORTE NO CAMPUS UNIVERSITÁRIO EM 2015.....	47
FIGURA 28: TELA INICIAL DO TST, COM CATÁLOGO DE TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS. 50	
FIGURA 29: TST, CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE FORNECIMENTO DE ENERGIA.....	50
FIGURA 30: TST, CONFIGURAÇÃO DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO. 51	
FIGURA 31: TST, CONFIGURAÇÃO DO MOTOR.....	52
FIGURA 32: TST, DEMAIS CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA	52
FIGURA 33: TST, POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS MECÂNICOS	53
FIGURA 34: TST, CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA MECÂNICO DE MOTORES LINEARES 54	
FIGURA 35: TST, CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA MECÂNICO DE MOTORES LINEARES 54	
FIGURA 36: TST, CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA MECÂNICO DE MOTORES LINEARES 55	
FIGURA 37: TST, CURVA DE POSICIONAMENTO DO SISTEMA	56
FIGURA 38: TST, CURVA DE VELOCIDADE DO SISTEMA.....	56
FIGURA 39: TST, CURVA DE ACELERAÇÃO DO SISTEMA.....	56
FIGURA 40: TST, CATÁLOGO DE SELEÇÃO DO MOTOR	57
FIGURA 41: TST, INFORMAÇÕES DO MOTOR ESCOLHIDO	57
FIGURA 42: TST, DETALHES DRIVE ESCOLHIDO	58
FIGURA 43: TST, EIXO A CONFIGURADO.	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DOS MOTORES DA LINHA 1FN3	19
TABELA 2: VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TECNOLOGIA MAGLEV	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1. Motores Lineares	16
2.1.1. Motores lineares no mercado.....	17
2.1.2 Características dos motores lineares.....	19
2.1.3. Aplicações da tecnologia.....	22
2.1.3.1. Máquinas CNC	23
2.1.3.2. Transporte industrial.....	24
2.1.3.3. <i>Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS)</i>	26
2.2 Trens de Alta Velocidade (TAV).....	27
2.3. Trens de Levitação Magnética.....	29
2.3.1. Características Construtivas dos Trens Maglev	30
2.3.1.1. Levitação	30
2.3.1.2. Orientação.....	33
2.3.1.3. Propulsão	34
2.3.1.4. Energia.....	36
2.3.2. Maglevs pelo mundo	37
2.3.2.1. Transrapid (Alemanha).....	37
2.3.2.2. Yamanashi Maglev (Japão)	39
2.3.2.4. Swissmetro (Suíça).....	43
2.3.2.5. Maglev Cobra	46
3. METODOLOGIA.....	49
3.1. Experimento Virtual: Configurando um sistema com propulsão linear através do software de especificação/modelamento TIA SELECTION TOOL (TST) 49	49
4. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICE A – TRENS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: UM ESTUDO DE CASO	64

APÊNDICE B – DECLARAÇÃO DE USO OU NÃO USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM TRABALHOS ACADÊMICOS DO CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA.....	65
--	-----------

1. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos possuem diversas funções na engenharia e estão inseridos nas mais variadas atividades do cotidiano das pessoas. Os motores elétricos são usados desde a automação residencial, como, por exemplo, em elevadores, cisternas, portões elétricos e ventiladores, até as mais complexas atividades industriais, como mineração, esteiras de transporte de materiais, prensas e mais uma infinidade de aplicações (Paes; Sakamoto, 2016).

Apesar de ser um produto bem elaborado e com enorme campo de aplicações, o princípio de funcionamento dos motores elétricos é relativamente simples, o motor elétrico tem por finalidade converter energia elétrica em energia mecânica, utilizando para isto a interação entre campos magnéticos e corrente elétrica. Segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006) e de acordo com Mota *et al.*(2024), desde sua concepção, diversos modelos de motores elétricos foram desenvolvidos, alguns focados em atributos específicos, como eficiência, precisão e velocidade.

Devido a essa grande utilização dos motores elétricos, fica claro que existem diversas formas construtivas que, de acordo com suas particularidades, aplicam-se melhor a cada uma das atividades. De maneira abrangente, os motores mais conhecidos e utilizados são os rotativos, que por sua vez podem ser classificados de acordo com suas formas de funcionamento como: motor de corrente contínua, assíncrono e síncrono; e cada um desses tipos de funcionamento pode ser ainda subdividido de acordo com suas particularidades construtivas (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2006).

Segundo Zago (2013), o motor elétrico linear pode ser facilmente descrito como um motor rotativo convencional “desenrolado”, no qual o movimento mecânico ocorre diretamente em uma linha reta, removendo a necessidade de conversores rotativo-lineares, reduzindo perdas por atritos, desgastes e consequentes manutenções. De acordo com Chevailler (2006), os motores lineares surgem como alternativa aos motores elétricos rotativos convencionais em aplicações lineares.

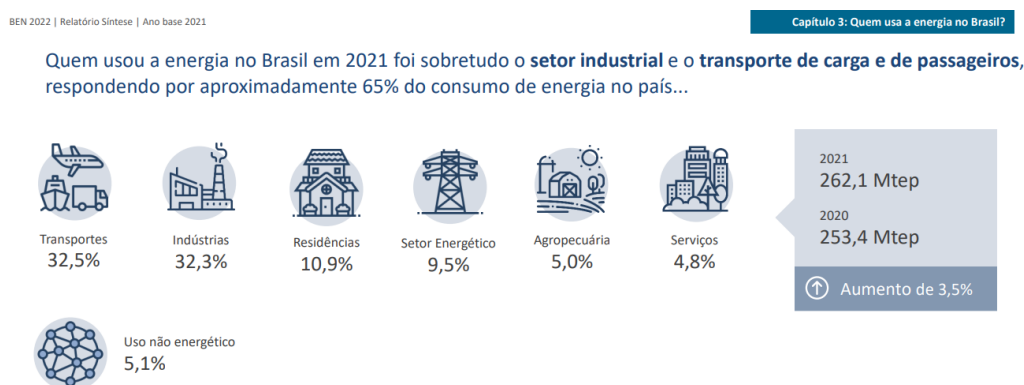
Assim como outros tipos de motores elétricos, os motores lineares têm vantagens destacáveis, como maior precisão, maior controle de aceleração e operação silenciosa e sem atrito mecânico. Essas características específicas, tornam os motores lineares ideais para aplicações modernas e avançadas, como máquinas-ferramenta, sistemas de transporte, e com espaço especial, os trens de levitação magnética (Maglev). Neste último, de acordo com Lee

(2006) e conforme demonstra JAES Company (2026), os motores lineares são tão avançados que alicerçam o funcionamento de um trem completamente sem contato com a via, propulsionando, guiando e até levitando o veículo.

Segundo Yaghoubi (2013), a levitação magnética (Maglev) é o método pelo qual um objeto é suspenso no ar sem nenhum suporte além de campos magnéticos. Os campos são usados para reverter a força gravitacional, criando um movimento sem fricção, eficiente e silenciosa. Ainda segundo Yaghoubi (2013), os sistemas de transporte têm se sobrecarregado cada vez mais rápido, evidenciando a necessidade de desenvolvimento de novos sistemas de transporte mais eficientes e confortáveis para os usuários, os trens de levitação magnética têm se mostrado uma escolha atrativa para a indústria de transporte ao redor do mundo.

A crise energética promovida pelo aumento da dependência de energia faz com que seja crucial a implantação de não somente novas tecnologias cada vez mais eficientes de geração de energia, mas também de equipamentos mais modernos, eficientes e econômicos, além de ecologicamente amigáveis. O uso de recursos fósseis é a principal intempérie no que diz respeito a manutenção do planeta Terra, o uso desse tipo de combustível projeta todos os anos na atmosfera bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂), principal gás responsável pelo efeito estufa, e que promove o aquecimento do planeta como um todo. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o setor de transportes representou quase um terço do consumo de energia no Brasil. A Figura 1 apresenta os setores com maior consumo de energia de acordo com o Balanço Energético Nacional 2022.

Figura 1: Consumo de energia por setores



Fonte: EPE (2022, p. 23)

Um dos maiores problemas mundiais com o qual atualmente defronta-se a humanidade reside na grande dificuldade que vários países encontram na produção/geração de energia elétrica em suas várias formas de obtenção, com o intuito de fornecer níveis de conforto mais elevados às suas populações. A “fome” de energia de diversas populações do mundo é uma realidade, resultante em grande parte não só da velocidade do desenvolvimento industrial, mas acima de tudo do vertiginoso crescimento populacional que o planeta terra tem assistido e que tem se apresentado no planeta, notadamente a partir da década de 1950, quando os índices de natalidade e de mortalidade da humanidade passaram a se diferenciar acentuadamente (Rippel, 2006)

Levando em consideração a inevitabilidade do crescimento populacional aliado ao (consequente) aumento no consumo de energia, e a relevante representatividade do setor de transportes no panorama de emissões dos GEE, faz-se necessário a implementação de novos meios de transporte cada vez mais eficientes.

De acordo com Kaur (2021) e Lee (2006), atualmente, trens de levitação magnética já são rotineiramente utilizados em alguns países do mundo. As locomotivas desta classe são movidas por motores lineares de alta eficiência, de forma que alguns modelos podem alcançar velocidades de até 600 quilômetros por hora. Em comparação às locomotivas convencionais, os trens de levitação magnética possuem diversas semelhanças, contudo, a velocidade, nível de ruído e de trepidação são os pontos fortes dos trens de levitação magnética (Maglev). Além disso, os trens Maglev são 100% elétricos, e não utilizam combustíveis fósseis diretamente relacionados à propulsão do trem. Apesar das vantagens citadas acima, o custo de implantação dessas tecnologias ainda é elevado.

A implantação de uma tecnologia menos custosa e mais facilmente aplicável em diferentes contextos daria alicerce para a popularização do conceito de trens Maglev, e promoveria ganhos imensuráveis em eficiência energética, além de cessar uma parcela da principal fonte de GEE no mundo.

Este trabalho tem por objetivo levantar referencial teórico sobre a aplicação de motores lineares, especialmente no contexto de trens de levitação magnética, buscando suportar o desenvolvimento de novos trabalhos referentes ao tema.

No capítulo 2 deste trabalho, será possível encontrar a revisão bibliográfica sobre o funcionamento de motores lineares e trens de levitação magnética, os capítulos 3 e 4 são dedicados a um experimento virtual de modelamento de um sistema de propulsão linear com servomotores e o capítulo 5 é dedicado a conclusão.

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados ao tema de estudo deste trabalho, desta forma, será possível, através da literatura existente, conhecer as propriedades dos motores lineares e dos trens de levitação magnética e compreender o funcionamento destes.

2.1. Motores Lineares

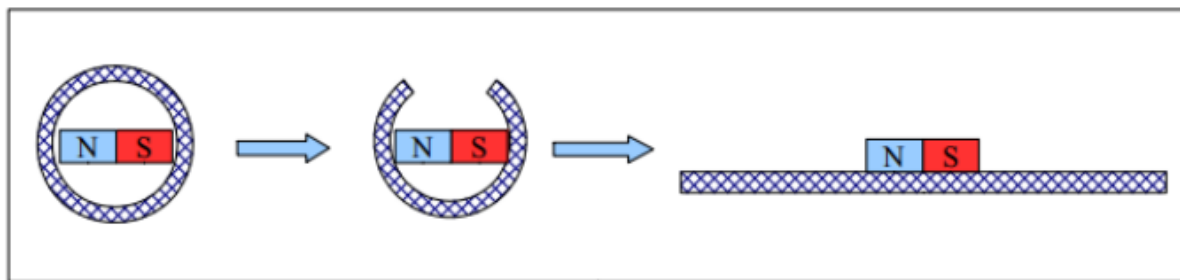
Segundo Zago (2013), motores lineares são dispositivos eletromecânicos capazes de converter energia elétrica em movimento linear. Cada máquina de indução rotacional tem sua versão linear.

Esta topologia consiste basicamente na planificação de um motor rotativo, onde o estator é desenrolado e torna-se o indutor do motor linear, parte responsável pela produção do campo magnético principal, ou seja, o indutor é a parte do motor linear onde estão alocados os enrolamentos de armadura; o rotor por sua vez, ao ser planificado se torna o linor do motor linear, que é a parte induzida do motor, onde, no caso das máquinas síncronas, estão alocados os enrolamentos de campo ou os ímãs permanentes (Paes; Sakamoto, 2016).

Este tipo de motor, conforme ilustrado na Figura 2, pode ser visto com um motor rotativo tradicional que teve o seu estator cortado radialmente e depois desenrolado. A parte móvel é normalmente conhecida como cursor ou secundário e a parte fixa, chamada de pista ou primário. (Seixas, 2014)

De acordo com Seixas (2014) e Zago (2013), a Figura 2 ilustra o motor linear como uma derivação linearizada do motor convencional.

Figura 2: Motor linear elementar a partir de um motor convencional



Fonte: Zago (2013, p. 26)

Ou seja, como os motores lineares executam o movimento de translação sem a necessidade de acoplamentos mecânicos, como os usuais motores rotativos com rosca infinita, estes apresentam melhor precisão no posicionamento, maior aceleração e controle mais simples. (Ferreira, 2003).

A conversão eletromecânica de energia nos motores lineares de indução (MLI) não demanda acoplamentos mecânicos para o movimento de translação, o que diminui o número de componentes mecânicos e reduz as manutenções (Seixas, 2014).

Devido a essas vantagens, a utilização dos motores lineares vem crescendo. Estes motores já possuem diversas aplicações industriais, tais como: portas automáticas, transporte de mercadorias, mesas XY, bombas de pistão e elevadores (Ferreira, 2003).

Os motores elétricos lineares permitem gerar movimento retilíneo sem a necessidade de engrenagens, parafusos ou eixos intermediários. No motor síncrono linear (LSM), o movimento mecânico ocorre em sincronia com o campo magnético viajante — isto é, a velocidade mecânica é igual à velocidade do campo magnético que se desloca ao longo da via — e a força de tração pode ser produzida tanto por um campo magnético viajante gerado por enrolamentos polifásicos que interagem com uma sequência de pólos (N, S, N, S) ou com um trilho ferroso de relutância variável, quanto por campos criados por enrolamentos de corrente contínua com comutação eletrônica que interagem com a mesma sequência de polos ou com trilhos de relutância variável (Gieras, 2018).

Essas variações construtivas do LSM mostram que é possível escolher a solução mais adequada conforme os requisitos de controle, força e complexidade do sistema: a versão com ondas magnéticas viajantes e enrolamentos polifásicos oferece operação síncrona clássica, enquanto a versão com excitação comutada em CC permite implementações tipo *stepping* ou relutância comutada. De modo geral, ao eliminar elementos mecânicos intermediários, os LSMs proporcionam acionamento mais direto e preciso para aplicações de movimento retilíneo (Gieras, 2018)

2.1.1. Motores lineares no mercado

Segundo Katano (1996), a concepção de motores lineares data de meados do século XIX, contemporâneo aos motores rotativos de indução.

Com o passar do tempo, diversos fabricantes tomaram conhecimento e interesse pelo desenvolvimento de sistemas de acionamentos lineares, de acordo com Wilson (2026), entre os principais fabricantes de motores lineares do mercado estão:

- Beckhoff
- Kollmorgen
- SEW
- Bosch Rexroth AG
- Yaskawa
- Mitsubishi Eletric
- Siemens

Buscando otimizar os recursos e facilitar a obtenção de informações, o experimento virtual conduzido neste trabalho utilizará como componente central o sistema de servoacionamento linear da Siemens.

A Siemens, fundada por Werner von Siemens em 1847 na Alemanha, começou sua jornada com a invenção do telégrafo de ponteiro, revolucionando a comunicação da época. Desde o início, a empresa se destacou pela inovação e pela visão de conectar o mundo através da tecnologia. Essa busca por progresso logo a levou a expandir suas fronteiras, e o Brasil não demorou a entrar em seu radar. A chegada da Siemens ao Brasil ocorreu em 1867, apenas 20 anos após sua fundação, quando a empresa instalou a primeira linha telegráfica submarina que ligava o Rio de Janeiro ao Rio Grande do Sul. Esse foi o pontapé inicial de uma longa e bem-sucedida trajetória no país, contribuindo significativamente para o desenvolvimento da infraestrutura e da indústria brasileira ao longo de mais de um século e meio. (Siemens Brasil, 2026)

Com o passar dos anos e a evolução industrial, a Siemens expandiu sua atuação para diversas áreas, incluindo o setor de automação industrial. Nesse contexto, a empresa se tornou uma força motriz na digitalização da produção, introduzindo tecnologias que transformaram a manufatura. Um dos pilares dessa transformação é o desenvolvimento e a aplicação de motores elétricos dos mais variados tipos, incluindo os lineares, que oferecem soluções de alta precisão e dinamismo para máquinas-ferramenta e outros sistemas de automação. Esses motores, que convertem energia elétrica diretamente em movimento linear sem a necessidade de

componentes mecânicos intermediários, garantem maior velocidade, aceleração e exatidão, elevando a performance e a eficiência da produção industrial.

A Siemens mantém o portfólio de motores lineares na linha SIMOTICS L-1FN3. Os motores da família de produtos 1FN3 são motores lineares síncronos excitados por imã permanente com conceito de refrigeração modular. Em função dos requisitos de exatidão, o motor pode ser operado opcionalmente com um refrigerador de precisão para a secção primária e/ou com uma refrigeração da secção secundária. Os motores mantêm-se, assim, neutros do ponto de vista térmico em relação à máquina. O motor é fornecido em componentes (no mínimo secção primária e secções secundárias) e montado diretamente na máquina. Mediante a colocação alinhada de secções primárias e secundárias, é possível alcançar quaisquer forças do motor e percursos de deslocação retilíneos de durações diferentes.

2.1.2 Características dos motores lineares

Segundo o manual de configurações do SIMOTICS 1FN3 (2012), cabe destacar, que a Siemens divide as aplicações de motores lineares em duas variantes:

- **Motores de carga de pico**

Exemplos de aplicação:

- máquinas-ferramentas altamente dinâmicas e flexíveis
- processamento com laser
- manuseamento

- **Motores de carga contínua**

Exemplos de aplicação:

- movimentos oscilantes (p. ex. processamento irregular)
- aplicações com elevadas forças do processo (p. ex. lixar, rodar...)
- eixos verticais sem contrapeso, mangas do contraponto
- manuseamento, robôs cartesianos

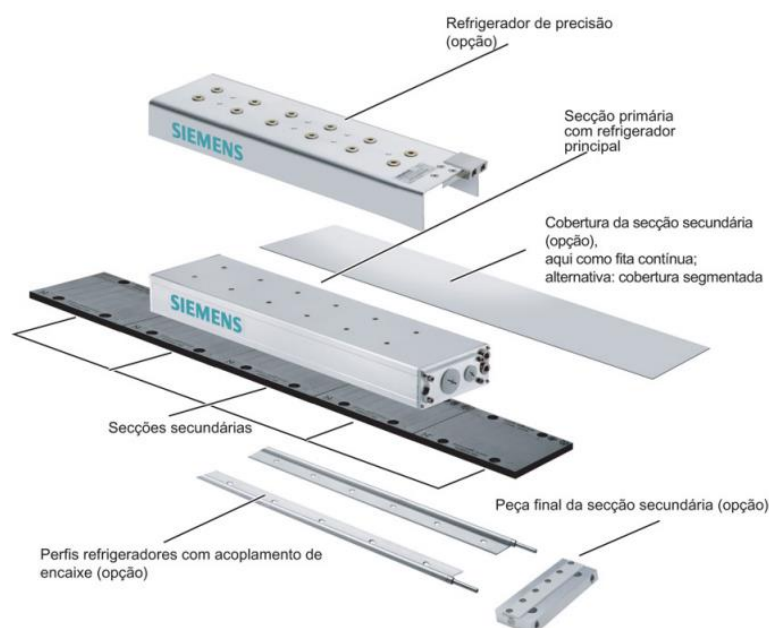
Os motores da família de produtos 1FN3 são compostos pelos componentes descritos na Tabela 1 e ilustrados na Figura 3:

Tabela 1: Características dos componentes dos motores da linha 1FN3

Componente	Características
Seção primária	● componente básico do motor linear ● com enrolamento de corrente trifásica ● refrigerador principal integrado para descarga das perdas térmicas
Refrigerador de precisão (opcional):	● refrigerador adicional para minimizar a transferência de calor para a máquina segundo o princípio Thermo-Sandwich® ● recomendado para aplicações com elevados requisitos de exatidão ● quando colocadas de forma alinhada formam a peça de reação do motor
Seções secundárias	● são formadas por corpos básicos em aço com ímãs permanentes montados ● uma massa de proteção protege totalmente contra a corrosão e influências externas ● proteção mecânica para seções secundárias ● chapa em aço inoxidável magnetizável (espessura $d = 0,4 \text{ mm}$)
Cobertura da seção secundária (opcional)	● adere às seções secundárias ● quando estiver desgastada pode ser substituída sem meios auxiliares ● disponível como material de fita contínuo ou como cobertura segmentada com comprimentos definidos
Perfis refrigeradores com acoplamento de encaixe/bocal (opcional):	● parte integrante da refrigeração da seção secundária ● calhas perfiladas em alumínio com canais de refrigeração contínuos ● são colocadas por baixo das seções secundárias quando existem elevadas exigências relativas à exatidão da máquina
Peças finais da seção secundária (opcional)	● parte integrante da refrigeração da seção secundária ● utilizadas para fixar a cobertura contínua da seção secundária disponível em diferentes variantes

Fonte: Manual de configuração do SIMOTICS 1FN3 (2012, p. 24 - 25).

Figura 3: Componentes de um motor linear da família de produtos 1FN3



Fonte: Manual de configuração do SIMOTICS 1FN3 (2012, p. 25).

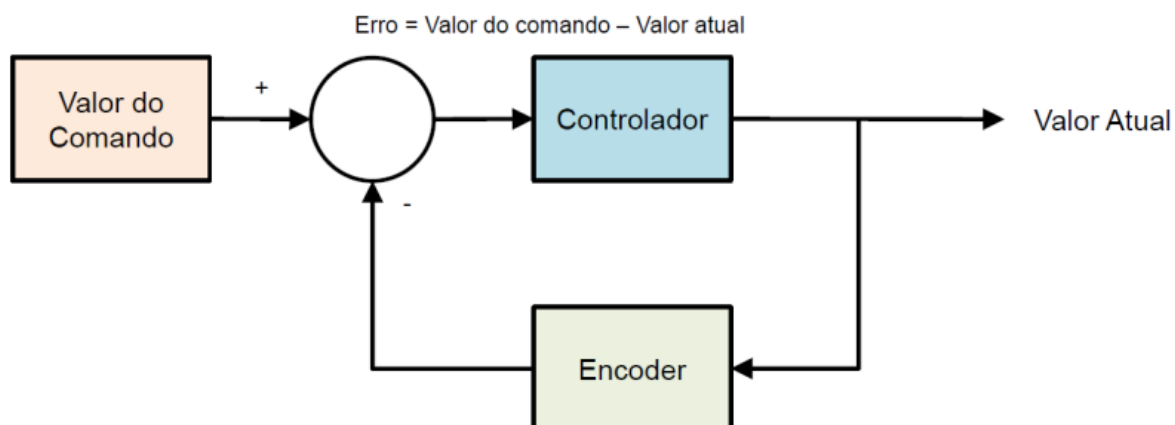
Por não serem motores trifásicos convencionais, a alimentação dos servomotores lineares é realizada através de sistemas de servo *drives*. Segundo Mota *et al.* (2024) os servoacionamentos tem grande aplicabilidade nos mais variados setores da indústria, e tem como principal função responder a comandos de posicionamento, velocidade e torque, com rapidez e precisão, para isso, utilizam de um sistema retroalimentado com *encoder*, este sistema é responsável por interpretar os sinais de controle através do conversor e comparar com o sinal de retorno ou *feedback* recebidos através do *encoder* do servomotor. Ainda segundo Mota *et al.* (2024) a estrutura de um servoacionamento é dado pelo controlador, servo conversor e servo motor, conforme pode ser observado na Figura 4. Ou seja, um servo motor sem um servo conversor não poderá exercer seu papel satisfatoriamente.

O servo *drive* ou servo conversor tem função semelhante à do inversor de frequência que controla motores de indução trifásico, porém nesse caso controla os sinais de tensão, corrente e frequência que são enviados ao servo motor. É ele o responsável pelo controle de velocidade, torque e posição de servo motores, sua característica central é o alto desempenho e alta precisão de controle do movimento do atuador devido à operação em malha fechada, feita através da realimentação de posição dada pelo sensor acoplada ao eixo (Castro, 2016).

Este tipo de motor reúne atributos que o faz fundamental para aplicações que exigem acurácia e controle robusto de posicionamento, ideal em robótica industrial, máquinas de embalagem e de envase e dispositivos em geral que necessitam de controle de posição do eixo.

A Figura 4, demonstra um circuito simplificado de servo conversor. Já a Figura 5 ilustra um modelo de servo conversor do mercado.

Figura 4: Exemplo simplificado de malha de controle de um servo conversor (*drive*)



Fonte: Mota *et al.* (2024, p. 8)

:

Figura 5: Servo conversor SINAMICS S120.



Fonte: Siemens AG (2024, p. 7.1/3)

2.1.3. Aplicações da tecnologia

Segundo Paes e Sakamoto (2016) os motores rotacionais quando agregados a mecanismos que linearizem o movimento são suficientes para cumprir grande parte das aplicações, no entanto, quando a aplicação requer condições específicas, como posicionamento

preciso ou maior aceleração linear, o rendimento é maior nos motores lineares, já que os mecanismos estarão sujeitos a folgas e desgastes.

2.1.3.1. Máquinas CNC

Uma das aplicações de motores lineares é em eixos de máquinas-ferramenta, também conhecidas como máquinas CNC. As máquinas CNC operam de forma automatizada e realizam processos de fabricação mecânica (usinagem, por exemplo), através de uma programação comumente conhecida como “Linguagem G” ou “Código G”. Dentre as máquinas mais utilizadas deste tipo, destacam-se o torno mecânico, centros de usinagem e retíficas. A Figura 6 demonstra um torno CNC da fabricante nacional ROMI S.A..

Figura 6: Torno CNC Centur 300



Fonte: Romi S.A. (2026)

Para alcançar todas as possíveis posições em um espaço tridimensional, essas máquinas podem utilizar eixos (servomotores convencionais) acoplados em cremalheiras ou fusos de esferas, a precisão para este tipo de aplicação é primordial, superando a barreira dos microns (um milionésimo de metro), fazendo com que a mecânica convencional nestas máquinas tenha de ser extremamente e continuamente ajustada. Uma solução definitiva, é a aplicação de motores lineares nos eixos da máquina, como exemplo, a Figura 7 ilustra um motor linear da fabricante Siemens, de modelo SIMOTICS L-1FN3.

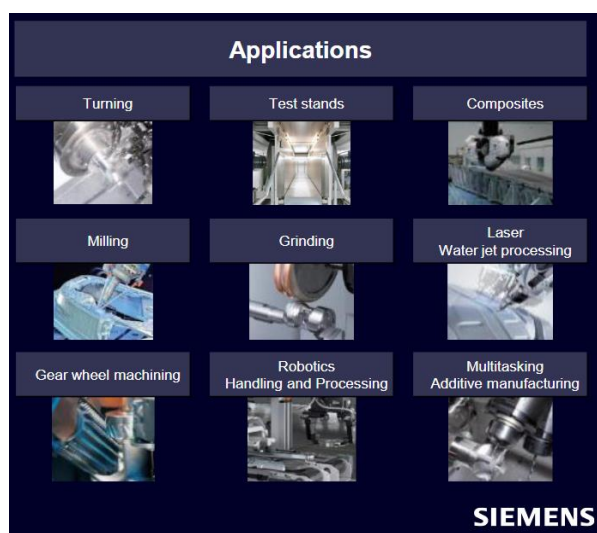
Figura 7: Motor linear SIMOTICS L-1FN3



Fonte: Siemens AG (2024, p. 8.3/1)

Segundo a Siemens, os motores lineares ainda podem ser utilizados em outros tipos de máquinas, a Figura 8 ilustra as aplicações em máquinas de retifica, materiais compósitos, máquinas a laser, entre outras:

Figura 8: Aplicações convencionais de motores lineares SIMOTICS L-1FN3



Fonte: Siemens AG (2024, p.8.3/14)

2.1.3.2. Transporte industrial

A aplicação de motores lineares é focada em segmentos de alto valor agregado, como o farmacêutico, eletrônico e químico. A Beckhoff (Beckhoff Automation GmbH & Co, 2021) destaca em seu site diversas aplicações dos seus conjuntos de motores planares. Conceitualmente parecidos com os lineares, os motores planares, ilustrados na Figura 9, também são utilizados em mercado de alto valor agregado, e são comumente aplicados com funções semelhantes a um AGV (*Autonomous guided Vehicle*).

Figura 9: Ilustração da solução de motores planares XPlanar da Beckhoff



Fonte: Beckhoff Automation GmbH & Co (2021)

O *XPlanar* (nome dado pela Beckhoff ao seu conceito de motor planar) é um sistema de transporte inteligente que usa levitação magnética para mover produtos sobre uma superfície plana, sem contato físico. Ele combina a flexibilidade dos sistemas autônomos com a precisão de um motor linear. Por ser sem contato, o sistema permite transportar peças individualmente para qualquer ponto, por rotas livres — tanto dentro de uma máquina quanto entre máquinas diferentes. Isso facilita o fluxo de produção e reduz a necessidade de equipamentos auxiliares para posicionamento. Tecnicamente, o sistema é formado por *tiles* (placas com bobinas estacionárias, representando o estator) e *movers* (módulos com ímãs permanentes, representando o rotor). As bobinas geram campos magnéticos que fazem os *movers* flutuarem e se moverem em duas dimensões sobre a superfície, sem atrito mecânico. Como não há desgaste por atrito, evita-se a dispersão de poeira ou sujeira, além disso o *XPlanar* pode posicionar peças com precisão micrométrica, oferecendo até seis graus de liberdade, inclusive rotação de 360°. Em operação, o sistema transporta produtos simultaneamente em trilhos de layout livre, com velocidades de até 2 m/s. Quando uma carga é maior que a capacidade de um *mover*, vários módulos ainda podem atuar juntos (Figura 10) para posicionar o item mantendo alta precisão. (Beckhoff Automation GmbH & Co, 2021)

Figura 10: Motor XPlanar da Beckhoff dividindo carga entre dois módulos



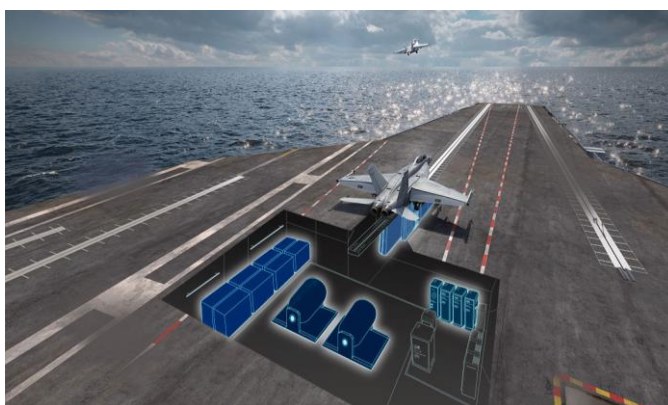
Fonte: Beckhoff (2021)

2.1.3.3. *Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS)*

O EMALS (*Electromagnetic Aircraft Launch System*) e o AAG (*Advanced Arresting Gear*) são sistemas modernos para lançar e recuperar aeronaves em porta-aviões. Implantados em embarcações de última geração, ambos aumentam a eficiência operacional e a prontidão da aviação naval. O EMALS usa tecnologia eletromagnética no lugar de catapultas convencionais, permitindo lançamentos mais controlados, compatibilidade com diferentes plataformas e faixas de peso, além de reduzir pessoal, custos de ciclo de vida, assinatura térmica e peso no convés. O AAG é um sistema turboelétrico para desaceleração confiável, com maior disponibilidade, melhores margens de segurança, menos manutenção e recursos de autodiagnóstico. Combinados, EMALS e AAG elevam as taxas de operação, ampliam a flexibilidade das operações embarcadas e reduzem custos de sustentação, contribuindo diretamente para a capacidade tática e a segurança do porta-aviões (*General Atomics*, 2026).

A Figura 11 ilustra o sistema de catapultas lineares nos porta-aviões.

Figura 11: Aircraft Launch and Recovery Systems



Fonte: General Atomics (2026)

Além das aplicações supracitadas, o funcionamento do próprio motor linear, remete a operação de um trem sobre um trilho, e esta é, de fato, uma das principais aplicações de motores lineares: em trens de alta velocidade, especialmente os levitados magneticamente.

2.2 Trens de Alta Velocidade (TAV)

O início do transporte ferroviário data de 1804, na Inglaterra, quando o primeiro trem percorreu um trecho de 15 km a uma velocidade de 4 km/h, movido a vapor. A partir de então, houve uma evolução constante nesse meio de transporte, conforme afirma Junqueira “em menos de meio século, por volta de 1849, trens europeus já desenvolviam velocidades de 120 km/h. Quarenta anos mais tarde, uma locomotiva americana atingia a velocidade de 160 km/h”. Acompanhando os avanços tecnológicos, o sistema ferroviário de transporte foi se renovando e se espalhando pelo mundo, passando do vapor à eletricidade e chegando ao sistema de levitação magnética (Maglev), que pode alcançar a velocidade máxima de 500 km/h (Borges, 2010).

O conceito de Trem de Alta Velocidade ou Trilho de Alta Velocidade varia conforme os critérios utilizados pelas organizações operadoras do sistema ferroviário de transporte de cada região, podendo inclusive ter mais de uma definição em determinados locais. De modo geral, pode-se defini-lo genericamente como um meio de transporte ferroviário que opera com velocidades maiores que os sistemas convencionais (Gaspar *et al.*, 2012).

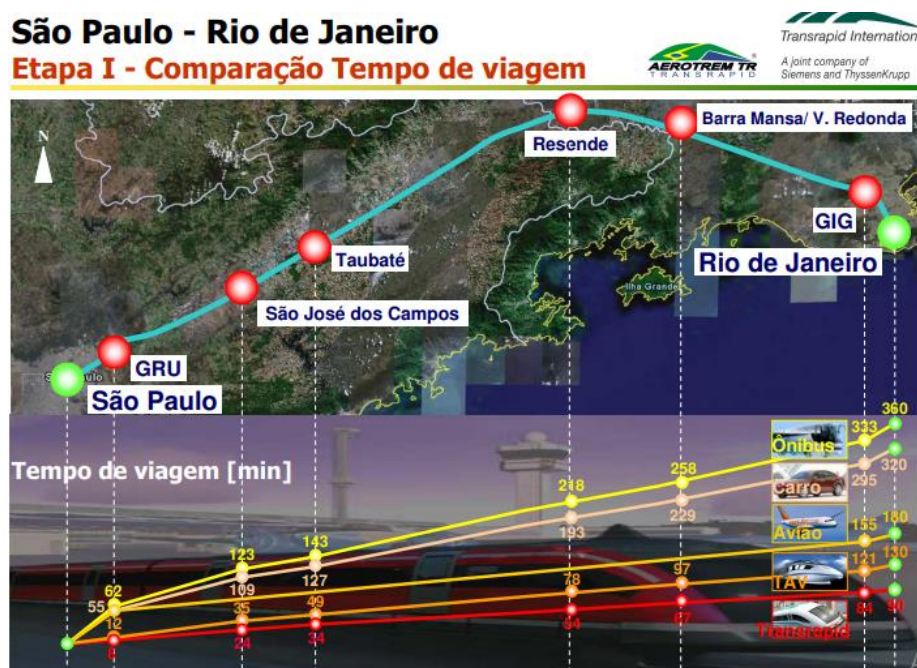
Os trens de velocidades superiores a 250 km/h são considerados de alta velocidade. Assim como as primeiras ferrovias, eles modificam as relações entre tempo e espaço. Cidades afastadas tornam-se bairros da capital, e grandes transformações acontecem no uso e no valor do solo nas áreas beneficiadas pela nova tecnologia. (Lacerda, 2008)

O primeiro TAV foi inaugurado em 1958, no Japão, e sua entrada em operação comercial foi feita em 1964, na linha Tokaido-Shinkansen, ligando a cidade de Tóquio a Osaka. Com 515 km de extensão, o trem iniciou sua operação comercial em 1964, tendo uma velocidade média de 170 km/h (chegando até ao máximo de 210 km/h), no tempo de cento e noventa minutos. (Borges, 2010)

Segundo Gaspar *et al.* (2012) a alta velocidade dos TAVs é o resultado da combinação de diversos fatores, como a infraestrutura, o trem e as condições de operação.

A Figura 12, apresenta um material publicitário de um TAV com tecnologia Maglev no Brasil, e compara o tempo de viagem com outros modais de transporte, é interessante ressaltar que o trem de alta velocidade e especialmente o Maglev, supera inclusive o modal aéreo na ligação entre as cidades de Rio de Janeiro e São Paulo.

Figura 12: Material publicitário de um TAV com tecnologia Maglev no Brasil



Fonte: Transrapid International (2007, p. 2)

A geração da alta velocidade sobre trilhos pode ser obtida através da capacitação das vias e do veículo. Assim, tecnicamente, o TAV pode ser dividido em três tipos de tecnologias, dois pelo sistema roda-trilho e um pelo sistema de levitação magnética. Pelo sistema roda-trilho, a alta velocidade é obtida pela adaptação de um sistema tradicional para uma tecnologia de alta velocidade. Ou pela construção de uma nova ferrovia já nos padrões de alta velocidade. O outro modo de se ter alta velocidade sobre trilhos é pelo trem de levitação magnética, ou Maglev, que exige que via e veículo sejam construídos exclusivamente para isso (Borges, 2010).

2.3. Trens de Levitação Magnética

A levitação magnética (Maglev) possibilita transporte terrestre em altíssima velocidade por meio de um sistema de propulsão sem adesão, que elimina a dependência das forças de atrito entre via e vagões. Ao combinar suspensão magnética sem contatos mecânicos e tecnologia de motores lineares, os trens Maglev viabilizam velocidades muito elevadas com maior segurança, confiabilidade, menor impacto ambiental e manutenção reduzida. Duas tecnologias principais surgiram na década de 1970: a levitação eletromagnética (EML), que explora forças atrativas de eletroímãs com controle do entreferro, e a levitação eletrodinâmica (EDL), que usa forças repulsivas associadas à supercondutividade (Gieras, 2018).

Atualmente, potências econômicas almejam velocidades mínimas de 400 km/h para o transporte terrestre, e estudos realizados na Alemanha e no Japão indicam que veículos suspensos magneticamente e acionados por motores lineares são a solução mais adequada para os desafios do transporte moderno. Trens Maglev podem atingir até cerca de 550 km/h consumindo menos energia que aeronaves e veículos rodoviários; embora trens com rodas sobre trilhos também possam superar 500 km/h (por exemplo, o recorde do TGV Atlantique, 574,8 km/h em 2007), esses sistemas não são livres de contatos mecânicos e geram níveis acústicos muito maiores (Gieras, 2018).

Segundo Lee (2006) os trens de levitação magnética possuem uma série de vantagens e desvantagens em comparação às locomotivas convencionais. Conforme a Tabela 2:

Tabela 2: Vantagens e desvantagens da tecnologia Maglev

Vantagens	Desvantagens
Redução da manutenção proveniente do desgaste dos equipamentos de tração	Quanto maior o peso, maior a potência necessária para a locomoção
Melhor distribuição de peso	Difícil processo de manobra/troca de trilhos
Mais resistente ao descarrilamento	Sistema único de tração e frenagem
Redução de ruído e vibração	Exposição a campos magnéticos nos ambientes internos dos vagões
Melhor aceleração e frenagem	Dependência de eletricidade

Fonte: Lee (2006, p. 1917 - 1918)

2.3.1. Características Construtivas dos Trens Maglev

Lee (2006) divide as características construtivas dos trens Maglev em quatro grandes grupos: Levitação, propulsão, orientação e energia. Os quais serão apresentados a seguir.

2.3.1.1. Levitação

Levitação é o estado de um corpo que permanece no espaço a uma certa distância de uma superfície, sem que nada visível o sustenha ou suspenda, graças a uma força de sustentação que compensa a força da gravidade. (Pudenzi, 2001)

A repulsão entre campos magnéticos de mesma polaridade pode ser facilmente constatada pela aproximação de dois ímãs permanentes, com polos iguais, adequadamente orientados na direção um do outro. Deste modo, aproximando-se os dois ímãs, é fácil perceber que há uma força repulsiva agindo entre eles, procurando mantê-los afastados. Além de ímãs permanentes, foi descoberto em 1820 pelo físico dinamarquês Hans Christian Oersted que correntes elétricas também são capazes de produzir campos magnéticos. Assim, utilizando-se a Lei de Ampère nas situações em que há simetria ou a Lei de Biot-Savart em situações mais gerais, é possível calcular-se o campo magnético produzido por uma corrente elétrica que circula por um condutor, podendo este condutor ser um fio retilíneo, uma bobina ou mesmo apresentar uma outra configuração. (De Araújo, 2002)

Segundo Lee (2006) os trens de levitação magnética podem ser suspensos através de três metodologias: Suspensão eletromagnética, suspensão eletrodinâmica e suspensão híbrida, sendo a última uma mistura entre as duas anteriores.

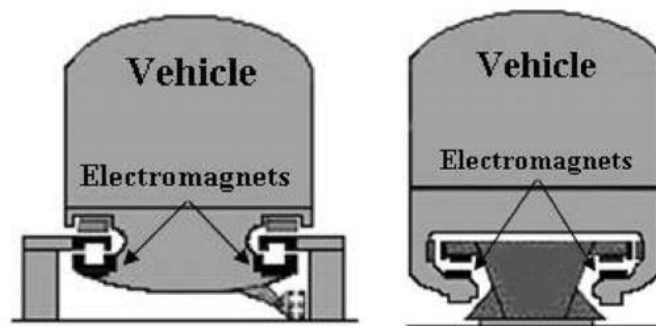
- **Suspensão Eletromagnética**

Este tipo de levitação tem na proposta alemã de trem de levitação, Transrapid (<http://www.transrapid.de>), que está atualmente implementado na China numa conexão de 30km entre Pudong Shanghai International Airport e Shanghai Lujiazui, um distrito financeiro, e na proposta japonesa HSST (<http://www.meitetsu.co.jp/chsst>) grandes exemplos de sucesso. A Suíça também, no seu projeto Swissmetro, emprega esta tecnologia (<http://www.swissmetro.com>). O fundamento físico básico, nesta aplicação, explora a força de atração que existe entre um ímã ou eletroímã e um material ferromagnético. A estabilização,

neste caso, só é possível com uma malha de realimentação e regulador devidamente sintonizado (Gomes, 2004).

Consiste na instalação de ímãs ou eletroímãs na parte inferior do veículo ou trem, estes, são responsáveis por gerar uma situação de atração entre o trem e o trilho. Neste tipo de suspensão, pode ser anexado um outro conjunto de ímãs para que seja feita a orientação do trem. A Figura 13 ilustra o posicionamento dos eletroímãs (ou ímãs permanentes) nos trens e trilhos.

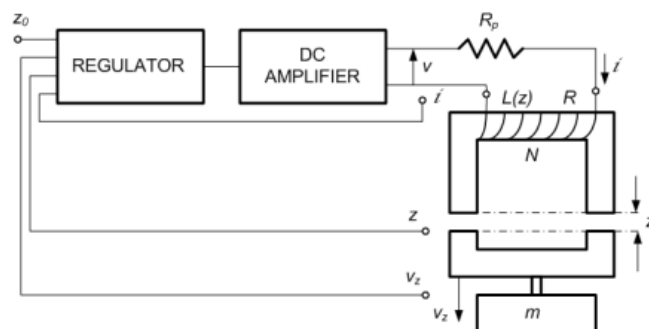
Figura 13: Ilustração de trem com suspensão eletromagnética



Fonte: Lee (2006, p. 1918)

Neste modelo, quando usando eletroímãs, deve-se manter o controle da distância do entreferro, aqui representado pela distância do vagão ao trem, através do controle da corrente elétrica no enrolamento, o controle é impossível no caso da utilização de ímãs permanentes. Na Figura 14, pode-se encontrar a malha de controle do enrolamento no trem e no trilho.

Figura 14: Sistema de levitação Eletromagnética onde: z_0 — Input de distância do entreferro, Z — Entreferro atual, V_z — Velocidade do eletroímã no eixo Z , m — massa suspensa



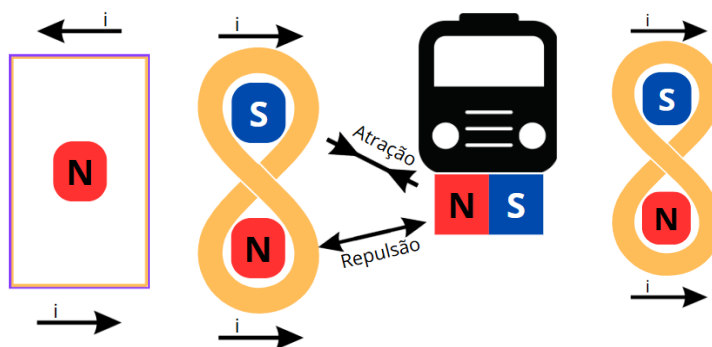
Fonte: Gieras (2018, p. 324)

- Suspensão Eletrodinâmica

Conforme a Figura 15, pode-se contemplar o funcionamento da suspensão eletrodinâmica, que funciona com a repulsão dos campos magnéticos originados nos ímãs ou eletroímãs posicionados no trem e do campo magnético dos enrolamentos presentes na via de circulação do trem. Observe que neste caso, é necessário existir movimento, para que a variação do campo magnético no trem produza uma corrente induzida nos enrolamentos do trilho.

Se um material magnético realizar um movimento relativo a uma lâmina condutora (alumínio, por exemplo), correntes parasitas serão induzidas no condutor. Estas correntes, por sua vez, gerarão um outro campo magnético o qual, pela lei de Lenz, opor-se-á ao campo criado pelo material magnético. A interação entre ambos gerará uma pressão magnética e, por conseguinte, uma força repulsiva no material magnético. Esta força é a responsável pela levitação do corpo (Gomes, 2004).

Figura 15: Ilustração de trem com suspensão eletromagnética



Fonte: Elaboração própria (2026)

Nos sistemas de levitação eletrodinâmica (EDL), a suspensão é obtida pelas forças repulsivas entre um eletroímã supercondutor montado no chassi do veículo e elementos condutores fixos ao trilho — tipicamente placas de alumínio ou bobinas em curto. Esses componentes reagem com o campo do eletroímã, gerando a força de elevação necessária ao deslocamento do veículo (Gieras, 2018).

A principal diferença em relação aos sistemas EML é o entreferro muito maior (da ordem de 100 a 300 mm), o que confere às composições EDL a capacidade de operar em condições climáticas severas, como fortes nevascas, formação de gelo e geada, sem perda significativa de desempenho devido ao aumento do espaço entre veículo e via (Gieras, 2018).

2.3.1.2. Orientação

Segundo Lee (2006) Os trens Maglev são sistemas sem contato que, além de levitar, precisam de um mecanismo confiável para evitar deslocamentos laterais e manter o veículo centrado sobre a via. Essa orientação lateral é feita por forças magnéticas, que podem atuar tanto por repulsão quanto por atração, e cada abordagem traz implicações diferentes para projeto, controle e velocidade operacional. A Figura 16 retrata o modelo de Maglev da Transrapid, operando em Shangai.

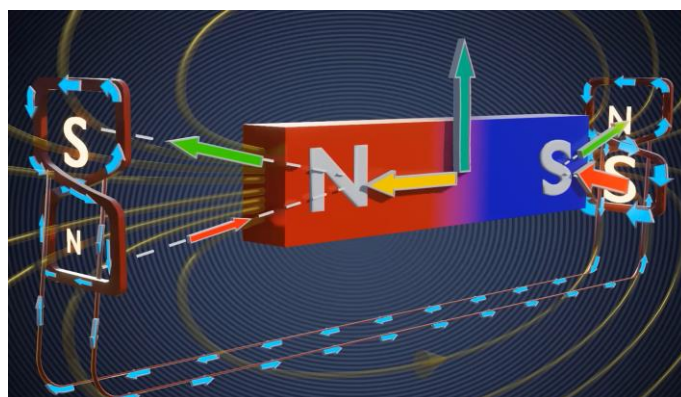
Figura 16: Maglev Transrapid Shangai



Fonte: Siemens AG (2017)

No caso da orientação por força repulsiva, o princípio básico é gerar uma força repulsiva quando o trem se aproxima de uma das paredes laterais. Em muitas configurações, bobinas de propulsão ou levitação são colocadas nas laterais da via e curto-circuitadas de forma que, quando o trem está perfeitamente centralizado, as forças induzidas se cancelam. Se o trem se desloca para um lado, a diferença de distância entre as bobinas nas laterais dos trilhos cria uma força eletromotriz desequilibrada, induzindo correntes que produzem uma força que empurra o veículo de volta ao centro. A Figura 17 ilustra a orientação através da repulsão no projeto japonês MLX (Yamanashi Maglev)

Figura 17: Modelo de orientação do MLX produzindo forças de orientação e levitação no trem



Fonte: JAES Company (2021)

De acordo com Lee (2006) A orientação por força de atração funciona por um mecanismo diferente: quando o veículo se desloca lateralmente, a relutância do caminho magnético muda de modo que a energia tende a “correr” para a região de menor relutância, gerando uma força de atração que puxa o trem para a posição central. Esse método integra orientação e levitação no mesmo efeito magnético, o que simplifica alguns aspectos do projeto, mas também faz com que os dois fenômenos interfiram entre si. Por causa dessa interferência, a orientação por atração é mais adequada para operações de baixa a média velocidade.

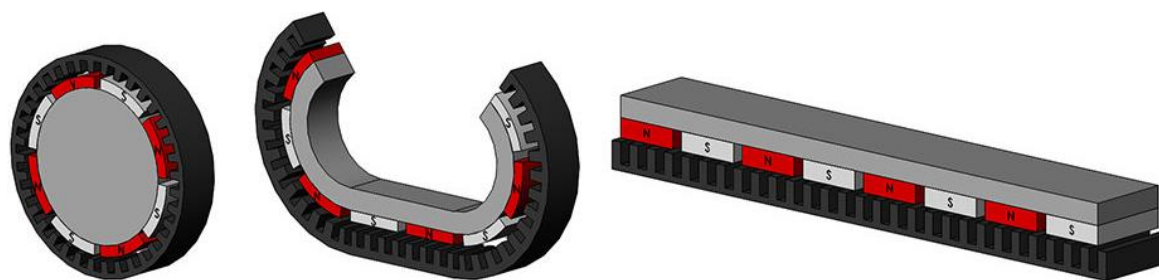
Em termos práticos, a orientação por repulsão costuma oferecer melhor desempenho dinâmico e é mais compatível com altas velocidades, porém exige controles ativos e um projeto mais sofisticado; a orientação por atração é mais simples e robusta para baixas e médias velocidades, mas limita o desempenho quando se tenta combinar orientação e levitação em regimes de alta velocidade.

2.3.1.3. Propulsão

Zago (2013), em seu trabalho, retrata os motores lineares como uma versão linearizada (ou planificada) dos motores convencionais.

No caso dos trens Maglev, em vez de usar um acoplamento mecânico para gerar movimento retilíneo, o motor linear coloca estator e rotor esticados ao longo da via, mantendo o princípio eletromagnético do motor rotativo. Essa configuração torna a estrutura mais simples e robusta em termos mecânicos e reduz vibrações e ruído gerados por elementos de transmissão como caixas de câmbio e correntes. A Figura 18 ilustra a linearização de um motor convencional.

Figura 18: Esquema de motor linear

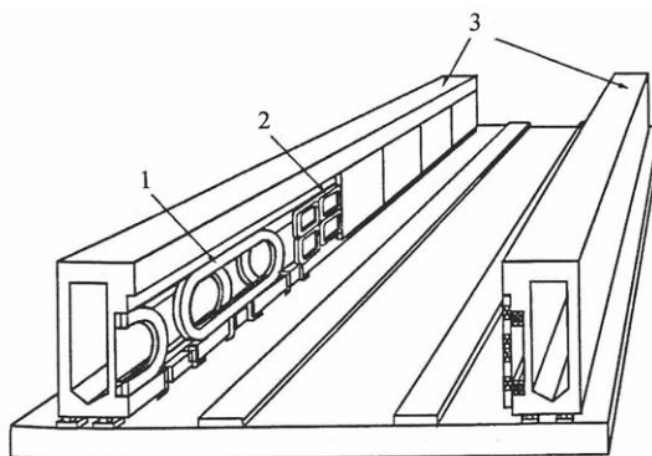


Fonte: H2W Technologies (2016)

Segundo Lee (2006) Existem dois tipos principais de motores lineares utilizados nas aplicações Maglev: o motor de indução linear (LIM) e o motor síncrono linear (LSM). No LIM, o princípio é semelhante ao do motor de indução: campos magnéticos variáveis gerados pela parte primária induzem força eletromotriz na parte secundária (normalmente uma chapa condutora), formando correntes de Foucault que interagem com o fluxo magnético e produzem a força de tração (força de Lorentz). O LIM vem em duas configurações práticas: primário curto (SP), com as bobinas a bordo do veículo e chapas condutoras na via; e primário longo (LP), com as bobinas instaladas na via e as chapas no veículo. O tipo LP tem custo de construção maior e é preferido em altas velocidades, enquanto o tipo SP é mais barato para implantação, sendo usado em sistemas de baixa e média velocidade. Já o LSM diferencia-se por possuir uma fonte magnética própria (ímãs ou enrolamentos excitados) que interage diretamente com as correntes do estator para gerar tração; a velocidade é controlada pela frequência do sistema de controle. Assim como no LIM, existem versões LP e SP, e ainda variações quanto ao tipo de campo magnético: soluções com eletroímãs com núcleo de ferro (por exemplo, o Transrapid) e soluções com ímãs supercondutores e núcleo de ar (por exemplo, o MLX japonês). Para operações em alta velocidade, o LSM costuma ser preferido por oferecer maior eficiência e melhor fator de potência, o que é determinante para a viabilidade econômica do consumo de energia em rotas rápidas.

A Figura 19 apresenta um modelo de LSM com primário longo, aplicado no MLX.

Figura 19: Trilho lateral da linha de teste Maglev de Yamanashi onde: 1 - enrolamento da armadura (propulsão), 2 - bobina de levitação e orientação, 3 - vigas duplas.



Fonte: Gieras (2018, p. 94)

2.3.1.4. Energia

Segundo Gieras (2018), mesmo com baterias a bordo, os trens Maglev dependem de alimentação elétrica vinda do solo para levitação, propulsão, equipamentos a bordo e recarga das baterias. Em operações de baixa e média velocidade (até ~100 km/h) costuma-se usar contato mecânico, como o pantógrafo que é comumente utilizado em ônibus eletrificados em frotas urbanas. Esse arranjo é prático, mas sofre com perdas por arrasto, efeitos de extremidade e limitações de velocidade devido ao uso desses mecanismos

De acordo com Lee (2006) para altas velocidades o contato mecânico se torna inviável, então recorre-se a soluções sem contato, como geradores lineares integrados ao sistema de levitação.

Na prática, é semelhante aos carregadores por indução, que utilizamos cotidianamente em celulares. De acordo com Gieras (2018) o Transrapid aproveita o campo eletromagnético da via para induzir tensão nas bobinas a bordo; no MLX foram estudadas duas abordagens — tipo concentração (bobinas supercondutoras concentradas na frente/ traseira) e tipo distribuição (bobinas espalhadas ao longo do veículo) — em que o fluxo contínuo das bobinas supercondutoras é convertido em fluxo AC via um transformador linear. Essas soluções eliminam coletores e são ideais para alta velocidade, mas trazem desafios práticos, como flutuações de tensão por irregularidades do entreferro, baixa magnitude da tensão induzida em bobinas pequenas e maior complexidade de projeto e controle energético.

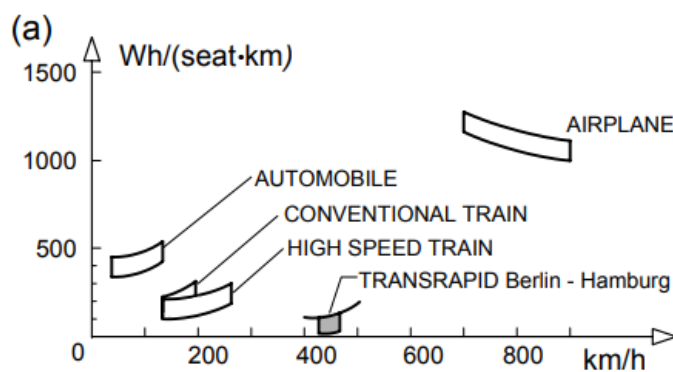
2.3.2. Maglevs pelo mundo

Existem diversas aplicações das tecnologias Maglev em trens ao redor do mundo

2.3.2.1. Transrapid (Alemanha)

Pesquisas em engenharia de transportes realizadas na Alemanha nas décadas de 1960 e início de 1970 concentraram-se no consumo de energia, custos, segurança e impacto ambiental de trens, automóveis, aeronaves e veículos Maglev. A Figura 20 apresenta o consumo de energia por passageiro por 1 km em função da velocidade para trens, automóveis, aeronaves e trens de levitação magnética. Embora a velocidade dos trens de levitação magnética seja inferior à das aeronaves, seu consumo energético é muito menor. Além disso, trens Maglev podem acessar centros urbanos, evitando o deslocamento até aeroportos e economizando tempo de viagem.

Figura 20: Gasto de energia elétrica por ocupante e km de alguns modais de transporte



Fonte: Gieras (2018, p. 327)

Outras vantagens incluem baixo nível de ruído, elevada segurança de operação, alto conforto, manutenção facilitada, menor ocupação de solo, adaptabilidade ao terreno graças à grande capacidade de aclive (até 10%) e a pequenos raios de curvatura (2,25 km a 300 km/h), além de não provocarem poluição ao meio ambiente.

O sistema Maglev Transrapid (Figuras 21 e 22) utiliza forças de atração produzidas por eletroímãs em forma de U (sistema de levitação EML) com controle de corrente e motores lineares síncronos trifásicos de armadura longa (LSMs). Os eletroímãs de levitação, fixados ao

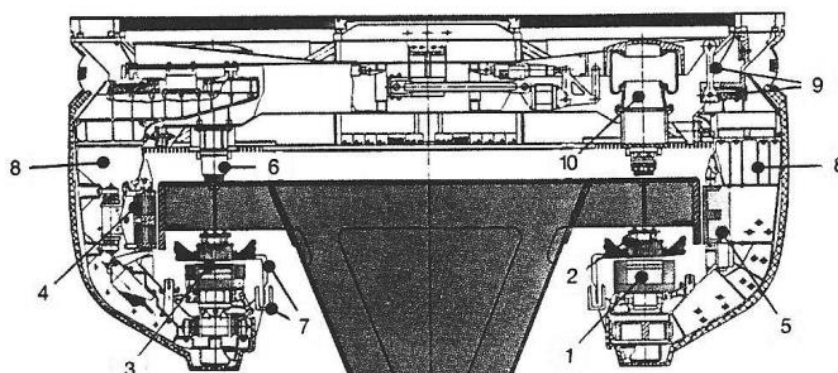
veículo, também funcionam como eletroímãs de excitação dos LSMs. Outro conjunto de eletroímãs embarcados, os chamados eletroímãs de guiagem, fornece estabilização lateral. Não são utilizadas bobinas supercondutoras. Os eletroímãs de sustentação e orientação, assim como o sistema elétrico do veículo, são alimentados por geradores lineares sem contato (Gieras, 2018).

Figura 21: Maglev Transrapid



Fonte: Gieras (2018, p. 328)

Figura 22: Seção transversal do Maglev Transrapid onde: 1 — eletroímã de sustentação; 2 — conjunto de armadura do LSM com enrolamentos; 3 — enrolamentos do gerador linear; 4 — eletroímã de orientação; 5 — eletroímã do freio por correntes de Foucault; 6 — sapatas de apoio; 7 — sensor Inkrefa (localização do veículo); 8 — bogie de levitação; 9 — suspensão da cabine; 10 — mola pneumática.



Fonte: Gieras (2018, p. 329)

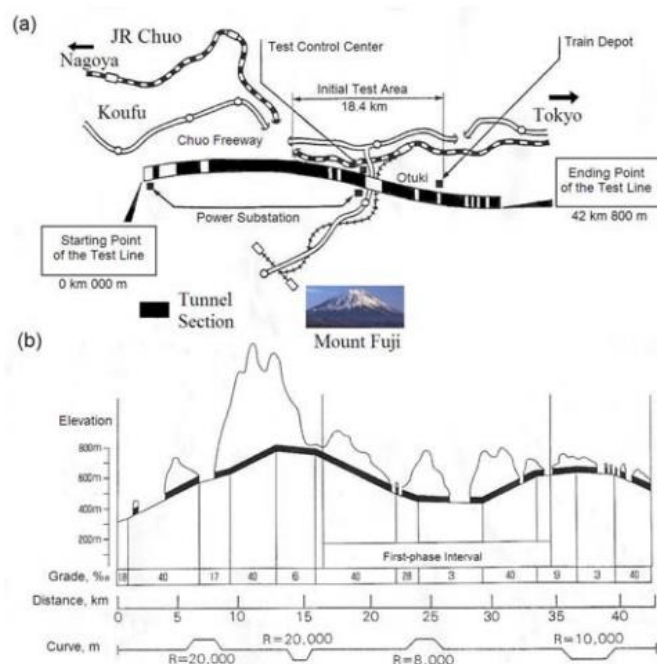
2.3.2.2. Yamanashi Maglev (Japão)

A população da Grande Tóquio, incluindo as prefeituras de Chiba, Kanagawa e Saitama, é atualmente de cerca de 40 milhões de habitantes — quase um terço da população total do Japão (127,6 milhões). A maior parte das instituições governamentais, administrativas, empresariais, financeiras e culturais está concentrada em Tóquio. Para corrigir o desequilíbrio causado pela supercentralização de pessoas, poder e recursos, é essencial que as funções políticas, econômicas e sociais exercidas pela área metropolitana da Grande Tóquio sejam parcial e progressivamente realocadas e distribuídas pelo país (Gieras, 2018).

Atualmente, Tóquio e Osaka estão conectadas pelos trens superexpressos Tokaido Shinkansen, com velocidade máxima de 300 km/h, transportando cerca de 368.000 passageiros em 283 trens por dia — um volume próximo ao limite desta linha. Há forte demanda por outro sistema de transporte ambientalmente sustentável e de maior velocidade. Espera-se que o Chuo Shinkansen, uma nova artéria de transporte entre Tóquio e Osaka que utiliza tecnologia supercondutora (SC), seja implantado na segunda década do século XXI. Novos trens do Chuo Shinkansen, capazes de atingir velocidades superiores a 500 km/h, são necessários para aliviar a capacidade limitada da linha Tokaido Shinkansen, preservar o meio natural e reduzir os riscos decorrentes de desastres naturais (Gieras, 2018).

A Linha de Testes Maglev de Yamanashi (Figura 23) faz parte da futura linha Chuo Shinkansen entre Tóquio e Osaka. Trata-se de um projeto conjunto da Central Japan Railway Company (JR Central), do Railway Technical Research Institute (RTRI) e da Japan Railway Construction Public Corporation, aprovado pelo Ministério dos Transportes em 1990. A linha de testes de 42,8 km será construída entre a vila de Sakaigawa (distrito Higashi-Yatsushiro) e a vila de Akiyama (distrito Minami-Tsuru), na prefeitura de Yamanashi, a oeste de Tóquio. Atualmente, um trecho de 18,4 km entre Katsunuma-budokyo e Ohtsuki já foi concluído (Gieras, 2018).

Figura 23: a- Mapa da linha de testes do Maglev Yamanashi b- Perfil altimétrico do percurso



Fonte: Gieras (2018, p. 339)

A velocidade máxima planejada é de 550 km/h (velocidade de operação 500 km/h), o raio mínimo de curva é de 8 km, o declive máximo é de 4% e a distância entre os centros de vias paralelas adjacentes é de 5,8 m. Um trecho de 12,8 km será de via dupla, onde serão estudadas as dinâmicas de dois trens que se cruzam a uma velocidade relativa de cerca de 1000 km/h. O custo do trecho de testes de 18,4 km — incluindo a subestação de conversão de energia, o centro de controle, o trem e o depósito — foi de aproximadamente 230 bilhões de ienes (1996) (Gieras, 2018).

De acordo com JAES Company (2026) o trem Maglev experimental MLX01, da Linha de Testes de Yamanashi, é sustentado pelo princípio da levitação EDL (levitação eletrodinâmica), em que as forças de repulsão são geradas entre bobinas estacionárias em curto-circuito e eletroímãs supercondutores em movimento. O leito é em forma de U e envolve a parte inferior do veículo. Em cada lado da via, bobinas estacionárias em curto-circuito, servem simultaneamente como bobinas de levitação e de guiagem lateral, são montadas na posição vertical. O veículo está equipado com eletroímãs supercondutores.

Além disso, em cada lado da via está instalado um enrolamento vertical de propulsão trifásico alimentado por corrente trifásica que, juntamente com os eletroímãs do trem, forma um LSM de núcleo de ar. O enrolamento trifásico estacionário produz um campo magnético viajante e corresponde ao enrolamento de armadura de um motor síncrono convencional. Os

eletroímãs supercondutores do veículo correspondem ao sistema de excitação de uma máquina síncrona. Quando o trem, impulsionado pelo LSM, passa por bobinas em curto-circuito em alta velocidade, correntes induzidas nessas bobinas, juntamente com o campo magnético excitado pelos eletroímãs supercondutores, geram fortes forças de repulsão e de estabilização lateral sobre o veículo. Os mesmos eletroímãs supercondutores são utilizados para levitação, guiagem lateral e propulsão (Gieras, 2018).

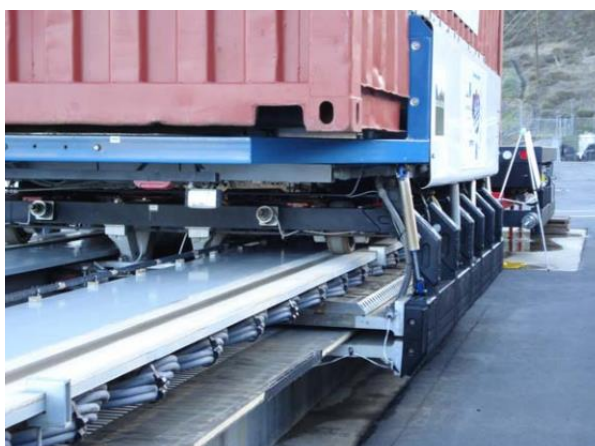
2.3.2.3. Maglev Urbano (Estados Unidos)

O custo e a complexidade dos atuais sistemas Maglev de alta velocidade em desenvolvimento, como o Transrapid e a linha de testes Maglev de Yamanashi, retardaram sua implantação. Um sistema de levitação por ímãs permanentes (PM) pode oferecer uma alternativa econômica aos sistemas Maglev existentes.

Uma pista de ensaio de 120 m para testar um veículo Maglev urbano foi construída pela General Atomics em 2004 em San Diego (Sorrento Valley), CA, EUA. O veículo de teste consiste em uma única unidade de chassi de 5 m de comprimento (Figura 42). Para sustentação e propulsão é usado um sistema EDL com um LSM plano de ímãs permanentes. Ímãs permanentes de NdFeB organizados em arranjos Halbach são montados no veículo. Bobinas de levitação sem núcleo (coreless) são instaladas na via entre os arranjos Halbach superior e inferior. Quando o veículo se desloca, correntes induzidas nas bobinas de levitação em curto-circuito interagem com os PMs para produzir forças de suspensão (Gieras, 2018).

De acordo com Gurol (2002), o veículo, ilustrado na Figura 24, é suportado por rodas quando estacionado, e passa a levitar quando alcança a velocidade de 2,5 metros por segundo. O entreferro aumenta conforme a velocidade até atingir o entreferro nominal de 25mm a 80km/h.

Figura 24: Protótipo de Maglev Urbano construído pela General Atomics na Califórnia



Fonte: Gieras (2018, p. 354)

A configuração dos ímãs permanentes (PM) consiste em um par de arranjos Halbach magneticamente e estruturalmente conectados entre si. O enrolamento de levitação está localizado entre o par de arranjos Halbach. Os arranjos superior e inferior de ímãs permanentes são defasados entre si de modo que suas componentes de campo vertical se somem, enquanto suas componentes horizontais se cancelam (ou quase se cancelam) na folga entre os dois arranjos. A via é composta por bobinas em curto-circuito feitas com fio Litz. Uma “via em escada” com longarinas compactas pode ser construída usando cabos de fio Litz encapsulados em tubos finos de aço inoxidável. O uso de fios Litz trançados assegura uniformidade de corrente nos cabos e minimiza perdas por correntes parasitas. Também foi considerada uma via laminar de cobre ou alumínio, que é uma alternativa de alta eficiência à “via em escada”.

Arranjos Halbach de ímãs permanentes foram projetados para fornecer uma folga nominal de 25 mm. Os ímãs de levitação superiores, em conjunto com as correntes induzidas nas bobinas em curto-circuito instaladas na via, produzem forças de atração, enquanto os ímãs de levitação inferiores e as correntes induzidas nas bobinas produzem forças de repulsão. Enquanto o veículo permanece em movimento, essas forças o mantêm suspenso. Ao reduzir a velocidade ou parar, o veículo volta a assentar sobre as rodas, que ficam permanentemente implantadas.

A tração é fornecida por ímãs permanentes de propulsão montados no veículo que interagem com o enrolamento de armadura trifásico de um LSM de núcleo laminar longo embutido na via. Devido à grande folga de ar, um LSM é fundamentalmente mais adequado às

necessidades de um sistema de suspensão EDS do que um LIM. O enrolamento de armadura trifásico do LSM é simplesmente constituído por cabos de cobre (Gieras, 2018).

Os testes foram realizados com massa total de até 10.000 kg, velocidade de até 10 m/s, folgas de ar de até 30 mm e aceleração de até 2,8 m/s², alcançando desempenho satisfatório nessas condições. Após a conclusão bem-sucedida dos testes, a pista de ensaio continuará a ser usada para otimização do sistema, enquanto um sistema de demonstração é construído na California University of Pennsylvania (CalU), em California, situada a cerca de 60 milhas a sudoeste de Pittsburgh. Quando concluído, esse sistema terá 7,4 km de extensão, com quatro estações e três veículos, conectando o campus superior e o campus inferior por meio de um aclive de 7%. O sistema atenderá o campus principal, a cidade e as residências estudantis e instalações esportivas no campus superior (Gieras, 2018).

2.3.2.4. Swissmetro (Suíça)

A Suíça é um país pequeno (41.293 km²) com relevo montanhoso e densidade populacional moderada, isto é, 172 habitantes por km² (comparação com 234,5 habitantes por km² na Alemanha e 333,3 habitantes por km² no Japão). A maior concentração populacional ao longo de uma distância de 300 km encontra-se no planalto central suíço, com as principais cidades Genebra, Lausanne, Berna, Lucerna, Zurique e St. Gallen (oeste a leste), e Basileia e Bellinzona (norte a sul). A distância entre cada uma das cidades principais vizinhas varia de 40 a 100 km. Há uma elevada saturação das principais rotas de transporte na Suíça. Para resolver os problemas de transporte e proteger o meio ambiente natural, uma rede de transporte subterrânea de alta velocidade parece ser a única solução (Gieras, 2018).

De acordo com Kaur (2022), o projeto Swissmetro (também chamado de Eurometro) tem velocidade máxima de 500km/h, e é considerado um Maglev de alta velocidade capaz de viajar por longas distâncias. O projeto utiliza suspensão eletromagnética e tem propulsão através de um motor linear síncrono. O Swissmetro foi projetado para operar em tuneis subterrâneos parcialmente em vácuo, buscando minimizar arrastos aerodinâmicos.

O projeto da rede Swissmetro prevê velocidades em torno de 400 km/h, tempo de viagem entre estações de cerca de 12 min, paradas de 3 min nas estações, 4 a 8 trens por hora e trens com capacidade máxima de 200 passageiros. O tempo de viagem de Zurique a Genebra será inferior a 1 h, em comparação com 3 h por trens de superfície.

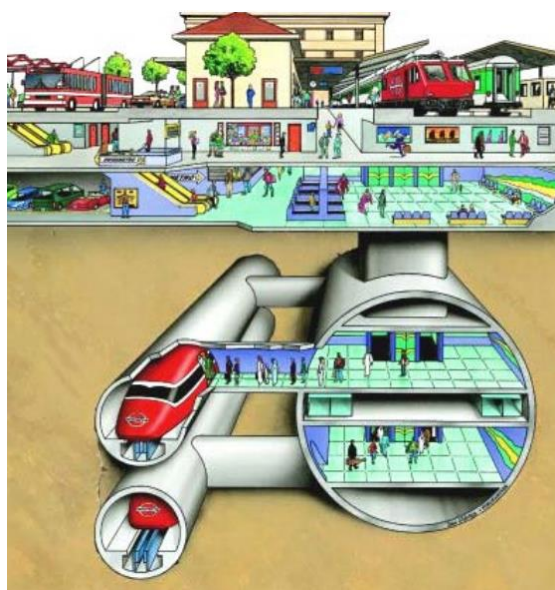
Segundo Gieras (2018) o projeto Swissmetro baseia-se em quatro tecnologias modernas e complementares:

- Uma infraestrutura subterrânea com dois túneis paralelos de 5 m de diâmetro em cada sentido e estações integradas aos meios de transporte públicos existentes (ferrovias, rodovias, aeroportos);
- Um vácuo parcial com pressão de ar reduzida para 8 a 10 kPa (0,08 a 0,1 atm) nos túneis para minimizar a resistência do ar e, assim, reduzir o consumo de energia;
- Um sistema de propulsão utilizando motores lineares com armaduras instaladas na via;
- Um sistema de sustentação e guiagem que utiliza a tecnologia de levitação EML

A linha Genebra–Lausanne, com cerca de 60 km, foi selecionada como projeto-piloto. A seção transversal do túnel e do veículo foi definida e as especificações do veículo piloto foram estabelecidas. Para controlar a folga de ar dos eletroímãs de levitação e de guiagem, serão utilizados estimadores de folga baseados na determinação da indutância, em vez de sensores de posição. A Figura 25 e 26 ilustram as estações, tuneis e vagões.

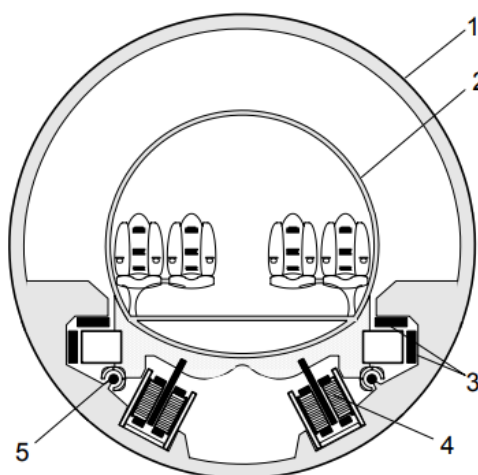
Os veículos Swissmetro requerem energia elétrica para propulsão, guiagem e equipamentos auxiliares, como iluminação, ar-condicionado, comunicação e equipamentos de segurança, estimada em 500 kW (potência fornecida ao veículo, demanda de pico). A energia será transferida ao veículo por meio de transformadores lineares de alta frequência. O enrolamento primário longo (aproximadamente 1 km) do transformador linear é fixado à via, e o enrolamento secundário é fixado ao veículo. Na frequência de 2kHz e com folga de ar de 20 mm, a eficiência prevista do transformador linear é de cerca de 80% (Gieras, 2018).

Figura 25: Seção transversal da estação do Swissmetro



Fonte: Gieras (2018, p. 358)

Figura 26: Seção transversal do túnel e do veículo Swissmetro onde: 1 - Anel de concreto com 5m de diâmetro 2 - Estrutura do veículo 3 - Suporte EML a orientação e levitação 4 - Motor Linear Síncrono 5- Transformador Linear



Fonte: Gieras (2018, p. 359)

O sistema de fornecimento de energia que distribui a energia elétrica ao longo do túnel consiste em transformadores 125/6,1 kV, 50 Hz, e conversores fonte de tensão PWM com frequência de saída de 0 a 215 Hz. Os conversores devem atender aos seguintes requisitos:

- Potência aparente máxima de 8,5 MVA com fator de potência $\cos \varphi = 0,85$ (potência ativa 7,225 MW);
- Fator de potência no lado da rede $\cos \varphi = 1,0$;
- Operação em modos de tração e frenagem regenerativa com qualquer fator de potência desejado no lado do LSM;
- de 290 km/h até a velocidade máxima de 500 km/h, aceleração com potência elétrica constante de 7 MW e eficiência superior a 85%.

A tensão máxima do link CC entre retificador e inversor foi assumida como 10 kV.

O consumo de energia previsto para o sistema Swissmetro a velocidade constante de 400 km/h, considerando a manutenção do vácuo, é de 43 Wh/(assento×km). Na mesma velocidade, o Transrapid 07 consome 50,4 Wh/(assento×km) (Gieras, 2018).

2.3.2.5. Maglev Cobra

O projeto Maglev Cobra, atualmente desenvolvido pelo Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), é baseado na levitação supercondutora e propõe um veículo levitado por forças magnéticas composto de curtos módulos, permitindo curvas com até 30 m de raio, rampas de 15% de elevação e velocidades de até 70 km/h. A movimentação do veículo deverá se assemelhar ao serpentear de uma cobra, sugerindo o nome Maglev Cobra. (De Sousa, 2016)

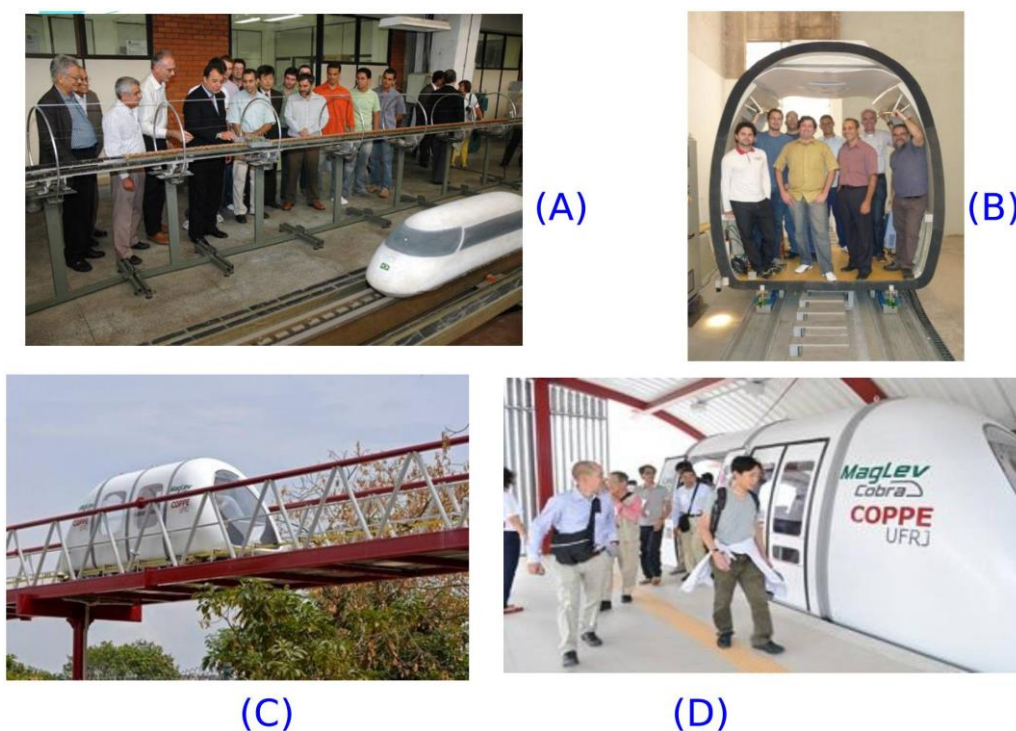
Uma das vantagens da levitação supercondutora reside na sua independência de sistemas roda-trilho convencionais, anulando o atrito com o solo, reduzindo o desgaste e o custo de manutenção do veículo. Para a tração do Maglev, um motor elétrico de indução linear é usado. Aliado a tecnologias de frenagem regenerativa, que devolve para a rede elétrica grande parte da energia utilizada para a aceleração, e painéis fotovoltaicos nas estações o Maglev apresenta um rendimento alto sem emissão de poluentes. (De Sousa, 2016)

Por ser movido à energia elétrica, cuja geração no Brasil é predominantemente de origem hidráulica, o sistema Maglev -Cobra funciona sem a emissão de gases poluentes. Por não depender de atrito mecânico, o Maglev -Cobra, além de menor consumo energético, não produz poluição sonora, podendo se harmonizar com a arquitetura das cidades em vias elevadas, apresentando uma imagem futurista dos locais onde for instalado (Oliveira, 2022)

O nível de ruído emitido por este veículo é baixo, o que lhe permite trafegar dentro das cidades em estruturas elevadas. Além disso, o custo estimado de construção é apenas 1/3 daquele previsto para construção de metrô subterrâneos. (De Sousa, 2016)

A Figura 27 contempla as fases do projeto, desde um pequeno protótipo, até o Maglev em operação.

Figura 27: (A) Protótipo em escala reduzida, em 2000. (B) Protótipo em escala real, em 2011. (C) Protótipo em escala real operando numa linha aberta. (D) Protótipo usado para transporte no campus universitário em 2015.



Fonte: De Sousa (2016, p. e4308-4)

Quando comparado a trens convencionais, o Maglev apresenta as seguintes vantagens de operação:

- Redução do consumo de energia: A energia para levantar o veículo Maglev Cobra é apenas a necessária para refrigerar os supercondutores com nitrogênio líquido. Estes supercondutores são alojados dentro de criostatos e a recarga se faz apenas a cada 12 horas. Portanto, o consumo energético para levantar é baixo, quando comparado com os métodos de levitação eletrodinâmica ou eletromagnética. Para a tração, como a resistência é limitada ao atrito do ar e a velocidade é baixa (70 km/h), o consumo médio de energia por passageiro é inferior, em comparação com outros meios de transporte.

- Redução de ruído audível: Sem atrito e funcionando em velocidades baixas, o ruído produzido é insignificante e o veículo não perturba a vida da cidade, sendo apropriado para ser implantado em linhas elevadas ao longo de rios, canais, canteiros centrais ou linha costeira.
- Facilidade de mudança de via: a mudança de direção pode ser conseguida com eletroímãs, substituindo a lenta solução mecânica tradicional.
- Menor tempo de viagem: com tração dada por motor elétrico linear, as forças para acelerar e frear não sofrem as limitações impostas pela aderência roda-trilho, permitindo, com isso, redução nos tempos de viagem.
- Manutenção mais fácil: a ausência de contato mecânico torna a manutenção mais fácil do que a dos motores cilíndricos com rolamentos e desgaste. O trilho magnético também requer menos manutenção do que o sistema ferroviário tradicional com os procedimentos de alinhamento de dormentes e trilhos.

A tecnologia supercondutora de levitação utilizada no Maglev Cobra para transporte urbano é correta em todos os aspectos, a saber:

- Ecologicamente, por ser um veículo não poluente, devido ao baixo barulho produzido e devido ao baixo consumo de energia;
- Economicamente, devido aos baixos custos de manutenção e implantação;
- Tecnicamente, pois o método de levitação empregado é adequado para transportes de baixa velocidade;
- Socialmente, uma vez que oferece solução para o problema de transporte em grandes cidades.

Além disso, qualidade de vida juntamente com crescimento industrial, técnico e científico são favorecidos com este projeto. (De Sousa, 2016)

3. METODOLOGIA

3.1. Experimento Virtual: Configurando um sistema com propulsão linear através do software de especificação/modelamento TIA SELECTION TOOL (TST)

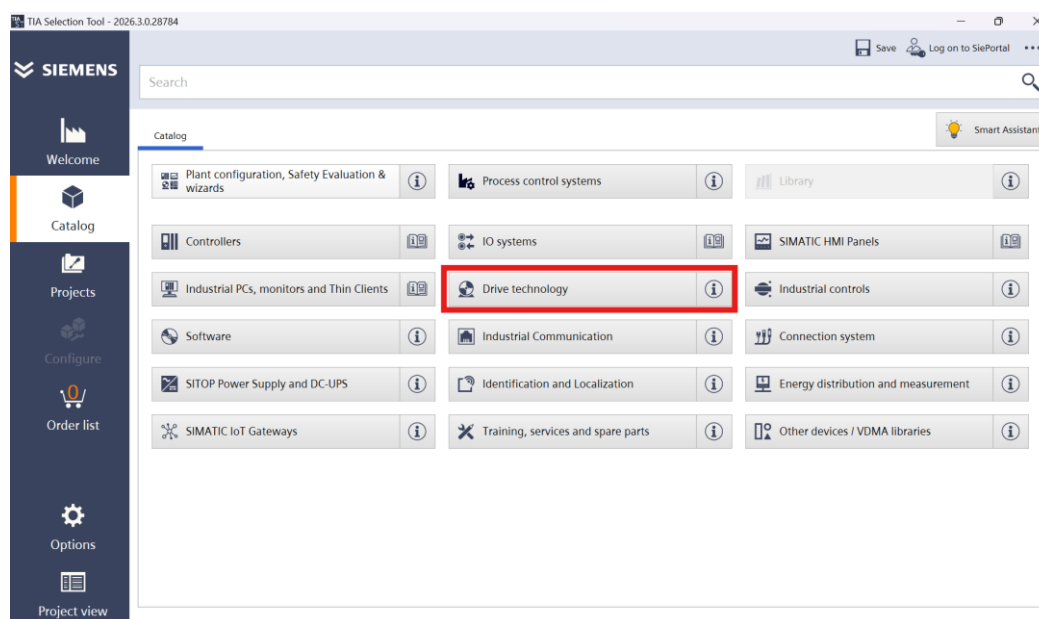
No universo da automação industrial, a complexidade dos sistemas e a vasta gama de componentes disponíveis podem ser um grande desafio para engenheiros e projetistas, especialmente quando se trata de tecnologias avançadas como os motores lineares. A seleção e a integração desses motores, que demandam precisão e compatibilidade com outros elementos do sistema, exigem planejamento. É nesse cenário que ferramentas de software especializadas se tornam indispensáveis para simplificar e otimizar o processo de seleção e configuração de equipamentos. Uma dessas ferramentas é o TIA Selection Tool, da Siemens, que atua como um assistente inteligente. Ele permite que o usuário, mesmo sem um conhecimento aprofundado prévio de cada componente individual, possa especificar e combinar os elementos necessários para um sistema de automação que incorpore, por exemplo, motores lineares, desde os controladores que os gerenciam até os acionamentos e dispositivos de rede que garantem seu funcionamento otimizado e conectado.

O TIA Selection Tool foi desenvolvido para guiar o usuário através de um processo intuitivo, garantindo que os componentes escolhidos para a aplicação sejam compatíveis entre si e atendam aos requisitos técnicos do projeto, como velocidade, força e precisão. Ele não apenas sugere as melhores opções de motores, acionamentos e controladores com base nas necessidades inseridas, mas também auxilia na validação da arquitetura do sistema, prevenindo erros de compatibilidade e otimizando o desempenho geral da aplicação. Dessa forma, a ferramenta democratiza o acesso ao design de sistemas de automação que utilizam motores lineares, permitindo que profissionais de diferentes níveis de experiência possam configurar soluções robustas e eficientes, acelerando o desenvolvimento de projetos e reduzindo a margem de erro na implementação dessas tecnologias de ponta.

Este experimento, terá por finalidade modelar, através do software TST, um sistema linear semelhante a um trem entre duas plataformas, e obter uma sugestão de motor linear adequado, bem como suas curvas características.

O experimento se inicia com a escolha da tecnologia suportada no software a ser configurada/modelada (Figura 28).

Figura 28: Tela inicial do TST, com catálogo de tecnologias disponíveis.



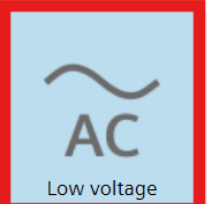
Fonte: Elaboração própria (2026)

Dentre as opções de tecnologias a serem configuradas, encontramos a “*Drive technology*”, destinada a aplicações com motores em geral.

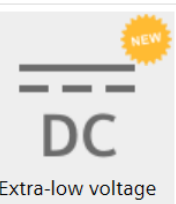
Primeiro, definimos as condições de fornecimento de energia elétrica (Figura 29):

Figura 29: TST, configuração do sistema de fornecimento de energia.

▼ Supply system



AC
Low voltage



DC
Extra-low voltage

Country of installation

Standard supply system

Lowest supply voltage

Short-term fluctuation

Min. temporary undervoltage relative to lowest s...

Brazil

3 AC, 380V, 60Hz

380 V

15 %

323 V

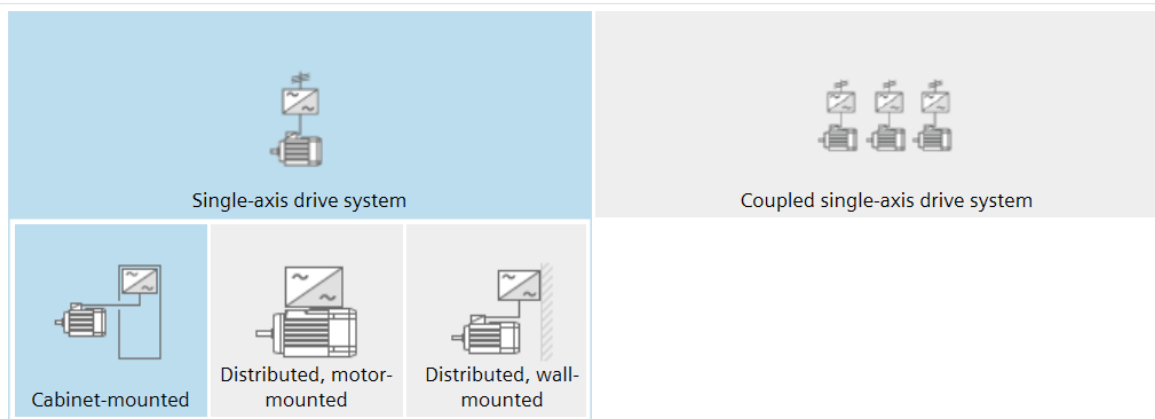
Fonte: Elaboração própria (2026)

Aqui, ao fornecer o país de instalação, já recebemos uma lista com as possíveis configurações de fornecimento de energia elétrica. Adotamos a corrente alternada, e informamos o número de fases, tensão e frequência da rede.

Informamos sobre a instalação do sistema de servoacionamento (Figura 30).

Figura 30: TST, configuração da instalação do sistema de acionamento.

▼ Installation



Fonte: Elaboração própria (2026)

As condições da instalação do sistema do servoacionamento podem ser:

- Sistema de eixo único: Onde um *drive* será destinado a acionar somente um motor.
 - Neste sistema, ainda é possível configurar as posições do *drive*, como em cabine, drive distribuído, ou em parede. As diferenças entre essas condições podem refletir em diferentes rendimentos do seu conjunto drive-motor. Para fins deste estudo, escolhemos a configuração em azul, com sistema de eixo único com drive montado em cabine.
- Sistema de eixos simultâneos: Onde vários *drives* acionaram diversos motores que devem operar em simultâneo.
- Sistema multidrives de eixo único: Onde mais de um *drive* aciona o mesmo motor.

Posteriormente a definição da instalação do *drive*, define-se o motor (Figura 31):

Figura 31: TST, configuração do motor

▼ Motor



Fonte: Elaboração própria (2026)

O portfólio da Siemens contempla diversos tipos de motores, incluindo os convencionais motores de indução (gaiola de esquilo), passando pelos belíssimos motores spindle built in, até os motores lineares, foco deste estudo.

Os últimos detalhes a serem definidos são apresentados na Figura 32, cabe destacar a possibilidade de regeneração de energia, a altitude de instalação (já que a menor concentração de oxigênio em altitudes elevadas prejudica a eficiência do conjunto), e as condições do ambiente, caso a instalação seja em área classificada.

Figura 32: TST, demais configurações do sistema

▼ Technology requirements

Fieldbus interface	Any
Braking / regenerative mode	Energy recovery into line supply
Safety Integrated Functions	
Motion control requirements	Any
Speed control mode (converter)	Any

▼ Ambient conditions

Installation altitude	≤ 1000 m
Ambient temperature	≤ 60 °C
Temperature of the liquid coolant	Use catalog value for derating
Explosion protection (gas)	None
Explosion protection (dust)	None

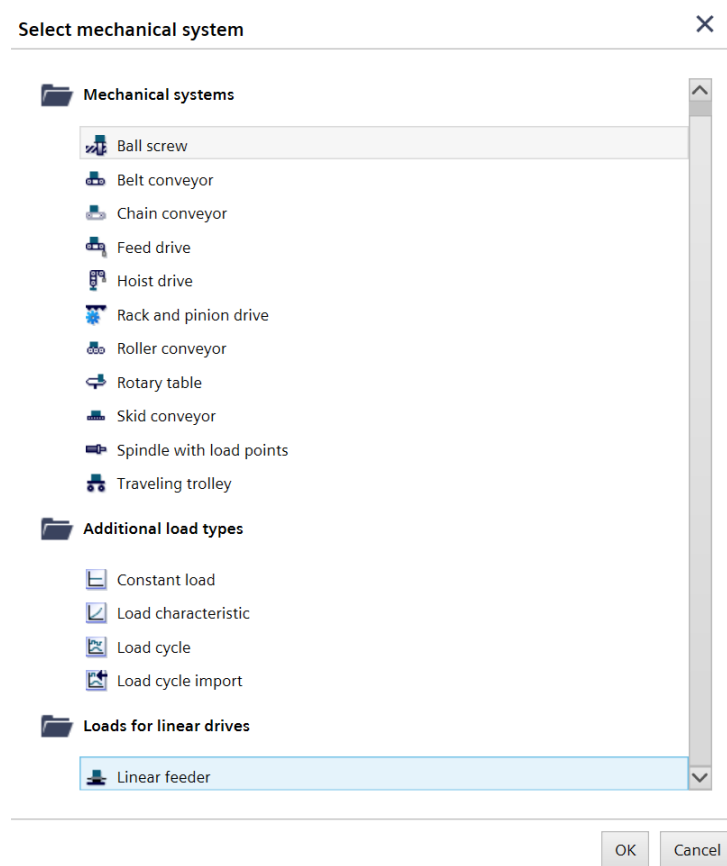
▼ Certificates

Certificates and standards	☒ CE (Europe and other countries) ☐ UL-R/CSA (North America) ☐ EAC (Russia and Eurasian market)
----------------------------	---

Fonte: Elaboração própria (2026)

Tendo sido definidas as condições básicas de operação, vamos agora definir o comportamento da carga (Figuras 33 e 34):

Figura 33: TST, possíveis configurações de sistemas mecânicos

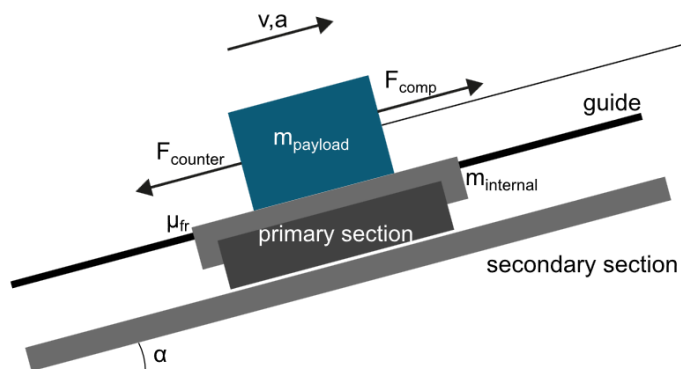


Fonte: Elaboração própria (2026)

A opção destacada em azul é diretamente relacionada às aplicações de motores lineares, e dá acesso ao seguinte configurador:

Figura 34: TST, configurações do sistema mecânico de motores lineares

▼ Mechanical model: linear feeder



▼ Masses

m_{payload}	Steady payload *
m_{internal}	Internal mass without motor
m_{counter}	Counterweight
F_{comp}	Weight compensation

▼ Mechanics

α	Angle of inclination
----------	----------------------

▼ Friction

F_{fr}	Friction force
F_{counter}	Additional counter force
μ_{fr}	Coefficient of friction

* - Mandatory field

Fonte: Elaboração própria (2026)

À direita, é possível visualizar as informações solicitadas pelo software para que seja feita a seleção do portfólio, em detalhes na Figura 35.

Figura 35: TST, configurações do sistema mecânico de motores lineares

▼ Masses

m_{payload}	Steady payload *	1.00	t
m_{internal}	Internal mass without motor	100	kg
m_{counter}	Counterweight	0.00	kg
F_{comp}	Weight compensation	0.00	N

▼ Mechanics

α	Angle of inclination	0.00	°
----------	----------------------	------	---

▼ Friction

F_{fr}	Friction force	1.00	kN
F_{counter}	Additional counter force	0.00	N
μ_{fr}	Coefficient of friction	0.00	

* - Mandatory field

Fonte: Elaboração própria (2026)

São inseridos alguns dados estimados para a operação de um pequeno vagão com capacidade de transportar algumas pessoas. Em destaque:

- Massa da carga, considerando 1 passageiro e a cabine de transporte.
- Massa interna sem motor, coberturas, protetores, líquidos refrigerantes, e outros componentes do conjunto.
- Força de fricção, neste caso, a carga não é levitada, o conjunto é apoiado em um sistema de guia.

Após inseridos os dados acima, passamos a definir o perfil do movimento (Figura 36), com algumas poucas informações já podemos definir as curvas de comportamento do sistema:

Figura 36: TST, configurações do sistema mecânico de motores lineares

 Apply     			
Value	Unit	1. Move	2. Move
Direction			
Name		Partida	Retorno
Type		  	  
s	m	150	150
t	s	32.6	32.6
v_{max} / v_{End}	km/h	20.00000	20.00000
a_{max}	m/s ²	1.00	1.00
t Pause	s	40.0	40.0

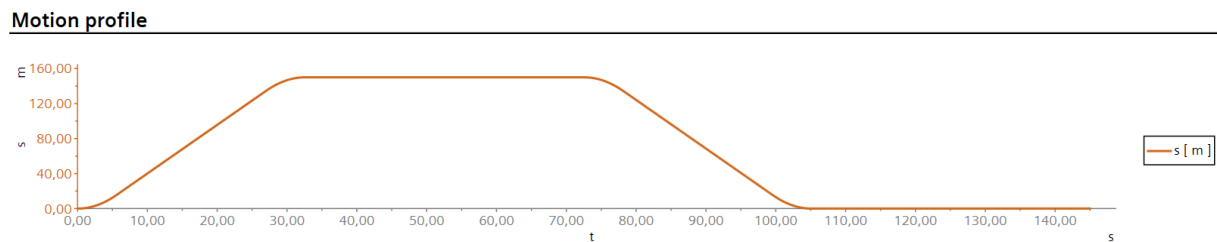
Fonte: Elaboração própria (2026)

O experimento virtual possui um trilho de 150 metros, com duas paradas, uma em cada extremidade. O tempo de percurso é calculado automaticamente de acordo com as entradas de V_{max}/V_{end} (velocidade final), A_{max} (aceleração) e t_{pause} (tempo de parada). Os valores foram estimados para simular uma operação real.

4. Apresentação da pesquisa e análise dos resultados

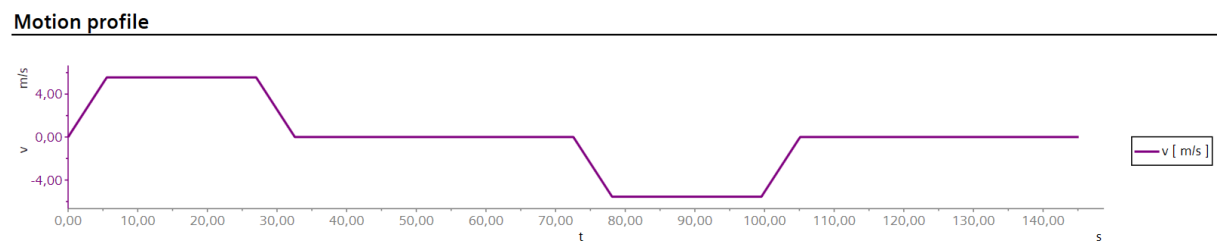
Após as entradas de todas as informações do ambiente e do mecanismo configurado, o próprio aplicativo retorna as curvas (Figuras 37, 38 e 39) de comportamento do sistema:

Figura 37: TST, curva de posicionamento do sistema



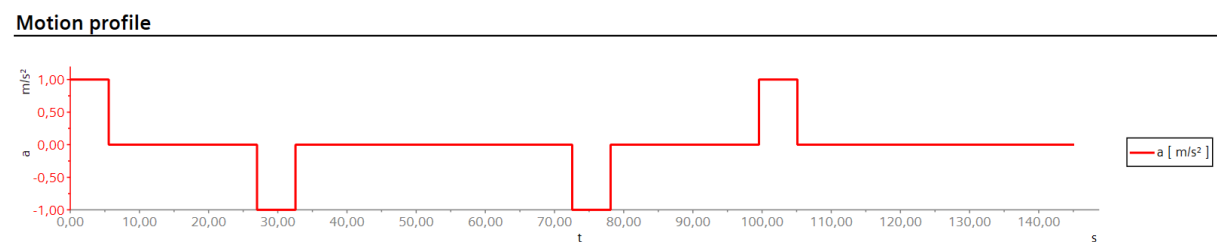
Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 38: TST, curva de velocidade do sistema



Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 39: TST, curva de aceleração do sistema



Fonte: Elaboração própria (2026)

Com todas as definições realizadas, o programa sugere a escolha dos motores e demais componentes do sistema, conforme Figuras 40, 41 e 42:

Figura 40: TST, catálogo de seleção do motor

▼ Application requirements for motor

Effective force and...	796 N	124 m...	Force off in pause	No
Maximum force at v...	2100 N @	333 m...	Max. static load force	1000 N
Required maximum...		333 m...	Calculated traversing...	150 m
Required effective p...	1.65 kW			

▼ Dimensioning specifications

Cooling method	Self-cooling	Precision cooler	☐	Heatsink profiles	☐
Max. traversing...	150 m			Secondary secti...	Standard

▶ Selected motor including configuration

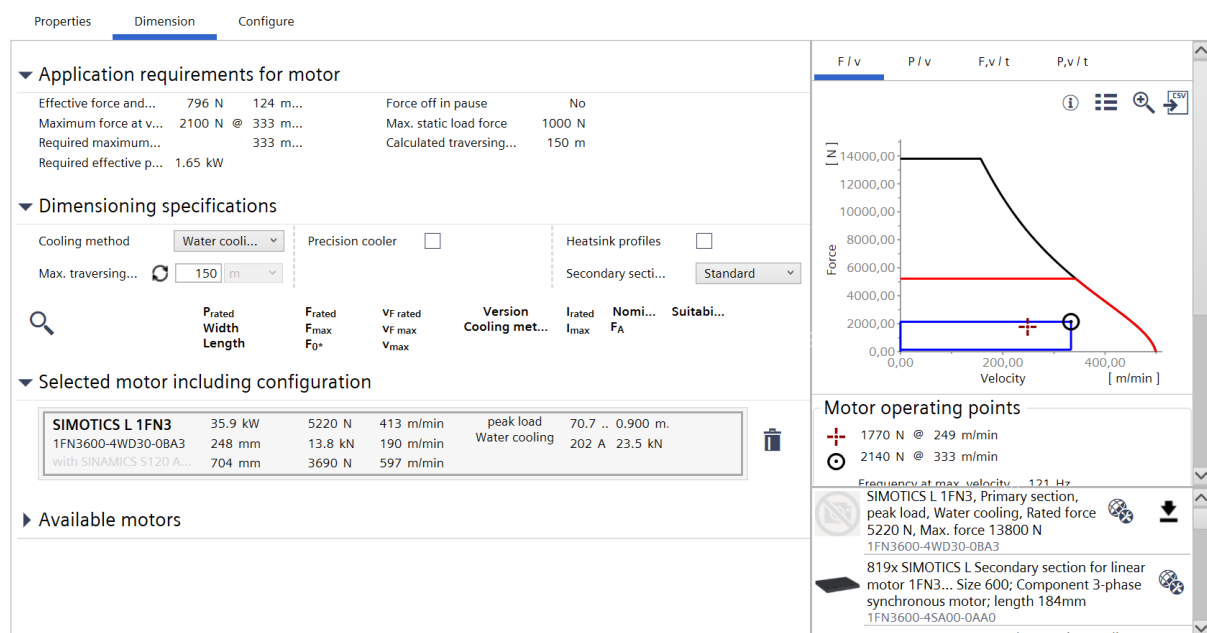
Prated Width Length	Frated F _{max} F _{0*}	VF rated VF max V _{max}	Version Cooling met...	I _{rated} I _{max}	Nomi... F _A	Suitabi...
---------------------------	---	--	---------------------------	--	---------------------------	------------

▼ Available motors

Filter (1)		Sorting according to: Motor size		Select motor	
SIMOTICS L 1FN3	13.9 kW	1160 N	722 m/min	peak load	20.5 .. 0.900 m.
1FN3450-3WE00-0.A3	188 mm	7760 N	260 m/min	Self-cooling	151 A 13.2 kN
with SINAMICS S120 A...	543 mm	819 N	781 m/min		
SIMOTICS L 1FN3	18.5 kW	1540 N	719 m/min	peak load	27.2 .. 0.900 m.
1FN3450-4WE00-0.A3	188 mm	10.3 kN	261 m/min	Self-cooling	201 A 17.6 kN
with SINAMICS S120 A...	704 mm	1090 N	777 m/min		

Fonte: Elaboração própria (2026)

Figura 41: TST, informações do motor escolhido



Fonte: Elaboração própria (2026)

Repare que, após a seleção do motor, já é possível observar a lista de materiais necessários para a aplicação no canto inferior direito da imagem. O mesmo acontece com a seleção do drive:

Figura 42: TST, detalhes drive escolhido

Application requirements for frequency converter

RMS current	10.9 A	Motor rated current	70.7 A	Lowest supply voltage	380 V
Maximum current	29.0 A	Motor stall current	70.7 A		
Maximum regenerative...	1.94 A				

Dimensioning specifications

☐ Consider output current derating at low ou... ☐ Avoid reducing the IGBT service life

Selected frequency converter including configuration

SINAMICS S120 AC/AC 6SL3210-1PE22-7UL0	11.0 k..	26.0 A 38.0 A	Installation... Blocksize / C	Air-cooled	44.4 % 76.4 %
--	----------	------------------	-------------------------------------	------------	------------------

Control mode: Servo Pulse frequency: Any

Available frequency converters

Filter (1) Select frequency converter

SINAMICS S120 AC/AC 6SL3210-1PE22-7UL0	11.0 k..	26.0 A 38.0 A	Installation... Blocksize / C	Air-cooled	44.4 % 76.4 %
--	----------	------------------	-------------------------------------	------------	------------------

Frequency converter

Description	Actual	Limit...	Unit
Continuous current ut...	44.4	100	%
Max. current utilization	76.4	100	%
Overload utilization (I _{ft})	1.90	100	%

Regenerative energy

Frequency converter is reg... No
Regenerative mode Yes

Frequencies

Description	Actual	Limit...	Unit
Output frequency at...	121	550	Hz
Permissible minimum...	Any		
Minimum pulse frequ...	4.00		kHz
User requirements	Any		
Pulse frequency	4.00	4.00-1...	kHz

Braking resistor suitability

Description	Actual	Limit...	Unit
Load cycle duration	145		s
Regenerative duty cycl...	7.62		%
Load mean regenerati...	30.1		W

SINAMICS S120 AC/AC, Single-axis compact, Frame size C, Blocksize, Rated power 11.0 kW
6SL3210-1PE22-7UL0

SINAMICS S120 CONTROL UNIT CU310-2 PN WITH PROFINET INTERFACE WITHOUT COMPACTFLASH CARD
6ES73040-1EA01-0AA0

Fonte: Elaboração própria (2026)

Após todas as configurações, o sistema fica salvo como um eixo único “Axis A”, conforme Figura 43, podendo ser interpolado com outros motores, drives, e sistemas da Siemens.

Figura 43: TST, eixo A configurado.



Fonte: Elaboração própria (2026)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho, foi possível compreender de forma detalhada os princípios de funcionamento dos motores elétricos lineares e sua relevância para aplicações modernas, em especial nos sistemas de transporte por levitação magnética. Observou-se que os motores lineares surgem como uma evolução natural dos motores rotativos convencionais quando há a necessidade de movimentos retilíneos precisos, elevada eficiência e menor dependência de elementos mecânicos intermediários.

No contexto dos trens de levitação magnética, os motores lineares não apenas fornecem a propulsão do veículo, mas também se integram aos sistemas de levitação e orientação, permitindo um transporte totalmente livre de contato mecânico com a via. Essa característica resulta em diversas vantagens, como redução de desgaste, menor necessidade de manutenção, diminuição de ruído e vibrações, além de maiores velocidades operacionais quando comparadas aos sistemas ferroviários convencionais.

As diferentes aplicações Maglev apresentadas demonstram que a tecnologia já alcançou elevado nível de maturidade técnica em diferentes partes do mundo, com aplicações industriais, e de transporte em alta, média e baixa velocidade. No entanto, também se constatou que os altos custos iniciais de implantação, a complexidade dos sistemas e os desafios de infraestrutura ainda representam obstáculos para a sua ampla disseminação, especialmente em países em desenvolvimento.

Apesar dessas limitações, os trens de levitação magnética apresentam grande potencial como solução para os problemas de mobilidade e sustentabilidade enfrentados pelas grandes cidades e corredores de transporte de alta demanda. Por serem sistemas totalmente eletrificados, com menor impacto ambiental e elevada eficiência energética, alinham-se às exigências atuais de redução das emissões de gases de efeito estufa e de otimização dos recursos energéticos.

Dessa forma, conclui-se que o aprofundamento dos estudos sobre motores lineares e levitação magnética é fundamental para viabilizar novas aplicações e reduzir os custos associados a essa tecnologia. O desenvolvimento contínuo de pesquisas acadêmicas e projetos experimentais, como os já realizados no Brasil, pode contribuir significativamente para a consolidação dos sistemas Maglev como uma alternativa viável e estratégica para o transporte do futuro.

REFERÊNCIAS

- BECKHOFF AUTOMATION GMBH & CO. KG. **XPlanar | Planar motor system**.
Verl: Beckhoff Automation, 2021. Disponível em:
https://www.beckhoff.com/en/en/products/motion/xplanarplanarmotorsystem/?pk_campaign=adwordsadwordssearchxplanar_en&pk_kwd=beckhoff%20xplanar&gad_source=1. Acesso em: 17 jul. 2026.
- BORGES, Claudio Neves. **O trem de alta velocidade e o impacto no transporte aéreo entre o Rio de Janeiro e São Paulo**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2010.
- CAMARGO, Victor Augusto Deliberal; NASCIMENTO, Carlos Sonier Cardoso do. Trens de levitação magnética: um estudo de caso. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 15., 2023. **Anais [...]**. 2023.
- CASTRO, Fabiano Pimentel de. **Servo motores: visão geral, controle e aplicação**. 2016.
- CHEVAILLER, Samuel. **Comparative study and selection criteria of linear motors**. 2006. Tese (Doutorado) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, 2006.
- DE ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira; MÜLLER, Paul. “Levitação magnética”: uma aplicação do eletromagnetismo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 1, p. 115-120, 2002.
- DE SOUSA, Wescley T. B. et al. Projeto MagLev Cobra-levitação supercondutora para transporte urbano. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, p. e4308, 2016.
- EMALS & AAG. **General Atomics**. 2026. Disponível em:
<https://www.ga.com/defense/alre>. Acesso em: 17 jul. 2026.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 16 jul. 2026.
- FERREIRA, Antonio Carlos. **Notas de aula sobre motores elétricos lineares**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- GASPAR, A. J. L. et al. **Cenário do trem de alta velocidade brasileiro**. São Paulo, 2012.

GIERAS, Jacek F.; PIECH, Zbigniew J.; TOMCZUK, Bronislaw. **Linear synchronous motors: transportation and automation systems**. Boca Raton: CRC Press, 2018.

GOMES, Rafael Ramos; STEPHAN, Richard Magdalena. Um experimento para ilustrar o sistema de levitação eletromagnética utilizado em trens MAGLEV. **Semana da Eletrônica/UFRJ**, v. 1, 2004.

GUROL, Sam; BALDI, Bob; POST, Richard F. Overview of the general atomics low speed urban MAGLEV technology development program. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETICALLY LEVITATED SYSTEMS AND LINEAR DRIVES, 17., 2002, Lausanne. **Proceedings [...]**. Lausanne, Switzerland, 2002.

H2W TECHNOLOGIES. **Linear Motor: How It Works?** 2016. Disponível em: <https://www.h2wtech.com/blog/linear-motor-how-it-works>. Acesso em: 24 jul. 2026.

JAES SRL. **Jaes srl - Japan American European Solutions - E-learning**. 2026. Disponível em: https://jaescompany.com/elearning_article.php?lang=pt&articleid=100. Acesso em: 23 jul. 2026.

JUNQUEIRA, J. H. N. **A ferrovia de alta velocidade para o transporte de passageiros, estudo de um caso brasileiro**. 1979. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 1979. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/964>.

KATANO, Osvaldo Jeniti; CUNHA JÚNIOR, Henrique Antunes. **Motores de indução lineares aplicados à tração elétrica: bancada de ensaios e análise de protótipo acionado por um inversor de frequência variável**. 1996.

LACERDA, Sander Magalhães. **Trens de alta velocidade: experiência internacional**. 2008.

LEE, Hyung-Woo; KIM, Ki-Chan; LEE, Ju. Review of maglev train technologies. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 42, n. 7, p. 1917-1925, 2006.

LINHA Centur | Tornos CNC ROMI S.A. Indústrias Romi S.A. Disponível em: <https://www.romi.com/produtos/tornos-cnc-romi-centur/>. Acesso em: 17 jul. 2026.

MOTA, Gabriel Mendonça Pinto et al. **Bancada didática para servomotores**. São Paulo: Centro Paula Souza, 2024. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/37948>. Acesso em: 23 jul. 2026.

OLIVEIRA, Roberto A. H. et al. Caracterização das forças eletromagnéticas em motor linear projetado para o veículo Maglev-Cobra. **Eletrônica de Potência**, v. 27, n. 2, p. 149-155, 2022.

PAES, André Luiz; SAKAMOTO, Aristeu Yuki. **Projeto e construção de protótipo de motor linear para fins didáticos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PUDENZI, Márcio A. A. **Levitação magnética**. 2001. Tese (Doutorado) – Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

RIPPEL, Ricardo; RIPPEL, Valderice Cecília Limberger; DE LIMA, Jandir Ferrera. Percepções genéricas sobre o crescimento populacional a demanda por energia e os padrões de consumo dos recursos ambientais atuais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 15., 2006, Caxambu. **Anais [...]**. Caxambu: ABEP, 2006.

SEIXAS, Falcondes J. M. et al. Motor linear de indução bifásico: construção de um protótipo controlado por inversor de frequência. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 2014. **Proceedings [...]**. 2014. p. 334-338.

SIEMENS AG. **Catálogo D21.4 SINAMICS S120, SINAMICS S220 and SIMOTICS**. Siemens AG, 2024. Disponível em: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/019/109747019/att_1268203/v1/motion-control-drives-D21-4-complete-English-2023-12.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

SIEMENS AG. **Manual de configuração do SIMOTICS L-1FN3 para SINAMICS S120**. 2012. Disponível em: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/944/59868944/att_4409/v1/_und_Dauerlastmotor_en_pt-pt-PT.pdf. Acesso em: 24 jul. 2026.

SIEMENS AG. **Train on track - Transrapid Shanghai China**. 2017. Disponível em: <https://assets.new.siemens.com/content/siemens/assets/ui/en/search.html#/search/all/maglev/sid:c05725cf241095ed8b473916dd376b4a0ced3c3c/overview>. Acesso em: 23 jul. 2026.

SIEMENS BRASIL. **Em resumo**. 2026. Disponível em: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:4bf4382d-e3c8-4190-b94f-632e44116ff6/factsheet-siemens-brazil-pt.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2026.

TRANSRAPID INTERNATIONAL. **Material publicitário Aerotrem TR Transrapid**. 2007. Disponível em: https://www.senado.leg.br/comissoes/ci/ap/AP_20071018_UFRJ_Aerotrem.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

WILSON, J. **2025 Os 10 principais fabricantes de motores lineares do mundo**. Tallman Robotics, 7 jan. 2026. Disponível em: <https://pt.tallmanrobotics.com/blog/2025-top-10-linear-motors-manufacturers-in-the-world-2450113.html>. Acesso em: 17 jul. 2026.

YAGHOUBI, Hamid. The most important maglev applications. **Journal of Engineering**, v. 2013, n. 1, p. 537986, 2013.

ZAGO, Guilherme Marcon. **Modelo de motor linear a partir de motor rotativo cortado**. 2013.

APÊNDICE A – TRENS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: UM ESTUDO DE CASO



TRENS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: UM ESTUDO DE CASO

Victor Augusto Deliberal Camargo¹; Carlos Sonier Cardoso do Nascimento²

¹Aluno, ²Professor Orientador;

¹victorcamargo.aluno@unipampa.edu.br;

INTRODUÇÃO

A superpopulação afeta diretamente os serviços de transporte e a crise energética global. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o setor de transporte corresponderá até 50% das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Os trens de levitação magnética, se mostram boas alternativas para o transporte em médias distâncias, inclusive quando comparado aos aviões.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é levantar material bibliográfico relativo a temática dos trens MAGLEV, principalmente acerca dos conceitos de levitação magnética e motores lineares, para estudos posteriores.

METODOLOGIA

A repulsão entre campos magnéticos de mesma polaridade pode ser facilmente constatada pela aproximação de dois ímãs permanentes, com pólos iguais, adequadamente orientados na direção um do outro. Além de ímãs permanentes,.... correntes elétricas também são capazes de produzir campos magnéticos. (DE ARAÚJO, 2002).

Os MagLev's podem levantar através de duas topologias, a suspensão eletromagnética, e a suspensão eletrodinâmica.

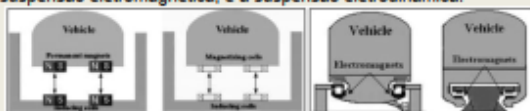


Figura 1: Topologias de Levitação Magnética
Fonte: LEE (2006)

A levitação eletromagnética utiliza ímãs permanentes e é frequentemente utilizada em trens de menor velocidade, principalmente por não possuir ajustes em relação ao vão entre o trem e o "trilho". A levitação eletrodinâmica possui custos elevados, mas é mais precisa no controle do vão. Em ambos o caso a levitação e a orientação podem ser realizadas simultaneamente.

A propulsão dos trens de levitação magnética é dada através de um motor linear, que pode ser de indução (MLI) ou síncrono (MLS).

Motores lineares são dispositivos eletromecânicos capazes de converter energia elétrica em movimento linear (ou vice versa). Estes, diferem dos motores convencionais, e são significativamente mais eficientes que estes, quando aplicados em trabalhos lineares.

Este tipo de motor pode ser visto com um motor rotativo tradicional que teve o seu estator cortado radialmente e depois desenrolado. A parte móvel é normalmente conhecida como cursor ou secundário e a parte fixa, chamada de pista ou primário. (SEIXAS, 2014)

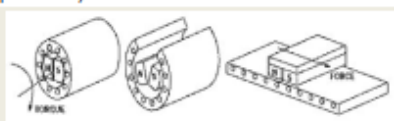


Figura 2: Esquema do Motor Linear
Fonte: LEE (2006)

Ou seja, como os motores lineares executam o movimento de translação sem a necessidade de acoplamentos mecânicos, como os usuais motores rotativos com rosca infinita, estes apresentam melhor precisão no posicionamento, maior aceleração e controle mais simples. (FERREIRA, 2003).

RESULTADOS

Os trens MagLev são uma excelente alternativa frente ao transporte em médias distâncias. Segundo a Transrapid, um Maglev conectando São Paulo ao Rio de Janeiro seria mais eficiente em que aviões, principalmente dados os procedimentos burocráticos para embarque e desembarque de passageiros.

Determinou-se que, para a construção de um protótipo em escala laboratorial, serão utilizados ímãs de neodímio (rotor) e eletroímãs (estator). Os eletroímãs serão confeccionados em AWG 23 ou menor. Será utilizado software de simulação de elementos finitos, para que seja possível analisar vetorialmente o comportamento do campo magnético e suas variações.

CONCLUSÕES

Devem ser realizados mais estudos verificando as possibilidades de construção cada vez mais acessíveis de alternativas de transporte eficientes e ecológicos. Os MagLev são uma excelente alternativa frente à crescente demanda por transporte e, vinculados à matriz elétrica brasileira, podem fomentar a transição energética no setor de transportes.

REFERÊNCIAS ABNT

- LEE, Hyung-Woo; KIM, Ki-Chan; LEE, Ju. Review of maglev train technologies. IEEE transactions on magnetics, v. 42, n. 7, p. 1917-1925, 2006.
- DE ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira; MÜLLER, Paul. "Levitação magnética": Uma aplicação do eletromagnetismo. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 19, n. 1, p. 115-120, 2002.
- FERREIRA, Antonio Carlos. Notas de Aula sobre Motores Elétricos Lineares. UFRJ, 2003.
- SEIXAS, Falcones JM et al. Motor Linear de Indução Bifásico: Construção de um Protótipo Controlado por Inversor de Frequência. In: Proceedings of International Conference on Engineering and Technology Education. 2014. p. 334-338.

AGRADECIMENTOS

(Quando houver)

A Universidade Federal do Pampa, ao Grupo de Estudos Avançados em Engenharia de Energia, a bolsa de Divulgação Científica e Democratização do Conhecimento, e ao Professor Carlos Sonier.

APÊNDICE B – DECLARAÇÃO DE USO OU NÃO USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM TRABALHOS ACADÊMICOS DO CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Declaração de Uso ou Não Uso de Inteligência Artificial em Trabalhos Acadêmicos do Curso de Engenharia de Energia

Acadêmico(a): Victor Augusto Deliberal Camargo

Orientador(a): Carlos Sonier Cardoso do Nascimento

Coorientador(a): _____

Este documento tem como objetivo orientar acadêmicos na transparência sobre o uso de Inteligência Artificial (IA) na elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e/ou Projeto Final de Curso (PFC), do Curso de Engenharia de Energia, garantindo a ética e a integridade científica.

A omissão do uso, mesmo que mínimo, fere os princípios da integridade científica.

Ao declarar o uso de IA, devem ser especificados os seguintes aspectos:

Houve utilização de IA no desenvolvimento da pesquisa?

(X) Não houve uso de ferramentas de IA.

Declaro que não utilizei, em nenhuma etapa do desenvolvimento do presente trabalho, ferramentas de IA, incluindo, mas não se limitando, a recursos de geração de texto, imagem, código, resumos, traduções ou análises. Assumo integral responsabilidade pelo conteúdo, conforme os princípios de integridade acadêmica e a legislação vigente.

(Se marcar esta opção, não é necessário preencher os campos abaixo.)

() Sim.

1. Ferramenta(s) e versão(ões) predominante(s):

2. Finalidade(s) (marcar todas que se aplicam):

☐ Exploração inicial de ideias

☐ Busca/triagem de literatura

☐ Leitura assistida/Resumos (com conferência humana)

☐ Revisão linguística/Referências

☐ Apoio reprodutível à análise/apresentação (restrito à geração automatizada e reprodutível de tabelas, gráficos, figuras ou visualizações a partir de dados previamente analisados e interpretados pelos autores, sem substituição da análise científica humana).

☐ Programação (sugestão/depuração/documentação). ☐ Transcrição (com anonimização): conversão literal, mediante autorização, de áudios ou vídeos em texto de entrevistas, aulas, reuniões ou palestras, com obrigatória revisão humana, anonimização e respeito aos direitos autorais, vedada a identificação de voz ou outros dados biométricos. ☐ Tradução técnica (com revisão humana).
Declarações éticas (obrigatórias caso tenha havido uso de IA): ☐ Assumimos responsabilidade integral e exclusiva pelo conteúdo final desta obra. ☐ Limites do uso: Todo o conteúdo gerado foi integralmente analisado, validado e editado por mim, sendo de minha inteira e exclusiva responsabilidade humana todo o mérito acadêmico, a veracidade das informações e a originalidade do texto apresentado.

Observações:

A responsabilidade sobre a precisão, validade das informações, cálculos, simulações e dados gerados com apoio da IA é integralmente do(a) acadêmico(a);

O uso de IA no curso de Engenharia de Energia deve ser feito de forma consciente, responsável, crítica e com absoluto protagonismo humano.

Este documento deve ser inserido como **apêndice** ao final do trabalho, sendo assinado pelo(a) acadêmico(a), orientador(a) e coorientador(a), se houver.

As assinaturas deverão ser realizadas eletronicamente pelo sistema **GOV.BR**.

Assinatura do(a) Acadêmico(a):

Documento assinado digitalmente
 VICTOR AUGUSTO DELIBERAL CAMARGO
 Data: 24/07/2026 19:07:13-0300
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura do(a) Coorientador(a) (se houver):

Assinatura do(a) Orientador(a):

Documento assinado digitalmente
 CARLOS SONIER CARDOSO DO NASCIMENTO
 Data: 25/07/2026 04:40:14-0300
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>