



VEÍCULOS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: O CASO DO MAGLEV-COBRA

Renan Couto Lisboa Pereira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva
Rômulo Dante Orrico Filho

Rio de Janeiro
Novembro de 2021

VEÍCULOS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: O CASO DO MAGLEV-COBRA

Renan Couto Lisboa Pereira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Rômulo Dante Orrico Filho

Aprovada por: Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Prof. Rômulo Dante Orrico Filho

Prof. Lino Guimarães Marujo

Prof. Richard Magdalena Stephan

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

NOVEMBRO DE 2021

Pereira, Renan Couto Lisboa

Veículos de Levitação Magnética: O Caso do
MAGLEV-COBRA / Renan Couto Lisboa Pereira. – Rio
de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XII, 112 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva
Rômulo Dante Orrico Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia de Transportes, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 105-112.

1. Veículos de Levitação Magnética. 2. Transporte
ferroviário de média capacidade. 3. Análise econômica. I.
Silva, Marcelino Aurélio Vieira da *et al.* II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia de Transportes. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus colegas do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, pelos momentos compartilhados ao longo do mestrado.

Aos meus orientadores Marcelino e Rômulo pelos ensinamentos, conselhos e sugestões que tornaram realidade este trabalho.

À equipe do Laboratório de Aplicação de Supercondutores por toda a ajuda, que vai além da pesquisa, seja com o fornecimento de dados, seja com a parceria em palestras sobre o MAGLEV.

Aos meus pais, Abilio e Telma, por todo o amor incondicional durante a minha trajetória. Não tenho dúvidas de que sem o apoio deles não venceria mais esta etapa da minha vida. À minha irmã Gisele pela parceria de sempre, além da revisão e da leitura crítica deste trabalho.

À minha esposa Suellen, por sempre incentivar o meu crescimento profissional e, principalmente, pelo amor, carinho e companheirismo que me dão segurança para buscar meus sonhos e conquistas.

Ao meu filho Lucas, por transformar a minha vida com sua pureza, alegria, amor e brincadeiras que tornam nossos momentos juntos sempre mágicos e inesquecíveis. Sou eternamente grato e orgulhoso por ter um filho tão iluminado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

VEÍCULOS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: O CASO DO MAGLEV-COBRA

Renan Couto Lisboa Pereira

Novembro/2021

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Rômulo Dante Orrico Filho

Programa: Engenharia de Transportes

Este trabalho visa elaborar uma análise dos veículos de levitação magnética, avaliando aspectos econômicos e ambientais a partir de comparações com outros meios de transporte ferroviários de média capacidade, como o VLT e o Monotrilho. A metodologia utilizada, aplicada ao estudo de caso do Eixo Anhanguera de Goiânia/GO, consiste no detalhamento das seguintes etapas: implantação e operação do sistema e aquisição dos veículos. Com base nos dados obtidos, foram elaboradas análises econômicas em três cenários distintos comparando os sistemas de transporte a partir do fluxo de caixa e de indicadores como TIR, VPL e *payback*. Além disso, foram estudados os aspectos ambientais relativos às emissões de gases de efeito estufa e ao consumo energético. Identificou-se, desse modo, que o MagLev é o meio de transporte escolhido para a realização das viagens no Eixo Anhanguera, principalmente no que tange aos aspectos econômicos. Constatou-se, ainda, que os veículos de levitação magnética se destacam por sua eficiência energética e podem ser uma boa solução em locais cuja tecnologia de supercondutores esteja mais bem consolidada em sistemas de transporte.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MAGNETIC LEVITATION VEHICLES: THE CASE OF MAGLEV-COBRA

Renan Couto Lisboa Pereira

November/2021

Advisors: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Rômulo Dante Orrico Filho

Department: Transportation Engineering

This paper aims to elaborate an analysis of the magnetic levitation vehicles, evaluating economic and environmental aspects based on comparisons with other medium capacity rail transportation, such as the VLT and the Monorail. The methodology used for this dissertation was a detailing of the stages of implantation and operation of the system and acquisition of vehicles, applying in the case study of the Eixo Anhanguera, Goiânia/GO. Based on the data obtained, economic analyzes were carried out in three different scenarios comparing transport systems based on cash flow and indicators such as IRR, NPV and payback. In addition, environmental aspects were studied through greenhouse gas emissions and energy consumption. As a result, it was identified that the MagLev is the mode of transport chosen for making trips on the Eixo Anhanguera, mainly in economic aspects. The dissertation also pointed out that magnetic levitation vehicles stand out for their energy efficiency and can be a good solution in places where the technology of superconductors and magnet tracks are better consolidated in transit systems.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Problema de pesquisa	14
1.2 Objetivos do trabalho	14
1.3 Relevância.....	14
1.4 Delimitação da pesquisa	15
1.5 Estrutura da dissertação	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Classificação dos modos de transporte em função da capacidade 17	
2.2 Sistemas de Transportes Ferroviários	18
2.2.1 Trens de Alta Velocidade - TAV	19
2.2.2 Veículos de Levitação Magnética	20
2.2.2.3 Transporte urbano	33
2.2.2.4 Métodos de Levitação – Eletromagnética (EML)	37
2.2.2.5 Métodos de Levitação – Eletrodinâmica (EDL).....	40
2.2.2.6 Métodos de Levitação – Supercondutora (SML).....	41
2.2.2.7 Sistema MagLev-Cobra	42
2.2.3 Veículo Leve sobre Trilhos - VLT.....	46
2.2.4 Monotrilho.....	50
2.2.5 Aeromóvel.....	55
2.3 Estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental.....	56
2.3.1 Análise técnica.....	57
2.3.2 Análise financeira	58
2.3.3 Análise ambiental	58
2.4 Avaliação de projetos de transporte público.....	61
2.5 Tópicos conclusivos.....	62
3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	64

3.1	Definições iniciais.....	64
3.2	Demanda.....	65
3.3	Análise técnica-operacional	65
3.4	Cenários.....	66
3.5	Tópicos Conclusivos	67
4.	APLICAÇÃO DO ESTUDO	68
4.1	Área de estudo.....	68
4.2	Demanda.....	69
4.3	Aspectos Ambientais.....	70
4.4	Cálculo da Frota Total	73
4.5	Aquisição dos Veículos	74
4.6	Custo de implantação	76
4.7	Custo de operação.....	83
4.8	Tópicos conclusivos.....	94
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	95
5.1	Análise econômica.....	95
5.2	Análise ambiental	97
6.	HIERARQUIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS	99
7.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Faixas de capacidade dos sistemas de transporte coletivo.	17
Figura 2 – Impacto do aumento da velocidade máxima no tempo de viagem para diferentes extensões de linha.	19
Figura 3 – Países com sistemas de trens de levitação magnética em operação.	37
Figura 4 – Levitações eletromagnéticas: a) guiamento com ímãs e trilho integrados b) guiamento com ímãs e trilho separados.	38
Figura 5 - Detalhe do sistema de levitação eletrodinâmica (EDL).	40
Figura 6 - Desenho esquemático dos componentes do veículo MagLev-Cobra.	43
Figura 7 – Países com sistemas de VLT em operação.	47
Figura 8 – Países com sistemas de monotrilho para transporte urbano em operação. ...	50
Figura 9 - a) Ilustração do motor elétrico. b) Ventilador industrial projetado para a propulsão do veículo.	56
Figura 10 - Fluxograma das etapas definidas para análise da viabilidade econômica e ambiental dos meios.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo da revisão sistemática.....	22
Tabela 2 – Classificação dos sistemas de trens de levitação magnética em operação. ..	27
Tabela 3 – Comparação das características dos sistemas de transporte de massa.....	30
Tabela 4 – Comparação da velocidade entre os trens de alta velocidade e o MagLev ..	30
Tabela 5 – Comparação das acelerações entre o sistema ICE e o MagLev.....	30
Tabela 6 – Nível de ruído entre os diversos TAV e o Transrapid.	31
Tabela 7 – Comparação entre MagLev e Trens de alta velocidade em características críticas do sistema.....	32
Tabela 8 – Comparação entre trens de levitação magnética urbanos e trens convencionais	33
Tabela 9 - Projetos de MagLev de alta velocidade.....	36
Tabela 10 - Projetos de MagLev Urbano no mundo	36
Tabela 11 - Características operacionais do veículo MagLev-COBRA.....	44
Tabela 12 - Prós e contras dos sistemas de levitação	45
Tabela 13 - Características operacionais do veículo VLT-Rio.....	48
Tabela 14 - Custos de implantação e de operação de diversos sistemas VLT.	49
Tabela 15 – Custos de implantação e de operação de diversos sistemas Monotrilhos...	51
Tabela 16 - Características operacionais do veículo Monotrilho.	54
Tabela 17 - Planilha simplificada de custos da implantação do sistema Aeromóvel no Aeroporto Salgado Filho/RS.	55
Tabela 18 - Quadro comparativo com as características operacionais das tecnologias urbanas abordadas.....	63
Tabela 19 – Embarque de passageiros por faixa horária no Eixo Anhanguera.	70
Tabela 20 – Consumo de energia elétrica anual por linha.....	71
Tabela 21 – Inventário sobre dados de veículos de monotrilho	71
Tabela 22 – Indicadores ambientais em função da ocupação do veículo MagLev-Cobra.	72
Tabela 23 – Indicadores ambientais em função da ocupação do veículo MagLev dimensionado.....	72
Tabela 24 - Valores de parâmetros de emissões de CO ₂ e de consumo energético.	73
Tabela 25 – Cálculo da frota operacional para cada sistema de transporte.....	73
Tabela 26 – Resumo da frota total para cada sistema.....	74
Tabela 27 – Custos de aquisição de veículos para a tecnologia VLT em operação no mundo.	74
Tabela 28 – Custos de aquisição de veículos para a tecnologia Monotrilho em operação no mundo.....	74
Tabela 29 – Dimensionamento do veículo MAGLEV	75
Tabela 30 – Custos detalhados da aquisição de 14 veículos de levitação magnética.....	76
Tabela 31 – Custos detalhados de implantação do VLT de 13,5km.	77
Tabela 32 – Custos detalhados de implantação do Monotrilho de 17,82 km.....	79
Tabela 33 – Dimensionamento dos pilares para as estações e terminais do MagLev no Eixo Anhanguera.	80

Tabela 34 – Custos detalhados de Implantação do MagLev de 13,6 km.	81
Tabela 35 – Compilado dos custos de implantação dos sistemas com ajuste do IGP-M.	83
Tabela 36 – Quadro de pessoal da área de operação.	85
Tabela 37 – Quadro de pessoal da área de manutenção.	86
Tabela 38 – Investimento total em manutenção de via permanente e em infraestrutura	90
Tabela 39 – Custos de energia calculados nos meios de transporte estudados.	91
Tabela 40 – Resumo dos custos de operação anuais detalhados dos sistemas estudados.	92
Tabela 41 – Custos detalhados de despesas administrativas dos sistemas estudados	92
Tabela 42 – Custos anuais de operação, manutenção e despesas administrativas no ano de 2019.	94
Tabela 43 – Valores de implantação, operação e aquisição dos veículos ajustados pelo IGP-M.	95
Tabela 44 – Resultado da análise econômica por cenários.	96
Tabela 45 – Projeção da demanda anual de projeto.	97
Tabela 46 – Resultado da análise ambiental por cenários em 30 anos de operação.	98
Tabela 47 - Hierarquização das Tecnologias.....	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Projeção percentual da emissão de CO ₂ mundial em relação à energia.....	59
Gráfico 2 – Projeção de cada modo de transporte na emissão de GEE no setor de transporte no Brasil.....	60

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da ONU, 55% da população mundial viverá nas áreas urbanas até 2025, gerando maior necessidade de locomoção e demanda de novas soluções de sistemas de transportes com maior eficiência energética e baixos impactos urbanos e ambientais (IPCC, 2014).

Sabe-se que os GEE – Gases de Efeito Estufa – lançados à atmosfera pela natureza e pela ação humana absorvem parte da radiação infravermelha refletida na Terra, dificultando seu escape para o espaço e potencializando o aquecimento do planeta. A quantidade desses gases, principalmente o CO₂ resultante da atividade humana, tem crescido gradativamente e provocado um aumento anual na temperatura média do globo. No pior cenário, sem esforços de redução de emissão de GEE por parte das nações, é previsto que a temperatura média suba até 4,8 °C ao longo do século XXI (IPCC, 2014).

Em vista disso, algumas nações assumiram compromissos de reduzir os gases de efeito estufa em determinados setores, incluindo o de transportes, responsável por 23% do total de emissões globais oriundas do consumo de combustíveis fósseis (OECD, 2010). Dentre os GEE emitidos por veículos citam-se o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). O CO₂ é o principal gás em termos de quantidade emitida, por isso é usado como referência.

No Brasil, 85% do transporte público é realizado por ônibus, que disputa espaço viário com o transporte individual e reduz sua velocidade operacional. Tal concorrência diminui a demanda e aumenta o custo de transporte público (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2017).

Contudo, uma alternativa para reduzir esses impactos socioambientais é o modo de transporte por tração elétrica, do qual fazem parte os veículos com levitação magnética (MagLev). Estes demonstram ser uma alternativa promissora, em comparação aos meios de transporte de massa convencionais, devido à sua rapidez, ao seu conforto, à sua confiabilidade, à sua segurança e à sua contribuição para a organização do tráfego urbano. (SUCENA & STEPHAN, 2012).

Os sistemas de transportes por levitação magnética são aceitos como métodos de transporte ferroviário que usam forças eletromagnéticas para sua sustentação e movimentação ao longo da via (Gou, 2018). Existem três métodos de levitação: eletromagnética (EML), eletrodinâmica (EDL) e por supercondutores (SML).

A SML baseia-se na propriedade diamagnética dos supercondutores para a exclusão do campo magnético no seu interior. Sua maior evolução, se comparada aos outros métodos de levitação magnética, é a estabilidade, que possibilita o uso de materiais magnéticos mais esbeltos, reduzindo seu custo de construção.

Desse modo, enquanto as técnicas de levitação eletromagnética e eletrodinâmica demandam estruturas de concreto armado mais robustas, a estrutura necessária para suportar os esforços gerados pelos veículos supercondutores é mais esbelta.

Comparativamente ao tradicional sistema roda-trilho, a levitação apresenta como diferencial positivo a carga atuante estar distribuída ao longo do veículo, e não como carga pontual, além do silêncio e da possibilidade de vencer maiores aclives

1.1 Problema de pesquisa

Os veículos de levitação magnética por supercondutores são tecnologias recentes e possuem uma lacuna nos trabalhos científicos quanto à sua análise de viabilidade. Partindo disso, se faz necessário estudar quais aspectos da análise técnica, econômica e ambiental dos veículos de levitação magnética influenciam na escolha do meio em um sistema de transporte de média capacidade.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo da pesquisa é analisar as características dos veículos de levitação magnética sob os aspectos técnicos, econômicos e ambientais e comparar com outros meios de transportes de média capacidade. Para balizar o estudo, serão realizadas comparações com outros meios de transporte ferroviários de média capacidade, como o VLT e o Monotrilho.

Os objetivos específicos são:

- Detalhamento do consumo energético e emissões do MagLev.
- Cálculo dos custos de implantação e de operação do MagLev.
- Comparação do MagLev com outras tecnologias similares.

1.3 Relevância

O método de validação de sistemas denominado TRL (*Technology Readiness Levels*), adotado pela Organização Internacional de Padronização (ISO, em inglês), quantifica o nível do processo de maturação de um sistema desde a etapa de projeto (TRL 1) até a sua operação real (TRL 9). No nível TRL 6, a tecnologia deve ser demonstrada mediante um

modelo representativo, feito em escala de engenharia e testado em local relevante, com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema em ambiente externo sob ação de intempéries.

No nível seguinte (TRL7), o protótipo deve ser construído em uma escala bem próxima ou exatamente nas mesmas proporções do sistema operacional planejado, e a demonstração da tecnologia deve ocorrer em um ambiente efetivo para sua operação. Esta etapa visa assegurar a engenharia do sistema e a confiança da gerência no seu desenvolvimento (ISO, 2013). Exatamente nessa etapa encontra-se o MagLev-Cobra, o veículo de levitação magnética por supercondutores produzido pela equipe do Laboratório de Supercondutores – LASUP/UFRJ –, com operação semanal em linha experimental de 200 metros ligando o Centro Tecnológico 1 ao 2 da UFRJ.

O presente trabalho pretende verificar a viabilidade da tecnologia, por meio de aplicações teóricas. A etapa é importante para evitar surpresas indesejáveis no real momento da implantação. Além disso, a dissertação visa proporcionar novos horizontes de pesquisa, sob a ótica de desenvolvimento da ciência brasileira, em relação aos componentes do sistema e/ou processo de levitação.

1.4 Delimitação da pesquisa

O presente trabalho se limita à comparação entre veículos de levitação magnética e sistemas ferroviários de média capacidade de transporte em razão de dois fatores: 1) baixa emissão de poluentes – se comparado aos sistemas de transporte movidos a combustíveis fósseis –; 2) projeção dos custos de implantação e de operação.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é constituída de cinco capítulos – além da introdução, que trata das considerações iniciais assim como dos problemas, dos objetivos, da relevância e da delimitação da pesquisa. No segundo capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica sobre os sistemas de transporte metroferroviários, abordando dentre eles os veículos de levitação magnética, os Veículos Leves sobre Trilhos – VLT – e os Monotrilhos. Este capítulo também descreve a abordagem para estimativas de custos de implantação e de operação dos sistemas de transportes, além de tratar das emissões de gases de efeito estufa. Também são apresentados os tópicos conclusivos contendo algumas análises sobre os casos estudados nesta revisão.

Enquanto o terceiro capítulo apresenta o procedimento metodológico, explicitando todas as etapas da pesquisa, o quarto aplica o método em um estudo de caso calculando a capacidade, a frota, os custos de implantação e de operação, os fluxos de caixa e os fatores ambientais, como a emissão de gases poluentes e o consumo energético.

O quinto capítulo, por fim, trata da análise dos resultados obtidos pela aplicação do método e propõe uma tabela de hierarquização das tecnologias segundo aspectos econômicos e ambientais. Ao final da dissertação, são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos ao longo da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica sobre sistemas de transporte de alta velocidade, trens de levitação magnética, VLT, Monotrilho e Aeromóvel, apresentando suas definições, aplicações e características operacionais.

Em seguida, o trabalho destaca a abordagem para custos de implantação e de operação dos sistemas de transportes com os principais tópicos estudados pela literatura. Também trata das emissões de gases de efeito estufa comparando os valores obtidos entre os sistemas movidos a combustíveis fósseis e os movidos a energia elétrica de média capacidade.

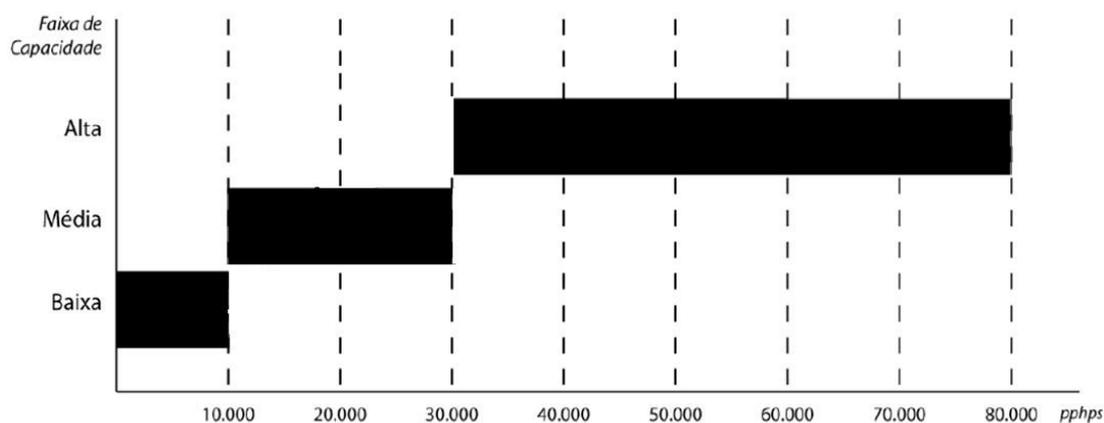
Ao final do capítulo, os tópicos conclusivos contêm os aspectos que serão trabalhados ao longo da dissertação.

2.1 Classificação dos modos de transporte em função da capacidade

De acordo com sua capacidade, o transporte urbano de passageiros pode ser classificado em: transporte de alta, média e baixa capacidade (FERRAZ e TORRES, 2004, VUCHIC, 2005, RICCARDI, 2011, ISODA, 2013).

A capacidade é o quanto se oferta dentro dos critérios de projeto do sistema. Ela é medida em passageiros/hora.sentido (*pphps*), que corresponde ao número de pessoas que passam por um ponto da via ou em cada sentido em um determinado intervalo de tempo. As faixas de capacidade nos sistemas de transporte coletivo são arbitrárias para cada autor, mas a Figura 1 mostra um compilado dessas faixas.

Figura 1 – Faixas de capacidade dos sistemas de transporte coletivo.



Fonte: Adaptado de Isoda (2013) e Vuchic (2007).

Com base no apresentado, verifica-se que os sistemas de baixa capacidade são aqueles cuja capacidade é de até 10 mil *pphps*, como ônibus, vans, BRT e táxis. Os de média

capacidade são aqueles que alcançam entre 10 e 30 mil *pphps*, como o VLT, o Monotrilho e o Aeromóvel. Por fim, os sistemas de alta capacidade comportam entre 30 e 80 mil *pphps*, como os trens metropolitanos e o metrô (ISODA, 2013; VUCHIC, 2007).

2.2 Sistemas de Transportes Ferroviários

No Brasil, a energia consumida pelo setor de transportes em 2012 representou 31,3% da energia total. A quantidade de gases emitidos pelo setor de transportes do Brasil chegou a 209,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono (MtCO₂-eq), correspondendo a 48,8% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira (EPE, 2014).

No contexto das regiões metropolitanas, as relações econômicas e sociais têm resultado em concorrência pelo espaço viário entre veículos de transporte individual e veículos de transporte público tem levado à formação de congestionamentos e ao aumento dos tempos e dos custos das viagens. Essa situação, ainda, contribui para o crescimento das taxas de acidentes, para a piora nos índices de poluição ambiental e para a aceleração do consumo energético.

Nesse sentido, a grande demanda de viagem por transporte urbano torna os sistemas elétricos ferroviários opções atrativas para as metrópoles em razão de suas vantagens, como a eficiência do uso de terra, as altas velocidades, os baixos níveis de ruído, de poluição e de consumo energético, além da possibilidade de operação em altas inclinações (Vuchic, 2002; Lee *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2016; Amaral *et al.*, 2018).

O transporte de passageiros sobre trilhos abrange uma diversidade de modalidades que se distinguem quanto à capacidade de transporte, à segregação de via, ao espaço no uso do solo, à velocidade máxima e à tecnologia de tração. Alguns exemplos de sistemas são: metrô, trens, VLT, monotrilho e veículos de levitação magnética.

No âmbito dos transportes terrestres de alta velocidade, existem basicamente duas tecnologias distintas – os trens de alta velocidade e os trens de levitação magnética. Ambos proveem altas velocidades operacionais, porém possuem grandes diferenças quanto às suas especificações técnicas, aos custos e aos impactos ambientais.

Em função da complexidade das tecnologias dos trens de alta velocidade e do MagLev, não é simples escolher o mais eficiente ou o que oferece melhor custo-benefício. Em um processo de tomada de decisão, é fundamental que haja uma descrição das respectivas alternativas, com o custo detalhado dos elementos e a apresentação dos impactos ambientais que cada tecnologia pode provocar.

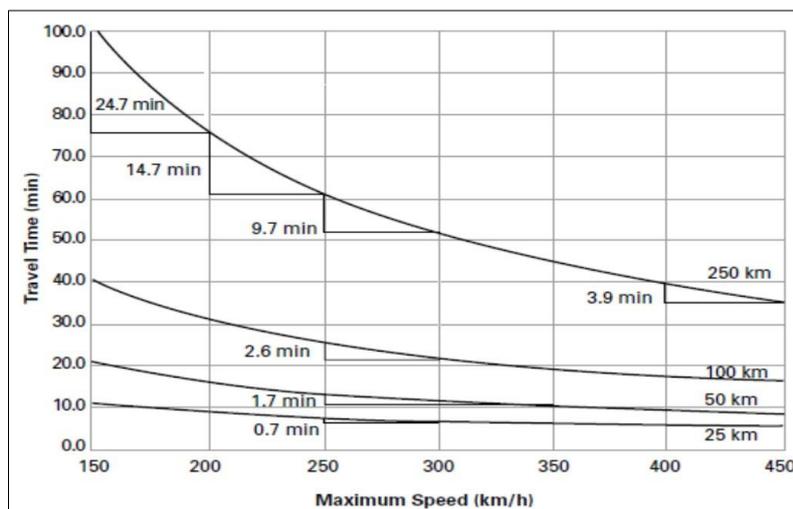
2.2.1 Trens de Alta Velocidade - TAV

Os trens de alta velocidade representam os mais avançados sistemas roda-trilho de transporte de passageiros, com vias segregadas. Esses trens funcionam a velocidades máximas operacionais de 300 km/h, mas já foram testados a mais de 500 km/h, em uma combinação de eletrificação com componentes avançados, sendo o estado da arte dos trens convencionais (Vuchic, 2002). Segundo dados da UIC – *International Union of Railways*, existem 44 sistemas de trens de alta velocidade ao redor do mundo, sendo os sistemas TGV (França), Shinkansen (Japão) e ICE (Alemanha) os mais conhecidos.

Por oferecerem confiabilidade, conforto e segurança para os passageiros, os TAV são os mais eficientes para grandes demandas. O transporte terrestre de alta velocidade é um sistema guiado fisicamente em vias totalmente monitoradas com controle de sinal eletrônico à prova de falhas. Isso fornece não apenas uma ordem de magnitude maior de segurança, mas também uma operação confiável, mesmo sob condições de elevada capacidade (VUCHIC, 2002).

Segundo Vuchic (2002), a variação da velocidade máxima de um sistema de transporte de alta velocidade interfere cada vez menos na redução do tempo de viagem, como indicado na figura abaixo. Além disso, o aumento no custo de implantação do sistema não compensa o acréscimo de velocidade máxima.

Figura 2 – Impacto do aumento da velocidade máxima no tempo de viagem para diferentes extensões de linha.



Fonte: Vuchic (2002).

Além da questão da velocidade, o alto desempenho e a compatibilidade ambiental também são pontos necessários do trem de alta velocidade. Todos esses aspectos diminuem o tempo de deslocamento entre um centro urbano e suas vizinhanças satélites

proporcionando uma opção acessível para combater os engarrafamentos (AMARAL *et al.*, 2018).

2.2.2 Veículos de Levitação Magnética

Para compreender o estado da arte dos estudos sobre levitação magnética, foi realizada uma revisão sistemática envolvendo artigos científicos que pesquisavam sobre veículos de levitação magnética. O resultado foi a elaboração de uma tabela com 26 artigos compreendendo vários aspectos desses veículos, como, por exemplo, sua aplicação em um sistema e o estudo de componentes do veículo e sua respectiva influência no contexto geral.

Dentre as pesquisas selecionadas, vale ressaltar o trabalho de Ahmed (2014), que destaca os impactos positivos, como qualidade de vida e sustentabilidade, na aplicação dos sistemas MagLev para transporte público. Amaral *et al.* (2018) se utilizam das análises custo-benefício e do conceito RAMS – *Reliability, Availability, Maintainability and Safety* – para validar o uso do MagLev em cidades médias, corroborando a ideia de Lutzemberg (2017), que atribui a viabilidade em função de baixo ruído e de confiabilidade.

Lee *et al.* (2006) afirmam que o trem MagLev é considerado operacional tanto para transporte urbano (EML) quanto para intermunicipal (EDL). D'Ovidio *et al.* (2003) também concluíram certas vantagens do MagLev no uso do transporte urbano sob o aspecto da estrutura do veículo em si – como a estabilidade dinâmica e a redução de ruídos, de vibrações e do peso total.

Os estudos de Liu (2004), voltados para a comparação entre o MagLev e o transporte de alta velocidade (TAV), concluíram que ambos são tecnicamente viáveis, com o MagLev alcançando maiores velocidades por não haver contato roda-trilho, enquanto os TAV possuem *headway* menores (3 min versus 15 min) e facilidades quanto a operações intermodais.

A pesquisa de Kluehspies (2017) leva a crer que no futuro qualquer restauração ou manutenção de rotas de alta velocidade será baseada na tecnologia MagLev. As pesquisas de Stephan, por sua vez, explicam a tecnologia MagLev-Cobra, detalhando as etapas de construção do veículo, o processo de validação em que o sistema se encontra e quais as principais vantagens da levitação supercondutora em comparação com sistemas ferroviários roda-trilho e até com outras técnicas de levitação.

Ao contrário da maioria dos artigos encontrados, Vuchic e Casello (2002) apontam leve vantagem do MagLev sobre os transportes de alta velocidade no que se refere ao alcance de velocidades máximas. Os TAV, porém, assumem grande vantagem quanto à compatibilidade com outros transportes, além de terem menor custo de implantação.

Tabela 1 - Resumo da revisão sistemática

Artigo	Objetivo	Revisão Bibliográfica	Metodologia	Conclusão
AHMED (2014) - <i>Comprehensive study and review on MagLev train system</i>	Conceito de trens eletromagnéticos e mecanismo de sistema de controle	Conceito de Levitação EDL e EML, com seus prós e contras.	Definição de técnicas de levitação. Diagramas do sistema de controle, levitação e propulsão	Impactos positivos como qualidade de vida e sustentabilidade
AMARAL ET AL (2018) - <i>MagLev Technology Review for Improving Urban Mobility</i>	Revisão das tecnologias de MagLev para caracterizar o uso em cidades com mais de 300 mil habitantes.	Conceito de trens convencionais e sistemas de levitação magnética.	Comparação entre trens convencionais e tecnologias MagLev.	RAMS, análise custo-benefício, emissões de CO ₂ e uso do MagLev em cidades médias.
CHEN ET AL. (2016) - <i>Parallel control and management for high-speed MagLev systems</i>	Apresentar uma abordagem de controle paralelo e gerenciamento do sistema MagLev de alta velocidade (HMS).	3 níveis de controle do sistema HMS: Planejamento, Operação e Análises Emergenciais. Estrutura do sistema de controle do HMS.	Modelo artificial (computacional) de sistema HMS, testes de credibilidade, plataforma de simulação.	Comparação entre o sistema artificial e o sistema real implica soluções eficientes em tempo real e estabelece base para o desenvolvimento de sistemas HMS mais avançados.
D'OIDIO ET AL (2003) - <i>Light Rail MagLev With Superconductor Materials System Design</i>	Discutir as principais características de um sistema de MagLev para transporte urbano (LRM).	Sistema de MagLev para transporte urbano (LRM), com dimensionamento do veículo e corredor eletromagnético.	Análise de elementos finitos para o corredor eletromagnético.	O sistema LRM apresenta vantagens quanto à estabilidade dinâmica e à redução de ruídos, de vibrações e do peso do veículo.
DENG (2017) - <i>HTS Magnetic Levitation Vehicles: Dynamic Characteristics while Running on a Ring Test Line</i>	Investigar as características dinâmicas do sistema MagLev HTS e avaliar sua segurança ao operar em uma linha de teste circular.	Veículos MagLev HTS (supercondutores de alta temperatura) e dimensionamento da linha de teste circular.	Análise de parâmetros como altura de levitação, deslocamento lateral e vibrações do veículo.	Tendência de inclinação com o aumento da velocidade. Altura de levitação reduzida e superelevação em curvas devem ser adotadas para maior segurança do veículo.
KLUEHSPIES (2017) - <i>MagLev trends in public transport: The perspectives of MagLev transportation systems</i>	Analisar se o MagLev é uma tendência de tecnologia relevante, a partir de certos aspectos.	Comparação entre MagLev e transporte terrestre de alta velocidade por 8 aspectos: barreiras de mercado, integração modal, infraestrutura, meio ambiente, conforto, segurança, economia e expectativas.		No futuro, a restauração ou a manutenção de rotas de alta velocidade será baseada na tecnologia MagLev.
LEE (2013) - <i>Design feasibility of superconducting-hybrid magnetic levitation system for high-speed MagLev</i>	Propor um estudo de viabilidade para projetar o MagLev supercondutor híbrido eletromagnético	Levitação Eletromagnética com bobina de supercondução. Especificações das bobinas e do veículo supercondutor de alta temperatura.	Modelos matemáticos como modelos matriciais, lineares quadráticos. Simulação de métodos de elementos finitos.	A corrente da bobina de controle gerada para manter a altura de levitação muda a distribuição do campo magnético e leva ao aumento da bobina HTS atual.

LEE, H.W, KIM, K.C., LEE, J (2006) - Review of MagLev train Technologies	Analisar e resumir as tecnologias MagLev do ponto de vista da engenharia elétrica e assimilar os resultados de obras nas últimas três décadas.	Sistemas roda-trilho. Aspectos dos sistemas MagLev como a levitação, a propulsão, o guiamento, a transferência de energia para o veículo. Projetos de MagLev ao redor do mundo.	Tabelas de comparação operacionais e características entre os sistemas MagLev e os convencionais roda-trilho. Tabelas de classificação dos MagLev em operação no mundo.	O trem MagLev é considerado operacional tanto para transporte urbano (EML) quanto para intermunicipal (EDL). MagLev possui melhores atributos ambientais e menor custo de manutenção em relação ao roda-trilho convencional.
LIU (2004) - Comparing Operations Characteristics of High-Speed Rail and MagLev Systems: Case Study Beijing-Shanghai Corridor	Comparar os sistemas MagLev e o trem de alta velocidade (TAV) e suas potenciais implantações nos corredores de Pequim e Xangai.	Sistemas terrestres de transporte de alta velocidade: trens de alta velocidade e tecnologias MagLev.	Comparação de performance entre os TAV e as tecnologias MagLev sob aspectos de velocidade, aceleração, capacidade, segurança, confiabilidade, consumo energético, ruído.	TAV e MagLev são tecnicamente viáveis. O MagLev alcança maiores velocidades por não haver contato roda-trilho. O <i>headway</i> do TAV é menor (3 min vs 15 min). TAV oferece vantagens quanto a operações intermodais.
LIU ET AL (2020) - Adaptability Study of MagLev Vehicle Bogie Frame at 600 km/h	Estudar a adaptabilidade e a resistência da estrutura do truque a uma velocidade de 600 km/h.	Veículos MagLev de alta velocidade. Estrutura do quadro de truque do veículo.	Análise de elementos finitos Carregamento estático e esforços. Modelos dinâmicos do veículo. Simulações de esforços na estrutura.	A estrutura do truque foi submetida a esforços de carga e suporta velocidades de 600 km/h. Os suportes dianteiros e traseiros podem ser otimizados para melhorar a segurança do truque.
LONG, CHEN E FAN (2017) - Middle - low speed maglev train suspension control system common cause failure risk analysis	Propor o método de modelagem de risco da árvore de falha, considerando a falha de causa comum.	Métodos de avaliação probabilística de falhas. Modelos de parâmetros para falhas de causa comum.	Algoritmos de árvore de erros implícitos, considerando falhas comuns. Diagrama de módulo único do sistema de controle de suspensão	Os resultados do teste mostram que qualquer erro comum causará erro notável para análise de risco do sistema. É preciso haver estudos completos sobre inspeção de risco de benefícios de grupo de eventos de falha comum.
LUTZEMBERG (2017) - Automated people mover a comparison between conventional and permanent magnet MAGLEV systems	Demonstrar como a aplicação do MagLev urbano autônomo pode competir com o roda-trilho.	Principais características do MagLev urbano: o veículo, a via, os sistemas de propulsão, elétrico, de controle e de levitação.	Modelagem por elementos finitos; modelagem de simulação numérica, baseado na linguagem de programação Modelica.	MagLev consome 10% menos que o APM convencional em termos de alimentação e sua implantação custa menos de forma geral. Em sistemas de baixa velocidade, o MagLev parece ser uma viável solução custo-benefício, em função de baixo ruído e de confiabilidade.
MATTOS ET AL (2016) - MagLev-Cobra Operational Tests	Apresentar os resultados de testes realizados com um veículo MagLev supercondutor de 4 módulos numa linha experimental de 200m.	As 4 etapas do projeto MagLev-Cobra. Dimensionamento do veículo e linha experimental	Sensores localizados em diversos pontos do veículo para medir a altura do criostato. Medições em diferentes ocupações e nos 2 sentidos da linha.	Necessário haver mais trabalhos para certificar o equipamento de acordo com os padrões internacionais antes da comercialização e da operação.

NETO (2020) - <i>An Accurate GNSS-Based Redundant Safe Braking System for Urban Elevated Rail MagLev Trains</i>	Propor um sistema de frenagem automática de baixo custo para trens MagLev	Sistemas GPS, sistemas de frenagem automática.	Algoritmos para coordenadas do veículo, das estações e correção da taxa de erros do GPS. Sistemas de frenagem alimentada por rede wireless	O sistema pode ser implantado em um cenário de múltiplas estações com baixo custo de hardware e de implantação.
POWELL (2003) - <i>MAGLEV 2000 Urban Transit System</i>	Apresentar a aplicação do MagLev urbano M2000.	Principais características do MagLev urbano M2000: operacional, levitação, dimensões do veículo, consumo energético.	6 critérios de avaliação: 1) segurança e compatibilidade com o ambiente. 2) custos de implantação e de operação. 3) conforto do sistema. 4) impacto ao ambiente construído. 5) subsídios. 6) integração modal.	O sistema proposto tem uma operação segura, baixos custos, mais confortáveis que metrô, ônibus ou VLT; impactos mínimos ao ambiente construído, poucos subsídios e eficiente integração intermodal.
SEO (2008) - <i>Service Availability of the Urban MagLev System in Korea</i>	Estudar sobre modelos de RAM típicos medindo o desempenho do serviço de um sistema de metrô e do MagLev além de um modelo de performance de serviço.	Dimensões da linha MagLev (6,1 km), características do MagLev EML urbano e motor linear primário de indução. Modelos RAM de avaliação e principais parâmetros.	Exemplos de modelos de confiabilidade e de eficiência do sistema.	Por ser uma tecnologia inovadora, com poucos projetos ao redor do mundo em operação e linhas de curtas extensões, não há dados significativos e estáveis sobre RAM e desempenho de serviço com precisão suficiente para sistemas MagLev.
SHAWKI (2014) - <i>Design and Implementation of a Magnetic Levitation System Using Phase Lead Compensation Technique</i>	Descrever o projeto e a implementação de um sistema de levitação magnética usando a técnica de compensação de fase.	Funcionamento do MagLev, suas vantagens operacionais e descrição dos subsistemas.	Modelos matemáticos com parâmetros eletromagnéticos como resistência, indutância e corrente de fluxo. Equações matemáticas por intermédio do MATLAB.	O sistema é difícil de implementar devido à sua não-linearidade intrínseca. Experimentando com a técnica de propulsão com força de repulsão pode trazer um novo patamar no setor de transporte e comunicação.
STEPHAN (2012) - <i>Superconducting light rail vehicle: A transportation solution for highly populated cities</i>	Descrever a construção e as vantagens operacionais do veículo MagLev supercondutor em comparação com sistemas rodoviários.	Métodos de levitação: EML, EDL e SML. Nichos de aplicação, vantagens tecnológicas. Etapas da implantação do MagLev-Cobra.		O artigo mostra que o MagLev-Cobra é viável nos aspectos ambientais, econômicos, técnicos e sociais.
STEPHAN (2018) - <i>UFRJ Campus_A City of Innovative</i>	Descrever o desenvolvimento do projeto MagLev-Cobra, desde sua prova de conceito até uma possível implantação.	Plano Diretor UFRJ 2020. Conceito do MagLev-Cobra, com suas vantagens operacionais, econômicas e ambientais. Métodos de levitação no mundo.	Etapas de desenvolvimento de um novo produto. Desenvolvimento do projeto MagLev-Cobra. Níveis de preparação da tecnologia.	MagLev-Cobra é uma tecnologia promissora para Transporte Urbano. Também desdobra outras oportunidades como a produção de ímãs de terras raras; o desenvolvimento de conversores eletrônicos de potência.

STEPHAN E AMARO (2020) - <i>The Vital Contribution of MagLev Vehicles for the Mobility in Smart Cities</i>	Mostrar que os veículos de levitação magnética podem cumprir a demanda e se adequar aos conceitos de rede inteligente.	Técnicas de levitação magnética aplicadas ao transporte. Descrição do protótipo do MagLev-Cobra. Estado da arte dos trens MagLev	Comparação da tecnologia MagLev-Cobra com outras tecnologias MagLev. Dados do projeto experimental MagLev-Cobra. Operação do MagLev-Cobra como rede inteligente.	As etapas dos níveis de preparação da tecnologia MagLev-Cobra.
STEPHAN ET AL. (2016) - <i>Projeto MagLev Cobra - Levitação Supercondutora para Transporte Urbano</i>	Apresentar as principais características do Projeto MagLev Cobra.	Técnicas de levitação magnética aplicadas ao transporte.	Descrição do projeto MagLev-Cobra com suas principais vantagens. Testes Operacionais.	O artigo mostra que o MagLev-Cobra é viável nos aspectos ambientais, econômicos, técnicos e sociais.
VUCHIC E CASELLO (2002) - <i>An Evaluation of MagLev Technology and Its Comparison with High-Speed Rail</i>	Apresentar uma comparação sistemática entre os sistemas MagLev propostos, especialmente o Transrapid Alemão e os sistemas TAV.	Transportes terrestres de alta velocidade (tempo de viagem, velocidade máxima). Desenvolvimento do TAV e do MagLev.	Comparação entre TAV e sistemas MagLev (tempo de viagem, velocidades máximas, compatibilidade intermodal, custos totais, consumo energético, conforto, imagem do produto e impactos ao ambiente construído).	MagLev tem leve vantagem sobre o TAV em relação a velocidades mais altas. TAV tem grande vantagem quanto à compatibilidade com outros transportes. TAV tem menor custo de implantação, e os custos de operação do MagLev são incertos.
WANG ET AL (2019) - <i>Influence of the track structure on the vertical dynamic interaction analysis of the low-to-medium speed maglev train-bridge system</i>	Analisar o mecanismo de influência da estrutura da via MagLev na interação dinâmica vertical do sistema.	Análises dinâmicas do sistema MagLev trem-estrutura. Técnicas de levitação EML. Vibrações nos trens causados por irregularidades na via.	Modelo de interação dinâmica. Cálculo de modelo e análise modal (ANSYS).	Como a previsão da vibração da ponte será muito pequena quando o trilho-F não for considerado, o modelo de interação dinâmica vertical do sistema MagLev trem-via-estrutura de baixa-média velocidade deve ser considerado
WANG ET AL (2019) - <i>A Method for Calculating Capacity of A Medium Speed MagLev Line</i>	Estudar o método de cálculo da capacidade da linha MagLev de média velocidade.	Conceito de capacidade da linha MagLev de média capacidade e fatores que afetam as capacidades (zona de alimentação).	Modelo de cálculo de capacidade. Estrutura da Solução de Relaxação Lagrangeana.	O modelo e algoritmo propostos funcionam bem para calcular a capacidade da linha MagLev de média velocidade.
YAN (2004) - <i>Suggestion for selection of MagLev option for Beijing- Shanghai high-speed line</i>	Discutir a adoção do sistema MagLev ou do TAV para a linha por meio de comparação e de seleção científica.	A linha de demonstração do MagLev de Xangai. A linha Pequim-Xangai de alta velocidade, com seus custos e dimensões	Comparação das tecnologias em função de certos aspectos (custo de construção, demanda e tempo, cooperação internacional e local para desenvolver os projetos).	Provou que MagLev de alta velocidade é um conceito comparável e viável junto com a ferrovia de alta velocidade para a linha Pequim-Xangai.
ZHONG (2020) - <i>Optimal Operation for Medium-speed MagLev Trains</i>	Resolver os problemas de tempo ideal e energia ideal, especialmente considerando as restrições operacionais e de segurança, variando limites de velocidade e restrições de limite de controle dependentes de velocidade.	Dinâmica de trens MagLev de velocidade média. O problema de controle de tempo ideal para trens MagLev de velocidade média	Parametrização de controle (problema de programação não-linear). Matrizes de transformação de escala de tempo. Uso de Modelos matemáticos, através do MATLAB, para resolver restrições	O problema de controle ótimo resultante é convertido em um problema de otimização de dimensão finita pela aplicação de parametrização de controle e técnicas de transformação de escala de tempo.

Fonte: Reprodução própria.

A revisão sistemática foi de grande valia para obter *gaps* de pesquisa quanto aos sistemas de levitação magnética. Uma destas lacunas é a análise aprofundada da viabilidade econômica do MagLev, devido ao fato de não existirem muitos sistemas em operação. Sendo assim, os levantamentos feitos são baseados em projeções de custos e, em sua maioria, focados em custos de implantação.

Dito isso, mostra-se válida e extremamente importante uma pesquisa que aprofunde os custos de implantação e avance nos custos de operação para se ter uma perspectiva mais real de uma suposta aplicação do sistema, seja intermunicipal, seja transporte urbano.

2.2.2.1 Definição

A configuração do MagLev elimina a necessidade de rodas e de outras partes mecânicas, minimizando a resistência e permitindo excelentes acelerações e velocidades de cruzeiro próximas a 300 km/h (D’OVIDIO *et al.*, 2003).

Essa nova tecnologia é competitiva com os trens de alta velocidade, especialmente em alguns pontos de performance, como: velocidade, alta aceleração ($1,5 \text{ m/s}^2$), tempo e custo de viagem, conforto, frequência, acessibilidade, segurança, consumo energético e confiabilidade operacional quanto a atrasos referentes às condições climáticas ou a problemas no equipamento (YAN, 2004).

Os trens de levitação magnética são considerados viáveis tanto para transporte urbano quanto para viagens intermunicipais. Para o sistema de transporte urbano, a tecnologia eletromagnética com motor linear de indução é o mais aconselhável sob o ponto de vista do custo de construção. Já para viagens intermunicipais, os trens de levitação eletrodinâmica e motor linear síncrono são preferíveis pela confiabilidade e pelo maior controle (LEE *et al.* 2006).

A eliminação de engrenagens e o acoplamento reduzem a resistência ao rolamento, a massa equivalente e, por consequência, os custos de manutenção. Comparado com outros meios de transportes, o MagLev tem a vantagem de ser mais confortável, silencioso, seguro e alcança maiores inclinações, além de possuir raios de curvas menores e custos de manutenção reduzidos (D’Ovidio *et al.*, 2003; Yan, 2004; Ahmed, 2014; Stephan, 2018; Wang, 2019; Janic, 2020). O trem MagLev lida com a dinâmica urbana em guias suspensas ou em funcionamento subterrâneo, livre de interferências de outros modos de transporte. Assim, fornece um sistema de transporte rápido, confiável, sustentável e previsível (AMARAL *et al.*, 2018).

Existem dois modelos de aplicação para os trens de levitação magnética: os trens magnéticos de alta velocidade e os trens magnéticos de transporte urbano.

Segundo Fistola (2010), os trens magnéticos de alta velocidade conectam cidades com uma nova conotação ao criarem macroestruturas urbanas, uma vez que o tempo de trânsito entre esses centros é compatível com o tempo gasto dentro da cidade por meios convencionais de transporte. Assim, possibilitam esse tipo de mobilidade e alteram a extensão do espaço urbano com suas estruturas de interrelação.

A operação da linha de teste em Xangai de um MagLev de alta velocidade que opera a mais de 500 km/h foi inaugurada em 2004 e revelou algumas vantagens dos trens de levitação magnética de alta velocidade, como a baixa vibração, o baixo nível de ruído, o baixo consumo energético, a possibilidade de sobrepor altas inclinações e o baixo custo de manutenção (Yan, 2004). O custo de implantação de 30 km da linha teste foi de aproximadamente 47,43 milhões de dólares/km.

Apesar das vantagens listadas, autores como Albalate e Bel (2010) apontam que trens de alta velocidade exigem grandes investimentos em infraestrutura, que podem variar em função da cadeia de tomadas de decisões. Neste cenário, deve-se considerar a análise custo-benefício que leve em conta o impacto ambiental, os custos de operação e de implementação, as mudanças na mobilidade de pessoas e bens de consumo e a filosofia do governo.

Tabela 2 – Classificação dos sistemas de trens de levitação magnética em operação.

TIPO	CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS		
	Sistema	HSST (Japão)	Transrapid (Alemanha)
Levitação	EML	EML	EDL
Propulsão	LIM	LIM	LSM
Altura de Levitação	8 – 12 mm	8 – 12 mm	80 – 150 mm
Velocidade Máxima	100 km/h	500 km/h	581 km/h
Serviço	Baixa e Média velocidade, Curta distância	Alta velocidade, longas distâncias	Alta velocidade, longas distâncias
Características	Guiamento integrada	Guiamento separada	Ímãs supercondutores

Fonte: Lee *et al*, 2006.

2.2.2.2 Comparação de performance entre TAV e veículos de levitação magnética de alta velocidade

A implantação dos sistemas de transporte de alta velocidade tem como principal objetivo a facilidade de reduzir o tempo de viagem em longas distâncias. Para isso, é necessário examinar o ganho potencial de cada tecnologia no que diz respeito à velocidade, à aceleração, à capacidade, entre outras vantagens.

A diferença entre as velocidades máximas do MagLev e do TAV foi drasticamente reduzida nos últimos anos. As velocidades máximas dos dois modos estão no mesmo intervalo: para o MagLev (japonês) é de 551 km/h, enquanto o trem TGV francês atinge 515 km/h. No caso do TGV, vale ressaltar que o veículo foi testado em condições não operacionais, com poucos passageiros e um lastro maior do que o utilizado na operação real. Comparando as velocidades operacionais, o MagLev atua a 420 km/h, enquanto o trem francês opera a 350 km/h. Vuchic (2002) igualou as velocidades de ambos os sistemas e compreendeu que o aumento da velocidade do trem francês não resultaria em grandes vantagens, já que, para uma extensão de 100 km de linha, a redução de tempo de viagem seria de apenas 1 minuto.

As mudanças de vias do MagLev são muito mais complexas do que as dos trens convencionais. O sistema MagLev é concebido principalmente como um modo de oferecer viagens de longas distâncias em linhas únicas, portanto é menos capaz de atender a diferentes ramos ou a redes interconectadas. Sendo assim, os trens de alta velocidade têm maior compatibilidade intermodal e melhores aspectos de rede de transporte do que os trens de levitação magnética (VUCHIC, 2002).

Entretanto, a combinação entre sistemas de transporte de velocidades operacionais muito distintas cria barreiras mútuas e reduz a performance de ambos os sistemas (KLUEHSPIES, 2017).

Os trens de MagLev têm vantagens sobre os sistemas convencionais de roda-trilho como, por exemplo, a eliminação das rodas e não há desgaste nos trilhos, o que reduz os ruídos, as vibrações e os custos de manutenção. Além disso, o carregamento distribuído dos esforços na superestrutura contribui para a redução dos custos de construção da via. Por fim, os trens de MagLev são menos suscetíveis às condições climáticas e, devido à sua guia, nunca descarrilham (AHMED, 2014).

Apesar de a infraestrutura para a construção dos trens de MagLev de alta velocidade ser relativamente cara, eles são mais baratos na operação e na manutenção do que os trens convencionais. Os sistemas MagLev podem operar em velocidades muito altas quase sem deterioração e, portanto, são mais econômicos para operar do que os sistemas convencionais roda-trilho, que requerem manutenção intensiva regular e experimentam um desgaste exponencial com o aumento da velocidade.

No MagLev, todo o peso, a propulsão e as forças de orientação lateral do veículo são transferidos sem contato para o trilho, incluindo as forças de frenagem. Como resultado, os custos de manutenção dos sistemas MagLev são apenas uma fração dos custos dos sistemas tradicionais de roda-trilho.

Em operações tradicionais de roda-trilho, as rodas eventualmente sofrem desgastes e o atrito constante causa abrasão nos boletos dos trilhos. Um exemplo disso é que cada roda do trem alemão InterCity Express (ICE) perde cerca de 68 kg de aço através do atrito de aceleração e frenagem antes de ser retirado de serviço para manutenção após dois ou três anos. Os trens TGV e Shinkansen convencionais são igualmente sujeitos ao desgaste (THE INTERNATIONAL MAGLEV BOARD, 2017).

Através dos desenvolvimentos tecnológicos recentes, os custos de construção de infraestrutura para trens MagLev de alta velocidade convergiram para os mesmos níveis daqueles dos sistemas tradicionais de roda-trilho. Há, entretanto, um potencial para uma redução de custos ainda maior: em rotas com topografias mais complexas, os trens MagLev oferecem vantagens nos custos de construção da infraestrutura em função da sua possibilidade de alcançar inclinações maiores (10% contra 4% dos trens convencionais), o que permite transpor relevos sem a necessidade de construção de túneis e de outras obras de arte especiais que encareceriam a implantação do sistema (KLUEHSPIES, 2017).

Liu (2004) produziu uma tabela comparativa entre os sistemas de transporte de massa sob o ponto de vista de características como velocidade, influência no meio ambiente e alcance de altas inclinações e menores raios de curvatura, como indicado na tabela abaixo:

Tabela 3 – Comparação das características dos sistemas de transporte de massa

TIPO	VELOCIDADE	MEIO AMBIENTE	INCLINAÇÃO E RAIOS DE CURVA
Trem Roda-Trilho	C	C	B
MagLev	A	A	A
Trem com rodas de borracha	I	I	A
Monotrilho	B	A	A

Legenda: A – muito bom, B – bom, C – mediano, I – indefinido. Fonte: Liu (2004)

Além disso, o autor também fez análises comparativas das velocidades e das taxas de acelerações entre os TAV e o trem de levitação magnética de Xangai. Nestas tabelas, é possível destacar que as velocidades médias são próximas entre os sistemas escolhidos, mas a velocidade operacional e, principalmente, a aceleração do trem MagLev de alta velocidade de Xangai são superiores, o que indica ser uma aplicação viável para o transporte intermunicipal.

Tabela 4 – Comparação da velocidade entre os trens de alta velocidade e o MagLev

Velocidade	TGV	Shinkansen	ICE	MAGLEV
Velocidade Máxima (km/h)	514	443	407	550
Velocidade Operacional (km/h)	300	300	280	450
Velocidade Média (km/h)	250	260	200	290

Fonte: Liu (2004)

Tabela 5 – Comparação das acelerações entre o sistema ICE e o MagLev

Aceleração	ICE		MAGLEV	
	Distância (km)	Tempo (s)	Distância (km)	Tempo (s)
0-200 km/h	4,400	140	1,700	61
0-300 km/h	20,900	370	4,200	97
0-400 km/h	-	-	9,100	148
0-500 km/h	-	-	10,475	256

Fonte: Liu (2004)

De acordo com Liu (2004), a capacidade da linha é definida por alguns fatores, como o *headway*, a capacidade de passageiros sentados por carro e o número de carros. Dentre os trens de alta velocidade, o sistema Shinkansen tem a maior capacidade, com 1634

passageiros e 16 carros. Já o trem MagLev de Xangai tem 10 seções, com uma capacidade de 1192 passageiros sentados.

Outro fator determinante para a capacidade de um sistema é o *headway*. Nos sistemas TGV e Shinkansen, o *headway* mínimo é de 3 minutos (Trainweb, 2002). Segundo (Transrapid International Inc, 2002), o *headway* mínimo teórico de um sistema MagLev é de 5 minutos, apesar de nenhum sistema em operação já ter conseguido alcançar tal marca. Para fins de comparação, o MagLev de Xangai tem um *headway* de 10 minutos.

Além da capacidade e do *headway*, fatores como segurança e confiabilidade são levados em consideração na análise dos projetos. Estudos apontam que o sistema Shinkansen transportou 125 milhões de passageiros ao longo do ano de 2002, e em 99% das viagens realizadas o trem chegou ao destino no tempo exato ou com atraso de menos de 1 minuto (RAN, 2002).

O consumo energético do sistema Transrapid é bem econômico quando comparado aos outros modos de transporte, muito em função da sua levitação sem contato roda-trilho, de sua tecnologia de propulsão, do motor linear altamente eficiente e integrado com a via e em razão da baixa resistência aerodinâmica. Os fatores citados proporcionam uma redução de 20,0% a 30,0 % no consumo de energia em comparação aos trens de alta velocidade.

Comparando o nível de ruído em diferentes velocidades, é possível observar que a tecnologia MagLev é mais silenciosa que os trens de alta velocidade, principalmente entre 200km/h e 300km/h, como indicado na tabela abaixo.

Tabela 6 – Nível de ruído entre os diversos TAV e o Transrapid.

Ruído em dB(A)	TGV	ICE	TRANSRAPID
100 km/h	75,0	72,0	67,0
200 km/h	82,0	80,0	75,0
300 km/h	88,0	83,0	80,0
400 km/h	96,0	95,0	92,0

Fonte: Liu (2004)

Em seu artigo sobre a comparação entre os trens magnéticos e os trens de alta velocidade, Vuchic (2002) destacou parâmetros básicos para a análise, como os custos de construção, a compatibilidade intermodal e os impactos no ambiente construído.

Tabela 7 – Comparação entre MagLev e Trens de alta velocidade em características críticas do sistema

RECURSOS DO SISTEMA	MAGLEV	TAV
a. Fatores de tempo de viagem		
Velocidades máximas (em km/h)	420 – 450 km/h	300 – 350 km/h
Taxas de aceleração	Maior na faixa de velocidade superior	
b. Compatibilidade intermodal		
Conectividade de redes	Nenhum / linhas simples	Excelentes / redes extensas
Uso da infraestrutura existente	Novas e elevadas vias, túneis e estações necessárias	Novas linhas podem ser combinadas com linhas e estações existentes
c. Custos		
Custos de investimento	US\$ 12 - 55M/km (US\$ 19 - 88M/milha)	US\$ 6 - 25M/km (US\$ 10 - 40M/milha)
Custos de operação e de manutenção	Incerta	Conhecido
Consumo de energia	Mais alta que o HSR	
d. Fatores adicionais		
Conforto de direção	Superior	
Imagem do sistema / atração do passageiro	Excelente, ainda mais interesse da inovação	Excelente, maior acessibilidade às redes.
Impacto nos arredores	Baixo barulho e vibração	Ruídos normalmente no padrão

Fonte: Vuchic (2002).

De acordo com Vuchic (2002), o custo de implantação dos terminais do MagLev-Transrapid é substancialmente alto, principalmente em túneis, devido ao seu perfil maior. No entanto, os trens de alta velocidade, por usarem trechos em áreas centrais onde o custo de construção é mais elevado, têm um custo de investimento significativamente superior ao do MagLev. Segundo Yan (2004), o custo de construção de uma ferrovia é diretamente proporcional à velocidade de operação do projeto, ou seja, quanto maior a velocidade de operação, maior o custo de construção.

Por questões de conforto e de segurança, os veículos de levitação magnética, em sua maioria, são construídos em vias elevadas, de modo que não interferem no trânsito existente na região.

Na tabela abaixo, é feita uma comparação entre os trens convencionais e os trens de levitação magnética.

Tabela 8 – Comparação entre trens de levitação magnética urbanos e trens convencionais

	TRENS MAGLEV URBANOS	TRENS CONVENCIONAIS
Ruído e vibração	Sem contato mecânico (60-65 dB)	Contato roda-trilho (75-80 dB)
Segurança	Sem possibilidade de descarrilhamento	Descarrilha ao mínimo defeito.
Estrutura da via	Veículos leves e carregamento distribuído	Veículos pesados e carregamento pontual, estruturas robustas.
Manutenção	Poucas manutenções	Constante substituição de rodas, trilhos, engrenagens.
Inclinação máxima	8% - 10 %	3% - 5%
Curva mínima	30 m	150 m

Fonte: Lee *et al.* (2006)

2.2.2.3 Transporte urbano

Os sistemas de transporte leve caracterizam-se por serem de média capacidade e por terem ótima flexibilidade de oferta devido à facilidade de montagem dos carros, além de serem bidirecionais e operarem em alta frequência. Infelizmente, um dos principais problemas no uso desse sistema em áreas densamente urbanizadas é o ruído no ambiente durante a viagem. Além disso, outro problema está relacionado à propagação das tensões dinâmicas devido ao contato roda-trilho. Essas tensões afetam fortemente o emprego desses sistemas sobretudo nas cidades e monumentos históricos (AMARAL *et al.*, 2018; D’OVIDIO *et al.*, 2003).

Por suas características de levitação já citadas, o trem de levitação magnética pode se classificar como boa alternativa para o meio de transporte urbano. A sua ausência de contato com o trilho permite a substituição completa dos componentes mecânicos presentes nos trens convencionais por eletrônicos sem provocar desgaste, minimizando os custos de manutenção e aumentando o desempenho e a confiabilidade (AMARAL *et al.*, 2018).

Su *et al.* (2013) calcularam o tempo mínimo de deslocamento entre duas estações usando um algoritmo simplificado, em que as forças de tração, frenagem e resistência do trem são assumidas como constantes, o que não se aplica em um cenário real. Liu *et al.* (2019) formularam a operação como um problema de controle ideal e propuseram uma abordagem adaptativa de dois estágios para obter o tempo mínimo de funcionamento do trem. No entanto, tal modelo foi aplicado em uma linha artificial com inclinação constante e limite de velocidade constante.

Zhong (2020) concluiu que os resultados obtidos para uma linha real demonstram que o método proposto é eficaz para obter a estratégia de operação ideal do trem MagLev de

média velocidade. Essa eficácia depende do estado do sistema, especialmente no que se refere à dinâmica do trem e às complexas restrições operacionais e de segurança.

Lutzemberger (2017) propôs aplicar na cidade de Nápoles, Itália, um sistema de veículo automatizado com levitação magnética feita por ímãs permanentes. O estudo de caso projeta uma linha de 19,8 km de extensão com 5 subestações de alimentação elétricas, 14 estações e 2 terminais. A velocidade máxima do veículo entre as estações foi fixada em 36 km/h e a operação do sistema contou com 4 veículos.

O custo do sistema foi de US\$ 30 milhões/km, valor que não inclui obras civis, estações, aquisição de terreno nem embarque. Tal custo foi detalhado em aquisição dos veículos (3,5 milhões de dólares), sistema de controle (3 milhões), sistema de energia (6 milhões), motores lineares (7,5 milhões) e trilho (10 milhões). O valor total ficou abaixo da média de um sistema de veículo automatizado padrão, que custa entre US\$ 40 e US\$ 65 milhões/km. O autor concluiu que, em termos de alimentação de energia por subsistema de alimentação, os sistemas com levitação magnética apresentam em média uma redução de 10% de consumo energético comparado ao sistema convencional. Na questão de custos, de forma preliminar, destaca-se uma economia no sistema de levitação em comparação ao convencional, porém se observa que é preciso realizar análises mais detalhadas sobre os custos de ambos os sistemas.

Por fim, o sistema com levitação magnética demonstra ser uma solução viável e com bom custo-benefício para aplicação em baixa-média velocidade, em razão do baixo ruído, das infraestruturas simples e da alta confiabilidade. Essas aplicações necessitam de pouco uso territorial e requerem baixos investimentos, o que as potencializa ao redor do mundo (LUTZEMBERGER, 2017).

Portanto, as pesquisas sobre o transporte MagLev de média velocidade têm atraído muita atenção nos últimos anos, especialmente para a otimização da operação dos sistemas (Luo *et al.*, 2010; Rao, 2012; Jiao, 2016; Zeng, 2017). O objetivo da otimização da operação é reduzir o consumo energético e minimizar o tempo de viagem, que está sujeito tanto a restrições operacionais quanto a de segurança do trem, como limites de velocidade, inclinação da via e controle de aceleração/frenagem do veículo (ZHONG, 2020).

Segundo Powell (2003), para que os sistemas urbanos MagLev sejam amplamente implementados, alguns critérios devem ser atendidos, tais como: os sistemas devem ser seguros e ecológicos; seus custos de construção e de operação devem ser aceitáveis; o

serviço deve ser mais rápido, mais conveniente, mais confortável e mais barato do que o de sistemas alternativos; a construção e a operação devem ter impacto limitado nas infraestruturas urbanas e suburbanas existentes; a subsídio do sistema deve ser mínima; os sistemas devem atender a uma ampla variedade de locais e usuários perfeitamente, com o mínimo de transferências necessárias; e as conexões com outros meios de transporte devem ser fáceis, convenientes e rápidas.

A escolha do modo de transporte é complexa e pode ser medida ou estimada por diversos parâmetros, cada um focado em um aspecto do sistema. Na escolha dos critérios, os tomadores de decisão devem se basear em aspectos mais críticos, como a qualidade do serviço, os aspectos técnicos do equipamento, entre outros. Segundo Seo (2008), os principais parâmetros aplicados na medição de desempenho de sistemas são a disponibilidade de serviço, a pontualidade, a confiabilidade e a manutenção. Esses itens afetam o passageiro na escolha do modo de transporte e são importantes para a avaliação do projeto.

Em seu trabalho, Powell (2003) propôs um MagLev para transporte urbano na Flórida/USA. Nessa pesquisa, o consumo total de energia por veículo.km é de 1,88 kWh a 60 mph e de 3,75 kWh a 150 mph. Assumindo um carregamento de 50 passageiros e o valor de US\$ 0,06/kWh, que é o custo médio dos EUA para energia elétrica, o passageiro típico viajando em um veículo a uma velocidade de 60 mph pagaria cerca de US\$ 0,22/passageiro.km; enquanto a 150 mph, o custo de energia seria de US\$ 0,44/passageiro.km. Os custos operacionais de manutenção, de pessoal e de amortização de veículos também parecem muito baixos.

D' Ovidio *et al.* (2003) propuseram um sistema leve de levitação magnética que requer uma via exclusiva e que é adequado para operar na linha principal para transporte público em médias cidades ou para atuar como linhas alimentadoras em grandes centros urbanos. O trem consiste em veículos modulares de 10,0 m de comprimento, 2,60 m de largura e 2,40 m de altura, com uma capacidade de transportar até 65 passageiros por veículo – cada um com peso próprio de 12,4 toneladas e com peso total de 16,95 toneladas.

Uma questão importante na operação adequada de sistemas de trânsito rápido é o conceito *RAMS – Reliability, Availability Maintainability and Safety* -, que precisa ser considerado em qualquer novo estabelecimento desse sistema. Os parâmetros mais comuns, como a avaliação do serviço, a pontualidade do trem, a confiabilidade e a manutenção, influenciam a decisão do passageiro na escolha do modo e são importantes para a

avaliação do projeto. O uso de via segregada, sem interseções com outros sistemas de transporte, garante a inexistência de conflitos e permite operações ininterruptas (LIU & DENG, 2004; SEO, 2008; YAGHOUBI *et al.*, 2012).

Por serem silenciosos e leves, além de terem seus custos de manutenção reduzidos, os veículos de levitação magnética lidam com a dinâmica urbana em vias suspensas ou em funcionamento subterrâneo, garantindo nenhuma interferência com outros modos de transporte. Fornecem, assim, um sistema de alta capacidade, rápido, confiável, sustentável e previsível. A velocidade diminui o tempo de deslocamento entre um centro urbano e suas vizinhanças satélites, o que proporciona uma opção acessível para escapar dos engarrafamentos (AMARAL *et al.*, 2019).

As tabelas a seguir mostram os projetos de veículo de levitação magnética de alta velocidade e de transporte urbano em operação ou em fase de testes. Os projetos em operação estão destacados em negrito. A sigla LIM significa motor linear de indução.

Tabela 9 - Projetos de MagLev de alta velocidade

PAÍS	NOME	EXTENSÃO	INAUGURAÇÃO	LEVITAÇÃO
ALEMANHA	Transrapid	31,5 km	Linha de teste fechada	EML
CHINA	SMT	30,0 km	Outubro, 2003	EML
JAPÃO	JR-MagLev	42,8 km	Linha de teste	EDL

Fonte: Stephan (2020).

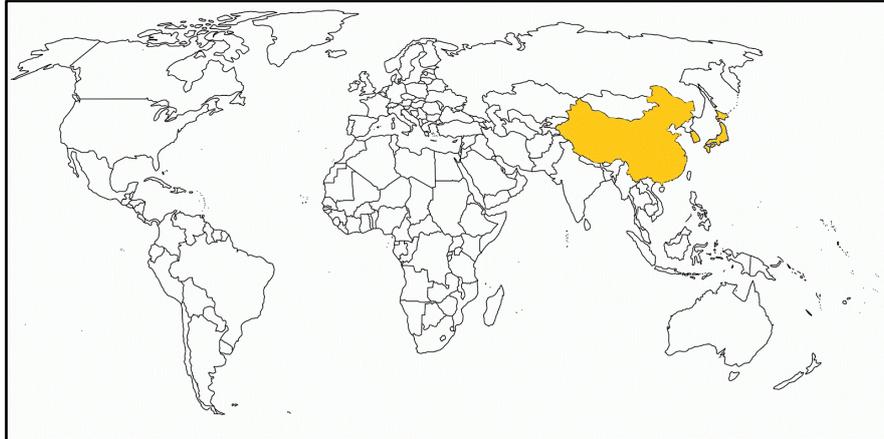
Tabela 10 - Projetos de MagLev Urbano no mundo

PAÍS	PROJETO	LEVITAÇÃO	TRAÇÃO	DETALHES
JAPÃO	HSST – Limino	EML	LIM	9 km, desde 2005
CHINA	Changsha	EML	LIM	18,5 km, desde 2016
	Pequim	EML	LIM	10,2 km, desde 2017
CORÉIA DO SUL	Aeroporto de Incheon	EML	LIM	6,1 km, desde 2016
ALEMANHA	IFW	SML	LIM	Dresden (80 m)
BRASIL	UFRJ/COPPE	SML	LIM	Rio de Janeiro (200m)

Fonte: Stephan (2020).

A Figura 3 abaixo mostra os países em que o sistema MagLev está em operação.

Figura 3 – Países com sistemas de trens de levitação magnética em operação.



Fonte: Reprodução própria.

2.2.2.4 Métodos de Levitação – Eletromagnética (EML)

Os principais métodos de levitação magnética são classificados como eletromagnética (EML), eletrodinâmico (EDL) e por supercondutores (SML). No caso da levitação EML, a força de atração gerada entre os ímãs realiza as funções de levitação, guiamento e frenagem (Riches, 1988; Lee C.Y, 2013; Liu *et al.*, 2020). Geralmente, o modelo EML consiste em um trilho de reação, em um núcleo de ferro em forma de U e em bobinas de controle. A bobina de controle gera campo magnético nos ímãs em forma de U e este campo magnético acopla o trilho de reação com o núcleo de ferro em forma de U.

Essa tecnologia é inerentemente instável devido às características do circuito magnético (RICHES, 1988). Portanto, o controle preciso da levitação é indispensável para mantê-la de forma contínua.

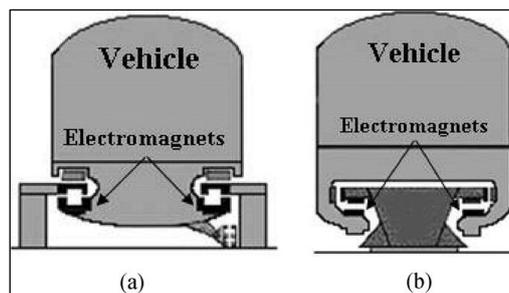
Nos sistemas EML, os ímãs levitam de 8 a 10 mm acima do trilho, e a tecnologia é capaz de levitar em baixas velocidades. Quando os trens do sistema EML se deslocam ao longo da via, causam uma deformação que afeta diretamente na altura de levitação. Assim, as interações dinâmicas entre o veículo e a via são alteradas (WANG *et al.* 2007; YAU, 2009).

Wang (2019) realizou uma pesquisa sobre a influência da interação dinâmica vertical dos veículos de levitação magnética de baixa-média velocidade na estrutura da via. Em seu trabalho, observou que, durante a operação do sistema, os veículos aplicam uma força diretamente na via – chamada de *F-rail* pelo formato de letra “F” que a seção do trilho forma – e, conseqüentemente, na ponte como um todo. O autor deixa claro que, no entanto, as estruturas dos sistemas roda-trilho e da levitação magnética diferem muito.

Ao final da pesquisa, o autor formula conclusões sobre a deformação local do trilho, que representa 20,4% da deformação total, o que é significativo. A vibração vertical da ponte na faixa de alta frequência correspondente é maior quando o *F-rail* é considerado e, devido à previsão de vibração da ponte ser muito pequena, o modelo proposto pelo autor para interação dinâmica vertical pode ser validado.

No método EML, existem dois tipos de tecnologias de levitação: a) ímãs e trilho integrados, como o UTM coreano ou o HSST japonês e b) ímãs e trilho separados, como o Transrapid alemão. Quando os ímãs e os trilhos estão integrados, operações de baixas velocidades são mais favoráveis e seu custo é baixo, porque o número de ímãs é reduzido e a força de orientação é gerada pela diferença de relutância. Por outro lado, os ímãs e os trilhos separados são mais apropriados para altas velocidades, porque tanto os ímãs quanto os trilhos não interferem um no outro (LEE *et al.* 2006).

Figura 4 – Levitações eletromagnéticas: a) guiamento com ímãs e trilho integrados b) guiamento com ímãs e trilho separados.



Fonte: Lee *et al.* (2006).

Min *et al.* (2017) estabeleceram modelos bidimensional e tridimensional de MagLev acoplado à via e os compararam usando a análise de interação dinâmica para estudar vibrações e ressonâncias e para eliminar problemas de vibrações no conjunto trem e via. Além disso, Reza *et al.* (2012) estudaram a estabilidade operacional de trens MagLev sob efeitos de retardo de tempo, de incertezas de parâmetros e de cargas externas baseadas em um sistema de controle robusto adaptável.

Shawki (2014) propôs uma pesquisa que descrevia o projeto e a implementação de um sistema de levitação magnética em Bangladesh usando a técnica de compensação de fase. Nesse trabalho, o autor concluiu que o sistema de levitação magnética é difícil de implementar devido à sua não linearidade intrínseca – e o projeto só impõe o controle na direção vertical. Segundo o autor, a mudança no projeto para a técnica de propulsão eletrodinâmica pode trazer ganhos e estabelecer um novo nível no setor de transporte e comunicação.

O trem de Xangai, também conhecido como Transrapid, foi inaugurado em abril de 2004 e opera 115 viagens diárias a uma velocidade máxima de 430 km/h para cobrir os 30 km de extensão da linha, que é o primeiro trem MagLev operacional mais rápido e bem sucedido comercialmente, projetado para conectar o Aeroporto Internacional de Xangai Pudong aos arredores do centro de Pudong, Xangai, em apenas 8 minutos. Nenhum problema operacional foi detectado desde sua inauguração. Em março de 2005 foi inaugurada outra linha, dessa vez no Aichi, Japão, cuja extensão é de 9,2 km e seus trens operam a uma velocidade de 100 km/h. (LIU, 2006; MAGLEV, 2012).

O sistema de MagLev de Changsha foi uma iniciativa do governo da província de Hunan para construir uma linha de trem entre o Aeroporto Internacional Changsha Huanghua e a Estação Ferroviária Sul de Changsha, cobrindo uma distância de 18,55 km. As operações começaram em maio/2016 e o trem já transportou quase 6 milhões de passageiros (QIAN, 2014).

A linha S1 do metrô de Pequim é uma linha MagLev de média-baixa velocidade, operada pela Beijing Railway Transit Operation Corporation Limited e foi aberta em dezembro de 2017, partindo da estação Jin'anqiao em direção ao distrito de Mentougou (Beijing International, 2020).

O trem da linha japonesa Kyuryo Transit Tobu Aichi de baixa velocidade, também chamado de Limino, é um trem de levitação magnética que circula em Aichi, perto da cidade de Nagoya. Inicialmente construído para atender a Expo 2005 – Exposição Universal 2005 –, agora opera para atender a comunidade local. Limino é o primeiro MagLev urbano no Japão a usar a tecnologia HSST, além de ser o primeiro MagLev urbano autônomo no mundo (YASUDA *et al.*, 2004).

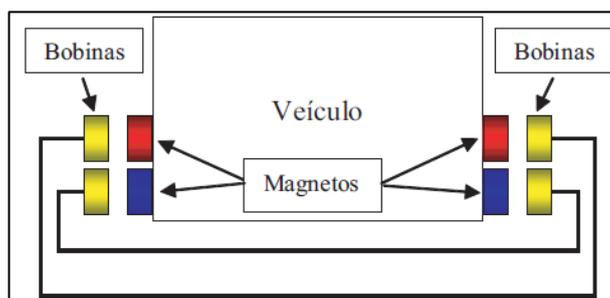
A linha MagLev na Coreia do Sul, inaugurada em fevereiro de 2016 no Aeroporto de Incheon, é a segunda linha MagLev urbana autônoma em operação no mundo. Os trens são mais leves, o que reduz os custos de construção pela metade. Esse sistema liga o Aeroporto Internacional de Incheon à Estação Yongyu e ao Complexo de Lazer enquanto cruza a ilha de Yeongjong. É gratuito para todos os usuários e sua operação vai de 07:30 a 20:00 com *headway* de 15 minutos. Essa linha utiliza especificamente propulsão de suspensão eletromagnética (EML) e motor de indução linear - LIM (PARK *et al.*, 2009).

2.2.2.5 Métodos de Levitação – Eletrodinâmica (EDL)

Enquanto a levitação eletromagnética usa a força de atração, a EDL usa a força de repulsão entre o campo magnético e os ímãs para levitar (Railway Technical Research Institute, 2012). Apesar de ser adequado para operações em altas velocidades e para transporte de carga, o sistema EDL só começa a levitar a partir de 100 km/h, necessitando de rodas para trafegar abaixo dessa velocidade inicial e garantir a segurança (LEE *et al*, 2006).

Na suspensão eletrodinâmica (EDL), tanto a via quanto o trem exercem um campo magnético, e o trem levita por causa da força repulsiva entre esses campos. Em algumas configurações, o trem pode levitar apenas pela força repulsiva. Nos estágios iniciais do desenvolvimento de MagLev na pista de testes de Miyazaki, optou-se pela utilização de um sistema repulsivo (He, Rote & Coffey, 2012). O campo magnético é produzido por ímãs supercondutores (como em JR-MagLev) ou por uma variedade de ímãs permanentes (como em Inductrack). A força repulsiva na pista é criada por um campo magnético induzido em fios ou em outras tiras de condução. Assim, a levitação é realizada por meio da interação entre os campos do trem e o induzido. Quanto à estabilidade lateral, esta é alcançada através da interconexão engenhosa de bobinas alojadas lateralmente no trem (Stephan, 2015; Motta, 2011). A Figura 5 mostra o sistema de levitação eletrodinâmica.

Figura 5 - Detalhe do sistema de levitação eletrodinâmica (EDL).



Fonte: MOTTA (2011).

Apesar de não ser necessário um controle de feedback ativo, em velocidades lentas a corrente induzida nessas bobinas e o fluxo magnético resultante não são grandes o suficiente para levitar o trem. Por essa razão, o veículo deve ter rodas ou alguma outra forma de trem de pouso para apoiá-lo até que atinja a velocidade de decolagem. Como um trem pode parar em qualquer local em função de problemas de equipamento, por exemplo, toda a pista deve ser capaz de suportar a operação de baixa e de alta velocidade.

Esse tipo de levitação requer o movimento de um campo magnético nas proximidades de um material condutor – princípio aplicado pela proposta japonesa para o trem de levitação JR-MagLev. Operando desde 1997, tal proposta é uma linha dupla de demonstração e testes em Yamanashi, entre Tóquio e Osaka. Em 2013, a linha foi expandida e atualmente tem 42,8 km de extensão. O Japão planeja estendê-la para complementar o Shinkansen, que atualmente liga essas duas cidades, mas a tecnologia ainda não foi implantada comercialmente (STEPHAN, 2020).

Quanto aos ímãs, o sistema eletrodinâmico pode ser dividido em: ímã permanente e ímãs supercondutores. Os ímãs permanentes têm uma estrutura mais simples porque não precisam de energia de suporte. Já para os ímãs supercondutores, a estrutura é mais complexa em função da evaporação do hélio líquido, causada por um aquecimento generalizado, o que pode acarretar problemas durante a operação (TSUCHISHIMA, 1991; VERMILYEA, 1993; SCHOLLE; 1994).

Os trens de levitação magnética recebem a força de propulsão através de um motor linear, diferentemente do motor rotacional convencional, visto que não usam acoplamento mecânico para o movimento retilíneo. Além disso, o motor linear é superior ao rotacional no quesito sustentabilidade, porque tem uma redução significativa na vibração e no ruído. Existem dois tipos de motores lineares, sendo um por indução (LIM) e outro sincronizado (LSM).

2.2.2.6 Métodos de Levitação – Supercondutora (SML)

A levitação magnética por supercondutores é um novo sistema de transporte de inúmeras vantagens, tais como: tem estabilidade de levitação sem necessidade de controle, apresenta baixo consumo energético e baixo ruído, é limpo e tem potencial para altas velocidades (Lee *et al.*, 2006). Essas características atraíram considerável atenção em todo o mundo, e substanciais esforços e investimentos foram atribuídos no seu estudo.

Esse tipo de levitação se baseia na propriedade diamagnética dos materiais supercondutores, conhecida como Efeito *Meissner*, em que o campo magnético no interior do supercondutor é nulo na presença de ímãs permanentes, produzindo força repulsiva. No caso dos supercondutores tipo II, essa exclusão é parcial, reduzindo a força de levitação; porém, os supercondutores recebem força de atração chamada de aprisionamento de vórtices (ou *pinning*), de modo que essa combinação proporciona a

estabilidade (Motta, 2011; Stephan, 2012). Tal propriedade representa a maior vantagem da levitação por supercondutores (SML) em relação aos demais sistemas.

No caso da SML, a linha de ímãs necessários para promover o efeito diamagnético é mais cara que as infraestruturas das outras tecnologias. Por isso, tal técnica é mais indicada para transporte urbano, com curtas distâncias entre as estações e a baixas velocidades (STEPHAN, 2012).

Segundo Cabral (2015), a levitação supercondutora é energeticamente mais eficiente do que a levitação eletromagnética do Transrapid (que consome 1,7kW/t), pois não há consumo de energia para garantir a levitação e a estabilidade do sistema. No entanto, essa tecnologia é recente e, no Brasil, há apenas um modelo em escala real denominado MagLev-Cobra sendo construído pelo Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da COPPE/UFRJ.

Deng (2017) estudou um experimento de linha circular em ambiente controlado desenvolvido na China em 2013. Tal linha de teste possui 45m com uma bitola de 77,0cm, duas seções retas de 3,60m e um raio de curva de 6,0m. Nesse trabalho, ele realizou uma análise e fez uma avaliação preliminar das características dinâmicas da linha experimental, combinado com o método de análise dinâmica dos tradicionais veículos roda-trilho.

Para realizar essa avaliação, foram estudados alguns parâmetros, como a altura de levitação e o deslocamento lateral. Segundo o resultado da pesquisa, o autor concluiu que o veículo irá se inclinar com o aumento de velocidade e que esse efeito se torna mais óbvio a uma altura de levitação mais alta. Por outro lado, a altura de levitação menor é mais adequada para se ter uma operação segura, e a superelevação deve ser considerada quando o veículo passar pelas curvas.

2.2.2.7 Sistema MagLev-Cobra

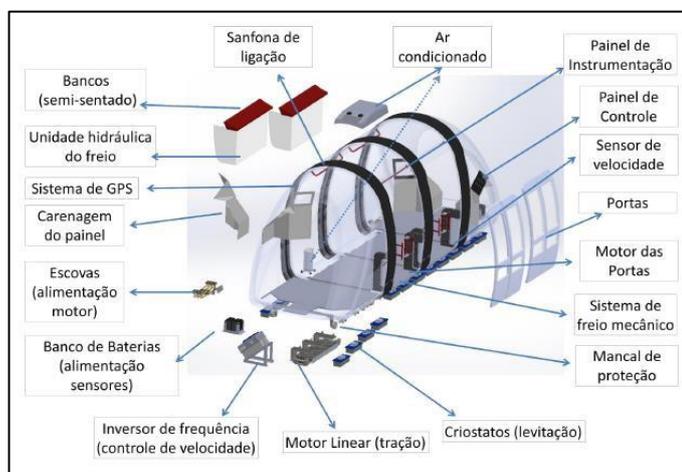
O MagLev-Cobra é um trem de levitação magnética que levita por supercondutores. Os materiais supercondutores de alta temperatura crítica possuem a propriedade de aprisionar e repelir o campo magnético de forma a se manterem em equilíbrio na presença de um campo externo constante. A grande vantagem desse sistema é que essas forças ocorrem naturalmente, independentemente da ação de sensores e de atuadores – como no caso eletromagnético – ou da preexistência de movimento relativo – a exemplo do caso

eletrodinâmico. Essas propriedades são eficazes para transporte urbano de baixa velocidade e de fácil operação (STEPHAN, 2016).

O desenvolvimento do MagLev-Cobra foi organizado em quatro etapas. Na primeira, entre 2000 e 2006, um demonstrador de pequena escala com loop fechado foi construído como prova de conceito da tecnologia. Entre 2007 e 2012, um módulo em escala real foi testado em laboratório com condições ambientais controladas. De 2013 a 2015, foi elaborada uma linha experimental de 200 m ao ar livre, sendo esta a atual etapa do projeto. A quarta e última etapa será a sua industrialização.

A linha de teste é composta por um elevador de 200 m de comprimento em linha reta com duas estações e uma inclinação de 1,25%. O veículo possui 4 módulos com uma capacidade de 30 passageiros. O motor de indução linear (LIM) tem dois primários curtos fornecidos por dois inversores eletrônicos de potência. O total do peso do veículo vazio é de 2.000 kg. O projeto custou 5 milhões de dólares e seu financiamento foi realizado através de Parceria Público-Privada (PPP). A etapa final seria a sua industrialização e comercialização em larga escala (MATTOS *et al.*, 2016)

Figura 6 - Desenho esquemático dos componentes do veículo MagLev-Cobra



Fonte: Cedido pela equipe do Laboratório de Aplicação de Supercondutores (LASUP/UFRJ).

Outro aspecto favorável quanto à eficiência energética é o fato de que a energia para vencer a ação da gravidade provém de ímãs permanentes instalados ao longo da via. Desse modo, a energia necessária para o funcionamento do sistema de levitação consiste majoritariamente nas perdas térmicas do criostato. O componente fundamental desse sistema é a base de levitação do veículo, na qual são montados os módulos de passageiros e instalados os criostatos. Dentro deles estão os supercondutores, refrigerados com

nitrogênio líquido ($-196,15^{\circ}\text{C}$), que podem ser considerados de baixo preço de comercialização. Na parte central, encontram-se as bobinas (alimentadas com energia elétrica), que permitem a movimentação do trem através da interação com um motor linear de indução instalado na via (SOTELO et al., 2013). A Tabela 11 abaixo explicita um compilado das características operacionais do veículo MagLev-Cobra.

Tabela 11 - Características operacionais do veículo MagLev-COBRA.

1.1. Comprimento total	2,50 m	1.8. Velocidade máxima	60 km/h
1.2. Largura	1,50 m	1.9. Velocidade comercial média	15 km/h
1.3. Altura total	2,70 m	1.10. Distância média de parada	500 m
1.4. Rampa máxima operacional	15 %	1.11. Raio de curva horizontal	30 m
1.5. Tara do veículo	2.240,00 kg	1.12. Peso do veículo vazio/m ²	149,33 kg/m ²
1.6. Quantidade de criostatos no veículo	24,0	1.13. Peso por passageiros	70,00 kg
1.7. Quantidade de composições	4,0	1.14. Peso bruto total	4.800,00 kg

Fonte: Adaptado de Stephan *et al.* (2018).

Conforme proposto pelos Níveis de Preparação de Tecnologia (TRL) da NASA, as etapas do desenvolvimento tecnológico, desde a prova de conceito até o uso final e a comercialização, abrangem os seguintes nove níveis:

- TRL1 - Princípios básicos observados e relatados
- TRL2 - Conceito de tecnologia e / ou aplicativo definido
- TRL3 - Validação de prova de conceito
- TRL4 - Validação em ambiente de laboratório
- TRL5 - Validação em ambiente relevante
- TRL6 - Validação em ambiente final relevante
- TRL7 - Validação em ambiente operacional
- TRL8 - Teste de calha "qualificado para a missão" e demonstração
- TRL9 - "Missão comprovada" por meio de operações bem-sucedidas

O trem MagLev-Cobra possui um sistema de frenagem autônomo seguro composto por dois estágios. O primeiro é responsável por determinar o momento em que o veículo chega a uma distância de segurança, na qual o freio elétrico deve atuar antes que o trem alcance a próxima estação. O segundo estágio recebe o sinal de controle do primeiro e gera uma desaceleração constante até chegar à estação. O objetivo é parar com segurança o trem ao longo da plataforma em posição correta na estação ferroviária. A implantação desse sistema de frenagem custa aproximadamente US\$ 887,00 (NETO, 2020).

Para melhorar a segurança e a confiabilidade, Liu et al. (2011) apresentaram um esquema para a garantia de integridade de um sistema de posicionamento integrado de trens

baseado em GNSS (*Global Navigation Satellite System* ou Sistema Global de Navegação de Satélite). De acordo com os autores, esse esquema fornece detecção de falha de sensor, diagnóstico de falha e isolamento – necessários para um sistema de segurança. Outra abordagem de uso do algoritmo cooperativo é apresentada por Roth et al. (2012), em que os autores garantem que o algoritmo permite ajustar no âmbito da comunicação as medições de faixas GNSS provenientes de veículos colaborativos. Dessa forma, é possível utilizar as faixas para a sua localização. O resultado é uma melhoria na precisão do posicionamento, mitigando o problema de indisponibilidade de satélites para ambientes urbanos.

No MagLev, o peso total é distribuído ao longo dos blocos supercondutores, resultando em cargas distribuídas. A estrutura de um veículo MagLev compõe-se de duas linhas de ímãs com 50mm de altura e 100mm de largura, correspondendo a um peso linear por metro equivalente a 10% do peso da superestrutura do VLT (STEPHAN, 2016).

Tabela 12 - Prós e contras dos sistemas de levitação

Tecnologia	Prós	Contras
Levitação Eletromagnética (EML)	Baixo campo magnético dentro e fora do veículo	O sistema necessita ser monitorado constantemente para manter a altura de levitação ideal
	Sem necessidade de sistema secundário de propulsão	Vibrações podem ocorrer e tornar o sistema instável e fora de monitoramento
Levitação Eletrodinâmica (EDL)	Altas velocidades (581 km/h)	Uso necessário de blindagem magnética devido aos fortes campos magnéticos
	Grande capacidade de carga	O veículo precisa de rodas para trafegar em baixas velocidades (<100 km/h) O sistema criogênico usado para resfriar as bobinas pode ser caro
Levitação por Supercondutores (SML)	Maior estabilidade entre as três tecnologias	Custo de implantação elevado em comparação com outras tecnologias em função do consumo de ímãs por quilômetro de trilho.
	Sem consumo de energia para garantir a levitação	
	Maior eficiência energética	

Fonte: Thompson *et al* (1999) e Cotsalas (2000), Ogawa (2006), Nelson (2008), Ahmed (2014), Stephan *et al.* (2018).

- Outras aplicações

Além da aplicação em transportes, a levitação magnética foi utilizada na área das energias renováveis, tendo sido criada uma turbina eólica com utilização de ímãs permanentes. Tal projeto foi apresentado por uma empresa chinesa encabeçada pelo pesquisador Ed Mazur no início de 2017 durante uma exposição em Pequim denominada Wind Power Asia.

De acordo com seus criadores, a turbina eólica funciona com as pás verticalmente, substituindo a necessidade de rolamentos de esferas. O sistema de ímãs permanentes emprega ímãs de neodímio e não requer eletricidade para operar, além de não haver perda de energia por fricção. Isso também ajuda a reduzir os custos de manutenção e aumenta a vida útil do gerador.

Essa aplicação baseia-se na inexistência de atrito entre os mecanismos, proporcionando um maior desempenho do sistema, visto que um vento de apenas 1,5 m/s é necessário para gerar energia – além de poder operar a velocidades maiores que 40 m/s.

Ainda segundo seus idealizadores, as turbinas eólicas MagLev conseguem gerar 1,0 GW de energia limpa – o suficiente para fornecer energia a 750 mil casas –, enquanto as maiores turbinas eólicas convencionais produzem 5,0 MW.

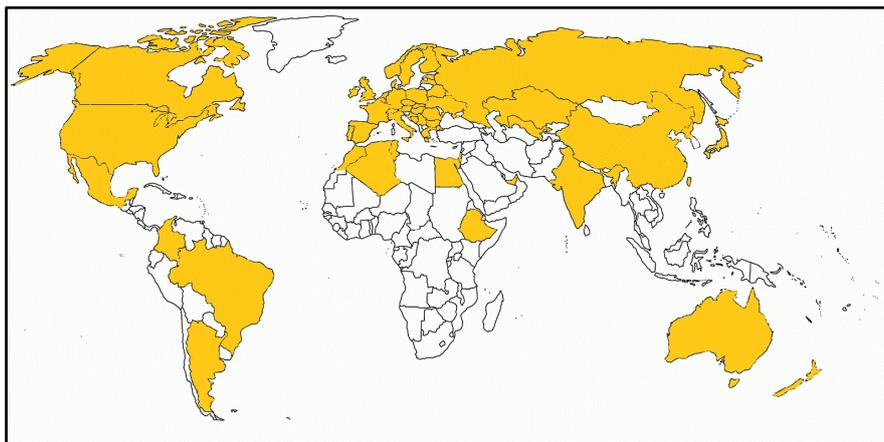
De acordo com Stephan *et. al* (2017), o desenvolvimento do veículo MagLev Cobra pode contribuir para o avanço de outras áreas da tecnologia, como a fabricação de ímãs de terras raras, que são largamente utilizadas no industrial, a exemplo do neodímio. Sua aplicação varia desde a produção de alto-falantes e de celulares até a construção de turbina eólica.

2.2.3 Veículo Leve sobre Trilhos - VLT

O Veículo Leve sobre Trilhos (VLT) é um modo de transporte público sobre trilhos com algumas características similares às do metrô de superfície: tem fácil inserção na estrutura viária existente; pode compartilhar ou não o espaço comum do tráfego, inclusive na convivência com os pedestres e em áreas verdes; e se utiliza de energia elétrica.

Além disso, com 30 anos de vida útil, o VLT apresenta soluções menos poluentes, é limpo e ecológico, contribui para a mobilidade urbana sustentável e inclusiva, circula em centros históricos e atrai usuários de transporte público e de carro. Ademais, agrega imagem positiva à cidade, onde sua implantação induz à renovação urbana. Assim, o VLT pode desempenhar um serviço de alta qualidade operacional e de maior capacidade que os ônibus. Simultaneamente, está em harmonia e em equilíbrio com os projetos urbanísticos e paisagísticos atuais e possibilita uma intensa integração modal. Tal tecnologia se mostra uma solução consolidada no mercado, com 413 aplicações nos mais diversos lugares do mundo, como se vê na Figura 7 abaixo, que identifica todos os países nos quais o sistema VLT se encontra em operação.

Figura 7 – Países com sistemas de VLT em operação.



O continente europeu agrega a maioria dos sistemas de VLT em operação, abrangendo 292 cidades ao longo de 32 países, com destaque para Rússia (59 cidades), Alemanha (53) e França (30). Também merecem destaque: a Ásia – com 49 sistemas divididos em 9 países – e a América do Norte – com 47 aplicações, sendo 40 só nos Estados Unidos. No Brasil, apenas o VLT do Rio de Janeiro e o de Santos foram contemplados na lista.

Segundo Alouche (2008), o VLT é um transporte limpo, sustentável, rápido, seguro e capaz de reutilizar linhas férreas dos antigos comboios de trens. Além disso, tem a possibilidade de ser implantado em corredores exclusivos, onde sua velocidade pode chegar a 80 km/h, ou em calçadas e centros históricos – dividindo a via com veículos e pedestres com velocidade de 20 km/h. Grande parte de sua locomoção se dá na superfície terrestre; também possui baixo ruído e poucas vibrações e pode ser movido à eletricidade e/ou a diesel, sendo um transporte menos poluidor do que os demais.

Os veículos VLT utilizam como fonte de energia a eletricidade a partir de rede de distribuição da concessionária local, normalmente em média tensão e abastecida por subestações retificadoras que alimentam os veículos. Sua rede de alimentação de tração pode ser via catenária, quando há fios suspensos acima do veículo e ambos são ligados por um cabo, ou por alimentação pelo solo (APS). Esse sistema possui bilhetagem anterior ao embarque; embarque/desembarque em nível de passeio; e prioridade de passagem. Em razão da força motriz de origem elétrica, o VLT promove a revitalização urbana por ser um sistema não poluidor.

No caso do VLT do Rio de Janeiro, o projeto visou à revitalização da Zona Portuária – que compreende os bairros Gamboa, Saúde e Santo Cristo – além de trechos do Centro, como Caju, Cidade Nova e São Cristóvão. Tal processo englobou a recuperação da infraestrutura urbana, dos transportes, do meio ambiente e dos patrimônios históricos e

culturais da região. O custo total de implantação do VLT foi de aproximadamente 1,2 bilhão de reais.

O VLT do Rio conecta o metrô, os trens metropolitanos, os ônibus urbanos municipais e intermunicipais, as barcas, a rodoviária Novo Rio e o aeroporto Santos Dumont. A extensão da via dupla é de 14 km com 32 paradas, com uma distância média de 400m entre elas.

A Linha 1 (Azul) liga o aeroporto Santos Dumont à rodoviária Novo Rio, através de 20 estações; a Linha 2 (Verde) liga a Central do Brasil à Praça XV, com 6 estações; e a Linha 3 (Amarela) possui 3 estações, começando na Central do Brasil e se encontrando com a Linha 1 entre as estações São Bento e Candelária. Quando entrar em operação total, o VLT funcionará de forma ininterrupta. Com uma frota de 32 composições, transportará 300 mil passageiros por dia. De acordo com o projeto funcional do VLT-Rio, foram determinadas algumas especificações técnicas detalhadas abaixo:

Tabela 13 - Características operacionais do veículo VLT-Rio.

Comprimento total	44,00 m	Velocidade máxima	70 km/h
Largura	2,40 m	Velocidade comercial média	15 km/h
Altura total	3,60 m	Distância média entre paradas	400 m
Rampa máxima operacional	7%	Raio de curva horizontal	25 m

Fonte: VLT-Rio (2019).

Neste trabalho foi feita uma revisão de alguns sistemas de VLT em operação ao redor do mundo, com dados como o ano inicial de operação, sua extensão, a frota e o modelo dos veículos, a demanda e os custos de implantação e de operação.

Importante ressaltar que cada operação estudada tem um sistema de VLT diferenciado, o que implica custos de implantação e de operação distintos, como indicado na lista abaixo:

- Linha 2 e 3 de Madrid, Linha Trambesós (Barcelona), Murcia e Tenerife: Sistema Catenária e Veículo Alstom 302
- Linha Zaragoza e Besançon (França) : Sistema Catenária e Veículo CAF Urbos III.
- Linha Montpellier (França) : Sistema APS e Veículo Alstom 302 e 401.
- Linha Dublin (Irlanda) : Sistema Catenária (Linha 1 e 2) e Sistema APS (Linha 3) e Veículo Alstom 301 e 401 e 402.

Tabela 14 - Custos de implantação e de operação de diversos sistemas VLT.

	INAUGURAÇÃO	EXTENSÃO DA LINHA (km)	FROTA	DEMANDA ANUAL	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO POR km ¹	CUSTO DE OPERAÇÃO POR ANO	FONTE
LINHA 2 MADRID	2007	8,7	12	3.700.000	€ 260.000.000,00	€ 29.885.057,47	€ 8.000.000,00	ROMEUI, 2012; CRTM, 2010; CONSORCIO TRANSP. MADRID, 2010
LINHA 3 MADRID	2007	13,7	5	3.700.000	€ 262.000.000,00	€ 19.124.087,59	€ 9.800.000,00	
BARCELONA - TRAMBESÓS	2007	14,1	18	8.050.000	€ 280.000.000,00	€ 19.858.156,03	€ 12.500.000,00	TRAM, 2013; ROMEUI, 2012; VIZCAÍNO, 2012; VÍA LIBRE, 2013b
TENERIFE	2007	12,3	26	13.960.000	€ 305.600.000,00	€ 24.845.528,46	€ 9.000.000,00	OROMI, 2007; M TSA, 2011; VÍA LIBRE, 2007 e 2009.
	2009	3,6			€ 54.500.000,00	€ 15.138.888,89		
ZARAGOZA	2011	12,8	21	11.500.000	€ 400.000.000,00	€ 31.250.000,00	€ 9.500.000,00	AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA, 2013; TRANVÍA ZARAGOZA, 2013; VÍA LIBRE, 2013d
MURCIA	2011	18	11	3.000.000	€ 264.000.000,00	€ 14.666.666,67	€ 11.000.000,00	TRANVÍA DE MURCIA, 2013; MONTESINOS, 2012
DUBLIN	2017	42,5	73	41.800.000	€ 368.000.000,00	€ 8.658.823,53	€ 36.680.000,00	Sites: RTE.IE e Alstom.com
BESANÇON	2014	15	19	15.695.000	€ 304.000.000,00	€ 19.278.333,00	€ 15.000.000,00	Site ITDP
MONTPELLIER	2012	35,2	57	44.500.000	€ 862.000.000,00	€ 24.488.636,36	€ 35.000.000,00	Site Railway Technology

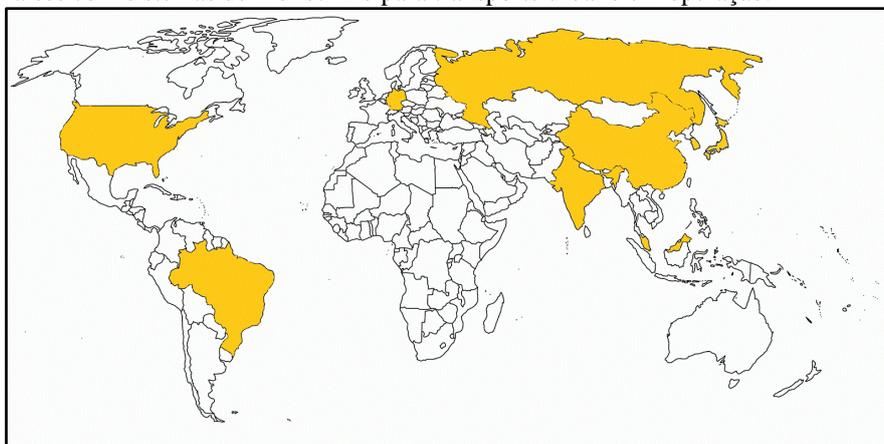
¹ Cotação do Euro: 2012 – US\$ 1,289 / 2013 – US\$ 1,323 / 2014 – US\$ 1,330
2015 – US\$ 1,110 / 2017 – US\$ 1,123 / 2019 – US\$ 1,119

2.2.4 Monotrilho

Os monotrilhos são sistemas de transporte de média capacidade, compostos de um material rodante leve que circula em via elevada. Sua característica básica é a movimentação sobre um único trilho pelo sistema de rolagem do trem, sendo sustentado e guiado lateralmente por pneus. Em sua grande maioria, são movidos à energia elétrica, o que contribui para a redução da emissão de gás carbônico no meio ambiente.

O primeiro monotrilho mundialmente reconhecido foi o de Wuppertal, Alemanha, onde um único trilho de aço é suspenso em uma estrutura elevada ao longo da qual há apenas um trilho. Nesse caso, o peso do veículo é suportado pelo trilho e guiado por ele (ATKINS, 2015).

Figura 8 – Países com sistemas de monotrilho para transporte urbano em operação.



As versões modernas do monotrilho de Wuppertal são semelhantes, pois o monotrilho está suspenso por cima. No entanto, em vez de usar um único trilho para suporte e orientação, o trilho único é substituído por uma viga de concreto ou de aço escavada, e pneus de borracha são usados no lugar de rodas de metal. Embora essa seja a configuração mais comum, foram propostas inúmeras combinações de superfícies de rolamento de aço ou concreto com pneus de borracha ou rodas de aço (ATKINS, 2015).

Ghafooripour *et al.* (2012) produziram um artigo a fim de analisar o custo-benefício da aplicação do sistema Monotrilho em países em desenvolvimento, com foco em casos do Oriente Médio. Em seu trabalho, eles levantaram dados de alguns sistemas em operação ao redor do mundo, destacando seus respectivos custos de implantação, de O&M (Operação e Manutenção), o ano de inauguração e a extensão da linha.

Tabela 15 – Custos de implantação e de operação de diversos sistemas Monotrilhos.

CIDADE	EXTENSÃO (em km)	O&M (\$/pkm)	CUSTO (em milhões de dólares)	CUSTO/km (em milhões de dólares)
CHIBA	15,2	0,97	1.216,00	80,00
KITAKYUSHU	8,8	0,54	1.100,00	125,00
OSAKA	28	0,49	3.360,00	120,00
TAMA	16	0,63	2.028,90	126,81
JACKSONVILLE	4	10,71	200,00	50,00
SEATTLE	22,4	1,02	1.749,00	78,08

Fonte: Reprodução própria, adaptado de Ghafooripour *et al.* (2012).

Visualmente agradável, o monotrilho do tipo *straddle* é o mais comum em operação e se encaixa melhor em ambientes urbanos do que os monotrilhos suspensos, os quais normalmente precisam ser mais altos para permitir a folga necessária para o tráfego dos veículos sob o trem. O monotrilho *straddle* é constituído por um trem que corre sobre uma guia de concreto ou aço. Enquanto os pneus de rolamento do trem correm em cima da viga de guia, os de orientação correm ao longo dos dois lados da viga. As propostas para monotrilhos de alta velocidade usam configurações ligeiramente diferentes, mas o princípio é aproximadamente o mesmo (ATKINS, 2015).

Por operar em via totalmente segregada, o monotrilho atua como sistema de transporte rápido. Diferentemente dos trilhos de VLT, que podem ser adaptados ao terreno, os monotrilhos não podem operar em tráfego misto, como os ônibus, por exemplo, pois suas vigas-guias não devem ser cruzadas por outros veículos ou por tráfego de pedestres no nível do solo. (ATKINS, 2015).

No entanto, as estruturas elevadas do monotrilho permitem um fluxo livre de tráfego, visto que não só são servidos pelas estações mais elevadas, como também operam no subsolo ou a alguns metros acima do nível do solo. Embora as estações exijam um investimento consideravelmente maior do que as simples plataformas ferroviárias, as estações aumentam a visibilidade pública do sistema de transporte público. Uma estação também pode fornecer outros serviços, que tornam o transporte público um método de viagem mais agradável e conveniente, por exemplo o espaço de varejo.

Objetivando a redução de custos de implantação, operação e manutenção, há um predomínio de monotrilhos em vigas de concreto armado e com tração dos carris utilizando pneus, o que aumenta o atrito e reduz o ruído. Além disso, eles carecem de menos espaço, tanto na horizontal como na vertical, e a largura necessária para sua

implantação é determinada pelo tamanho do veículo – e não pelo tamanho da linha. Normalmente elevados, os monotrilhos liberam o tráfego viário, sendo limitados apenas pelos pilares de sustentação.

Em função da característica do sistema monotrilho ser constituído por um veículo sobre pneus circulando sobre uma viga-guia de concreto, sua mudança de via gera menores ruídos e vibrações do que o sistema ferroviário convencional. A seguir estão descritas algumas características operacionais do Monotrilho, destacadas pela empresa britânica ATKINS (2015) no relatório de viabilidade do sistema para o corredor sudeste I-24 de Nashville, em Tennessee/EUA.

- Velocidade

Os monotrilhos de transporte público geralmente operam em velocidades máximas de 70 a 90 km/h, o que é comparável à maioria das aplicações da tecnologia ferroviária em áreas urbanas. As velocidades médias de operação dos monotrilhos comparam-se a dos metrô devido ao fato de serem igualmente classificadas e de usarem distâncias de espaçamento de estação semelhantes. As velocidades são geralmente na faixa de 30 a 50 km/h, muito altas para o transporte público em massa.

- Percurso

A suspensão é geralmente fornecida por molas pneumáticas. Os monotrilhos suspensos podem oscilar vários graus nas curvas, reduzindo as forças. O monotrilho suspenso e o monobloco suspenso proporcionam aos passageiros a sensação de um percurso suave.

- Mudança de via

Uma das maiores desvantagens dos monotrilhos é a dificuldade em mudanças de via. O monotrilho suspenso de Shonan no Japão emprega interruptores nas estações, de modo que a via se mova para ser usada em operação bidirecional.

- Segurança e Evacuação

Demonstrou-se que os monotrilhos são uma das formas de transporte mais seguras. A operação segregada geralmente exclui colisões com automóveis, caminhões e pedestres. Como quase todos os monotrilhos construídos desde o Wuppertal usam trilhos de concreto, o descarrilamento é extremamente improvável. O monotrilho tipo *straddle*, em particular, abraça o trilho de maneira a quase excluir essa possibilidade.

O fato de o monotrilho geralmente ser elevado apresenta alguns desafios de evacuação. Monotrilhos suspensos geralmente têm portas no chão ligadas a escadas ou

escorregadores, como em aeronaves comerciais. Os padrões japoneses de mon trilho de passeio exigem veículos totalmente articulados para permitir a evacuação longitudinal através da frente e traseira do trem para um trem em espera. O sistema malaio usa evacuação lateral para um trem em espera na guia que suporta trens na outra direção. Os mon trilhos americanos mais antigos usam outro trem para empurrar o veículo preso para a próxima estação, mas quando isso não é possível, é necessário resgatar uma escada do chão. O mon trilho de Las Vegas fornece uma passagem de emergência entre os dois feixes de mon trilho, mais alinhados com os sistemas de trânsito mais rápidos.

- **Orientação e tração por pneus de borracha**

Com poucas exceções, os sistemas de mon trilho usam pneus de borracha para tração. Além da guia, essa é a principal diferença tecnológica entre o mon trilho e o trilho tradicional. A maioria dos sistemas com pneus de borracha é executada em superfícies de concreto. Nesse sentido, a maioria dos veículos mon trilhos funciona mais como veículos rodoviários do que como trens.

- **Consumo de energia**

O consumo de energia é um pouco maior com tração por pneus de borracha, visto que, no concreto, estes têm maior resistência ao rolamento e mais inércia de rotação do que a tecnologia de trilhos de aço. As táticas comuns de operação ferroviária podem ser muito menos utilizadas pelos mon trilhos. Como o consumo de energia varia de acordo com o regime operacional específico de uma linha, não são possíveis números exatos. No entanto, é fornecida uma estimativa de 25 a 30% maior de consumo de energia em relação à tecnologia ferroviária.

- **Aceleração e frenagem**

Os veículos com pneus de borracha conseguem atingir taxas de aceleração e frenagem maiores do que os trens com sistema roda-trilho. Para o mon trilho, porém, isso não significa grandes vantagens, pois a aceleração é limitada pelo conforto do passageiro. Quanto às taxas de frenagem, estas são menos necessárias quando se tem via exclusiva, geralmente por estarem isentas de colisões por tráfego misto.

- **Inclinações**

Teoricamente, a tração dos pneus de borracha consegue alcançar inclinações de até 15%, enquanto os trens roda-trilho são limitados a 10%. Na prática, altas inclinações requerem um motor mais potente e causam maior desconforto para os passageiros. Isso significa que os pneus de borracha não apresentam grandes benefícios quanto a esse quesito.

Entretanto, essa vantagem do monotrilho pode ser utilizada em transposição de cursos d'água por pontes menos extensas, o que reduz o custo de implantação.

▪ Ruídos e vibrações

Os veículos com pneus de borracha são geralmente mais silenciosos e produzem menos vibrações em curvas acentuadas do que os sistemas roda-trilho. Quando a manutenção do trilho é insuficiente ou adiada, o que ocorre frequentemente, o benefício dos pneus de borracha pode ser apreciável. Além disso, os sistemas de monotrilho tipo *straddle* protegem o ruído do pneu, pois o lado do trem se estende sobre as rodas para acessar a catenária elétrica.

Em geral, a tecnologia de monotrilho é adequada para aplicações de transporte urbano, sendo favoravelmente comparada à tecnologia ferroviária tradicional como um todo. Os monotrilhos têm várias desvantagens significativas que não podem ser totalmente descartadas, como custos de energia um pouco mais altos para sistemas com pneus de borracha e mudança de via mais lenta em comparação com sistemas ferroviários semelhantes.

Tabela 16 - Características operacionais do veículo Monotrilho.

Comprimento total (7 trens)	85,00 m	Velocidade máxima	80 km/h
Largura	3,15 m	Velocidade comercial média	35 km/h
Altura total	2,10 m	Distância média de parada	1.100 m
Rampa máxima operacional	6 %	Raio de curva horizontal	60 m

Fonte: EIA-RIMA SP (2012).

Atualmente, os principais sistemas de monotrilho para transporte público são fabricados pela Hitachi do Japão e pela Bombardier do Canadá. Todos os monotrilhos são descendentes daqueles da extinta empresa alemã ALWEG, que construiu o monotrilho de Seattle para a feira mundial de 1962. A Hitachi adquiriu os direitos da Alweg para fabricar sistemas de monotrilho.

A empresa canadense Bombardier readaptou o monotrilho do Walt Disney World para o transporte urbano, construído em Las Vegas e proposto para outras cidades americanas. Além disso, a empresa construiu sistemas de monotrilho na Alemanha, na Inglaterra, no Brasil, na Arábia Saudita e na Austrália. Apenas 18 linhas de monotrilho ao redor do mundo são aplicadas ao transporte urbano, sendo a maioria situada no continente asiático, em especial no Japão.

2.2.5 Aeromóvel

Segundo (CONEXÃO METRÔ-AEROPORTO, 2019), o Aeromóvel é um veículo automatizado que funciona em uma via elevada sustentada por vigas de concreto armado. Com uma velocidade média operacional de 30 km/h, o Aeromóvel, de 14,5 metros de comprimento e 3,5 metros de largura, comporta até 300 passageiros por veículo e transporta 4.500 *pphps*. Além de ser operado por uma torre de controle, este sistema enquadra-se na modalidade de transporte *Automated People Mover – APM* – e distingue-se dos outros sistemas pelo tipo de propulsão utilizada.

Os veículos, sem condutor e não motorizados, são impelidos por propulsão pneumática – ou aerodinâmica. Um duto no interior da plataforma é percorrido pelo ar soprado por ventiladores industriais. Sob o veículo estão fixadas aletas que ficam contidas no duto e que são pressionadas pelo ar, impulsionando o veículo.

Por não ter motor embarcado, o sistema agrega vantagens na redução do peso próprio e, por conseguinte, há um acréscimo de eficiência energética por passageiro transportado. A redução dos gases poluentes por utilizar motores elétricos e a mitigação de desapropriação por se valer de vias elevadas são outros pontos positivos na implantação do sistema.

Sua aplicação já foi testada como transbordo de aeroporto em Porto Alegre desde agosto de 2013, com uma linha que interliga a estação Aeroporto, do trem metropolitano, ao Terminal 1 do Aeroporto Internacional Salgado Filho, com uma extensão de 1,0 km e demanda mensal média de 77.990 passageiros. Este projeto custou em torno de 38 milhões de reais, como descrito pela tabela abaixo

Tabela 17 - Planilha simplificada de custos da implantação do sistema Aeromóvel no Aeroporto Salgado Filho/RS.

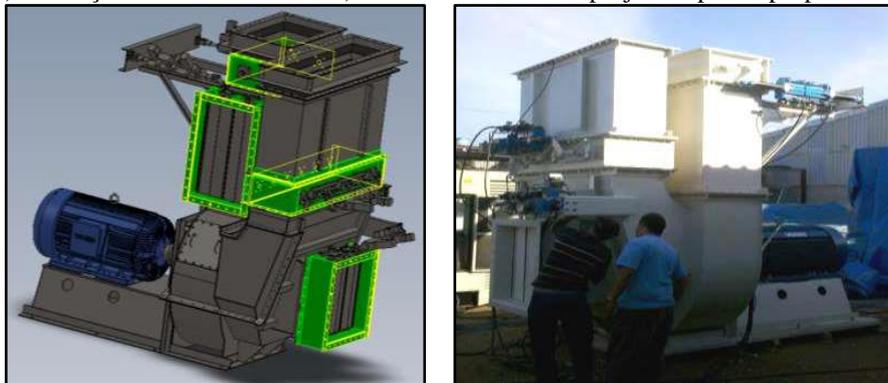
EMPRESA RESPONSÁVEL	ETAPA	CUSTO
AEROMÓVEL S.A.	DESENVOLVIMENTO PACOTE TECNOLÓGICO	R\$ 22.855.516,27
CONSTRUTORA PREMOLD	CONSTRUÇÃO VIA ELEVADA	R\$ 8.766.541,39
TTRANS	ESTRUTURA VEICULAR	R\$ 1.344.000,00
	CONSTRUÇÃO MATERIAL RODANTE	R\$ 1.643.331,98
RUMO ENGENHARIA LTDA.	CONSTRUÇÃO ESTAÇÕES	R\$ 3.552.784,58
VALOR TOTAL DA IMPLANTAÇÃO		R\$ 38.162.174,22

Fonte: Trensurb (2014).

A equipe Aeromóvel S.A. foi responsável pelo desenvolvimento do pacote tecnológico do sistema, que engloba: projetos intrínsecos do Sistema Aeromóvel; projetos executivos; fornecimento de equipamentos e subsistemas; instalação de equipamentos e subsistemas; integração e testes dos equipamentos e dos subsistemas; operação do sistema; fiscalização técnica das obras civis e da fabricação dos veículos; e gerenciamentos do projeto.

Foram necessários, dentre outros, dois equipamentos específicos projetados exclusivamente para o funcionamento da tecnologia. São eles: um motor elétrico com rotação nominal de 3.582 rotações por minuto e 500 cavalos de potência e um ventilador industrial com rotação de 3.046 rotações por minuto, 410 cavalos de potência absorvida e 70.000 m³/h de vazão volumétrica.

Figura 9 - a) Ilustração do motor elétrico. b) Ventilador industrial projetado para a propulsão do veículo.



Fonte: Trensurb (2014).

A primeira aplicação do sistema Aeromóvel voltado para o trânsito urbano seria um projeto da cidade de Canoas/RS, de 2015, o qual serviria como complemento importante combinado a outros modos de transporte. A implantação da tecnologia prometia uma redução no tempo de viagem entre os bairros Guajuviras e Centro para apenas nove minutos, enquanto tal percurso realizado por ônibus dura em torno de 40 minutos. O projeto previa um trajeto de 4,6 quilômetros, contemplando sete estações, desde a Brigada Militar, na Avenida 17 de Abril, no Bairro Guajuviras, até a estação de trem Mathias Velho.

2.3 Estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental

O crescimento populacional desordenado nos grandes centros urbanos brasileiros vem causando transtornos aos cidadãos em diversos aspectos, principalmente no setor de transportes. Por essa razão, foi sancionada em janeiro de 2012 uma lei de diretrizes de Política Nacional de Mobilidade Urbana – PNMU – (BRASIL, 2012). Tal política visa atender as necessidades econômicas, sociais e ambientais impedindo que o planejamento

de transportes seja pautado apenas na análise financeira do empreendimento (ZARY *et al.*, 2014).

Em busca do atendimento às diretrizes do PNMU, obras de grande porte têm sido executadas para oferecer melhor transporte à população. Segundo a lei do PPA 2008-2011 (Lei nº 11.653/2008, art. 10), são classificados de grande porte os projetos que são:

I - Financiados com recursos do orçamento de investimento das estatais, de responsabilidade de empresas de capital aberto ou de suas subsidiárias, cujo valor total estimado seja igual ou superior a cem milhões de reais;

II - Financiados com recursos dos orçamentos fiscais e da seguridade social, ou com recursos do orçamento das empresas estatais que não se enquadrem no disposto do inciso anterior, cujo valor total estimado seja igual ou superior a vinte milhões de reais.

No art. 10, parágrafo 4 da mesma lei, são definidas as exigências de apresentação do estudo de viabilidade técnica e socioeconômica a ser submetido à avaliação prévia para os custos de:

I – Cem milhões de reais, quando financiados com recursos do orçamento de investimento das estatais, de responsabilidade de empresas de capital aberto ou de suas subsidiárias;

II – Cinquenta milhões de reais financiados com recursos dos orçamentos fiscais e da seguridade social, ou com recursos do orçamento das empresas estatais que não se enquadrem no disposto do inciso anterior.

O estudo de viabilidade em empreendimentos de transportes é um conjunto de estudos que abordam, dentre outros, os aspectos técnicos, financeiro e ambiental (MPOG, 2009).

2.3.1 Análise técnica

A análise de viabilidade técnica está ligada ao projeto, que deverá ser tecnicamente viável, ou seja, a viabilidade deve levantar a existência de qualquer problema técnico que configure empecilho à implantação e/ou à operação do empreendimento (CONSALTER, 2012).

Os aspectos técnicos envolvem a apresentação das características físicas do novo projeto, abordando opções técnicas avaliadas, o detalhamento técnico do projeto e sua vida útil. Além disso, a análise deve apresentar um cronograma físico que compreenda as etapas da execução do projeto.

2.3.2 Análise financeira

A análise financeira deve ser conduzida de forma a demonstrar as despesas e receitas financeiras derivadas do projeto que afetam o setor público. Entende-se que este último deve ser considerado em seu conjunto quando do envolvimento de entidades públicas distintas no mesmo projeto. O horizonte temporal a ser considerado deve ser, no mínimo, igual a dez anos (somados os períodos de implantação e operação) e, no máximo, igual à vida útil estimada para o empreendimento (MPOG, 2009).

A análise financeira envolve três etapas: a primeira, com detalhamento dos gastos na fase de implantação, deve explicitar a existência ou não de financiamento externo; a segunda detalha os gastos na fase de operação, como custos de pessoal, de aquisição e de manutenção da frota, de materiais e equipamentos, de energia elétrica e de aluguel (MPOG, 2009); a terceira calcula a receita e o fluxo de caixa financeiro. Assim, com base no fluxo de caixa, são aplicados métodos de análise de investimentos como o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR), a relação custo/benefício (B/C) e o tempo de recuperação (*payback*) dos custos para avaliar a implantação das tecnologias envolvidas.

O valor presente líquido (VPL) de um fluxo de caixa é igual ao valor presente de suas parcelas futuras levadas para data zero (data do investimento) a uma taxa de mercado (ou taxa de atratividade) somada algebricamente ao seu investimento. Se $VPL > 0$, então o projeto é viável, caso contrário o projeto é inviável. No cálculo do VPL deve-se observar o sinal: se for uma saída, deve ser negativo; se for entrada, deve ser positivo.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) de uma proposta de investimento é definida como sendo a taxa de juros para a qual o valor presente dos recebimentos resultante do projeto é exatamente igual ao valor presente dos desembolsos. Logo, esse método consiste em determinar, para cada investimento que se pretenda realizar, a taxa de juros que proporciona um fluxo de caixa equivalente ao que se espera obter com o projeto.

2.3.3 Análise ambiental

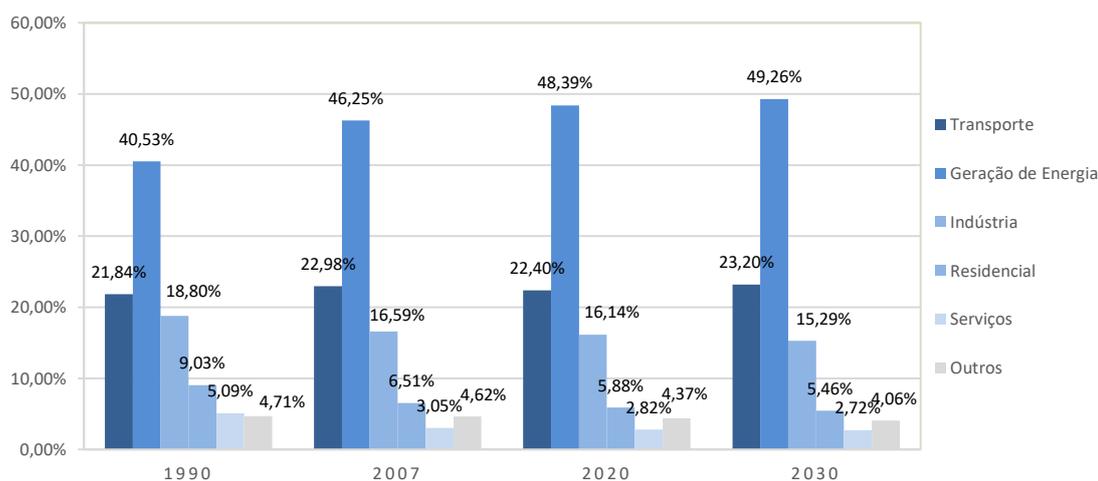
A análise ambiental busca apontar os impactos ambientais gerados pela implantação do novo projeto, além dos advindos pela operação do empreendimento. Nessa análise existem dois itens importantes a serem estudados: os danos ambientais e suas mitigações

No item de danos ambientais, devem ser destacados os malefícios causados pela implantação do projeto como, por exemplo, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e o consumo energético de um determinado objeto.

No item de mitigações, destacam-se as iniciativas a serem tomadas para mitigar os prejuízos mencionados no item anterior. Dentre essas iniciativas, encontram-se o reflorestamento com plantas nativas da região; a recuperação e o manejo sustentável de microbacias na área de influência do projeto; e o saneamento ambiental adequado, com acondicionamento, tratamento e destinação de esgoto e de resíduos sólidos produzidos pela operação do investimento. Os custos relativos à mitigação ambiental devem estar contidos nos gastos com implantação e/ou gastos com operação.

O setor de transporte é responsável por 23% do total de emissões globais de CO₂ oriundas do consumo de combustíveis fósseis, como indicado no Gráfico 1 abaixo.

Gráfico 1 - Projeção percentual da emissão de CO₂ mundial em relação à energia.



Fonte: Adaptado de OECD (2010).

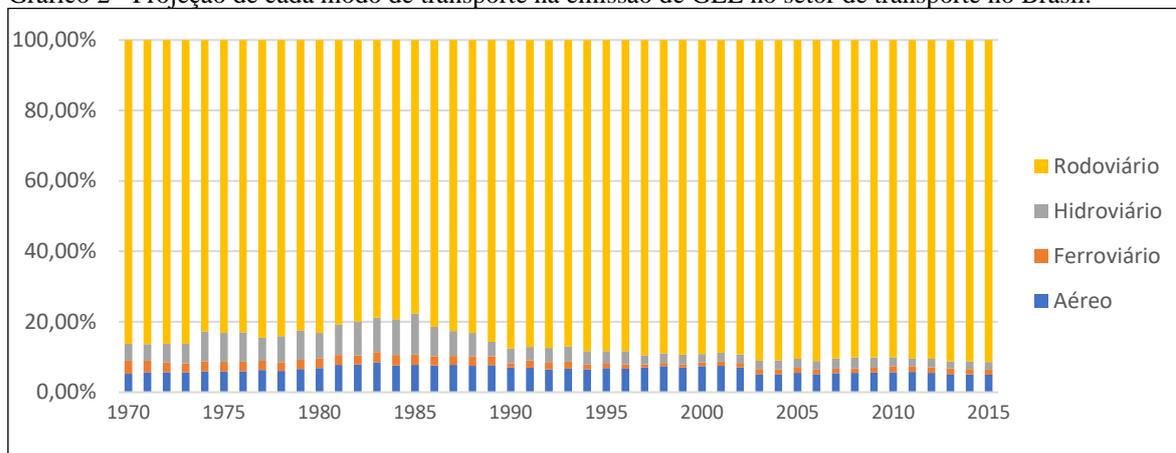
A quantidade de GEE emitidos em 2013 pelo setor de transportes do Brasil chegou a 215 milhões de toneladas, correspondendo a 46,9% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira (EPE, 2014).

Os veículos automotores representam, em nível mundial, o principal causador de poluição do ar nas grandes cidades, especialmente devido à sua fonte energética, proveniente de combustíveis fósseis. Os veículos individuais naturalmente geram maior emissão de CO₂ pelo uso da gasolina, enquanto os ônibus adotam o óleo diesel como fonte de energia. Segundo a ONU (2011), o transporte rodoviário é responsável pela maioria das emissões

atuais e pelo seu crescimento estimado, já que a previsão é de que a frota global de veículos será multiplicada em até 4 vezes até 2050, tendo como base o ano de 2010.

O Gráfico 2 mostra a evolução da participação de cada modo de transporte na emissão de GEE no setor de transporte no Brasil.

Gráfico 2 - Projeção de cada modo de transporte na emissão de GEE no setor de transporte no Brasil.



Fonte: Adaptado de SEEG (2017).

O cálculo das emissões de CO₂ dos ônibus é pautado na quantidade de queima de litros de combustível – geralmente o óleo diesel – multiplicada por um fator de emissão médio. No Brasil, considerando a lotação máxima de 80 passageiros dos ônibus, a emissão equivale a 16 gCO₂/pkm. Para fins de comparação, um estudo apontou que a emissão total na operação da linha 04 do metrô do Rio de Janeiro gira em torno de 0,78 gCO₂/pkm (ANDRADE, 2016; IPEA, 2011).

A autoridade de transporte da cidade de Londres realizou um estudo mostrando a emissão de gCO₂/pkm de diversos sistemas de transporte. Essa comparação comprova o melhor desempenho dos metrôs quanto à menor emissão de CO₂. Enquanto o Metrô de Londres emite 50 gCO₂/pkm, os ônibus em Londres emitem 80 gCO₂/pkm, e os automóveis 110 gCO₂/pkm, considerando a lotação média de passageiros (TFL, 2008).

Segundo Hodges (2010), nos Estados Unidos as médias de emissões para os metrôs são de 62 gCO₂/pkm, enquanto as dos ônibus chegam a 180 gCO₂/pkm, considerando a lotação média dos sistemas. Conclui-se então que as emissões dos ônibus são 3 vezes maiores que as dos metrôs. Esse levantamento revelou também as taxas de ocupação médias desses dois sistemas em todo o país, apontando 47% de ocupação nos metrôs e 28% nos ônibus.

As emissões de CO₂ na operação de sistemas de metrô ocorrem principalmente na geração da energia elétrica necessária para prover a força de tração dos trens dos sistemas metroviários, visto que estes são grandes consumidores de energia. O Metrô de Londres consome mais de 1 TWh (tonelada watts-horas) por ano, valor responsável por 2,8% de todo o consumo da cidade, sendo o seu maior consumidor individual (TFL, 2008).

Na maior parte dos países desenvolvidos, a energia provém da queima de combustíveis nas fontes térmicas que compõem a matriz de geração de eletricidade. A energia elétrica consumida na tração dos trens representa usualmente a maior parte da energia elétrica operacional total consumida, tipicamente em torno de 65% a 75%. O restante da energia consumida é destinado para suprir a iluminação da estação e os equipamentos auxiliares, como escadas rolantes, salas técnicas, entre outros.

No Brasil, o sistema de energia elétrica provém do Sistema Interligado Nacional (SIN), não sendo possível, portanto, identificar a origem da fonte energética utilizada na geração de energia para os sistemas de metrô brasileiros. Por isso, para calcular as emissões de CO₂ por eletricidade no Brasil, são utilizados os fatores médios nacionais de emissão do setor elétrico.

Os valores das emissões de CO₂ resultantes da geração da energia elétrica utilizada nos metrô apresentam grande variação de resultados entre os sistemas pesquisados ao redor do mundo. Isso se dá em função das diferentes matrizes energéticas utilizadas em cada local. Na maioria dos países da Europa, da Ásia e da Oceania, existe a predominância de fontes térmicas, com mistura de carvão, óleo e gás – tipos de fontes de maior emissão. No Brasil, há pouca utilização de fontes térmicas na geração de energia elétrica, com predominância de hidroelétricas, responsáveis por 67,8% do total da matriz energética (CoMET, 2008).

2.4 Avaliação de projetos de transporte público

Como mostrado anteriormente, diferentes aspectos devem ser levados em consideração na avaliação de um projeto. Contudo, seja privado ou público, sua implantação somente se faz possível mediante viabilidades técnica e financeira. A primeira, baseada em normas e leis vigentes, busca verificar a existência de capacitação técnica para a implantação do projeto em estudo. Já a viabilidade financeira analisa se existe disponibilidade de recurso monetário, seja próprio ou advindo de financiamento, para a execução e a operação de um empreendimento (FERRAZ e TORRES, 2004).

Além disso, Ferraz e Torres (2004) abordam também a viabilidade quanto ao patrocinador do projeto. No caso de projeto de ordem privada, a viabilidade puramente econômica, valorizando os custos e os benefícios monetários, se faz primordial para a verificação de sua rentabilidade. Já no caso de projeto de ordem pública, é importante que sejam analisadas as viabilidades social e política, de modo que os custos e os benefícios não-monetários dessas dimensões devem ser obrigatoriamente avaliados. Além disso, é preciso que os impactos diretos e indiretos sobre a população e o meio ambiente sejam incluídos no processo de avaliação.

Cabe ressaltar que determinado projeto público pode ser inviável segundo uma análise puramente econômica, mas, caso possua fortes argumentos, sejam sociais e/ou políticos, o empreendimento poderá ser realizado. Tal afirmação aponta a relevância dos aspectos sociais e políticos quando o projeto é de ordem pública (FERRAZ e TORRES, 2004).

A viabilidade técnica é o único fator que se sobrepõe às outras dimensões, independentemente do patrocinador do empreendimento. Uma vez que o projeto é dado como tecnicamente inviável, não importa a resposta das outras dimensões: o empreendimento não poderá ser executado.

2.5 Tópicos conclusivos

Em função do apresentado neste capítulo de revisão bibliográfica, podemos destacar certos aspectos a serem trabalhados ao longo deste estudo.

O primeiro ponto é a definição do universo da pesquisa, que consiste nos sistemas de transportes ferroviários elétricos de média capacidade – definidos como sendo aqueles que comportam a demanda de 10 mil a 30 mil *pphps*.

Entre os modos apresentados, foram escolhidos o VLT e o Monotrilho para comparação com o MagLev. Isso porque o VLT, além de se enquadrar na definição de média capacidade, é uma tecnologia consolidada em todo o mundo, o que facilita a obtenção de dados operacionais sobre o veículo.

Já a escolha do Monotrilho se justifica pela maior proximidade em relação à capacidade, à velocidade operacional e aos impactos ambientais, além do fato de ser, preferencialmente, construído em vias elevadas, tal como o MagLev.

Com base nas características operacionais das três tecnologias abordadas ao longo deste trabalho, elaborou-se um quadro comparativo entre os veículos, já adaptados às exigências do ambiente, como demonstrado abaixo.

Tabela 18 - Quadro comparativo com as características operacionais das tecnologias urbanas abordadas.

CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS	VLT	MONOTRILHO	MAGLEV
Comprimento Total do Veículo (m)	44,00	85,00	110,80
Largura (m)	2,65	3,15	1,50
Altura do Veículo (m)	3,60	2,10	2,70
Rampa Máxima Operacional	7,0%	6,0%	15,0%
Velocidade Máxima (km/h)	70,00	80,00	80,00
Velocidade Comercial Média (km/h)	20,00	35,00	35,00
Distância Média de Parada (m)	830	1100	830
Raio de Curva Horizontal (m)	25,00	60,00	30,00
Quantidade de Carros/Composição	2	7	4
Capacidade por Carro (pass)	375	140	250
Capacidade da Linha (pass/hora/sentido)	15.000	20.000	15.000

Fonte: Adaptado de Bernardes e Ferreira (2015), CNT (2016) e Stephan *et al.* (2018)

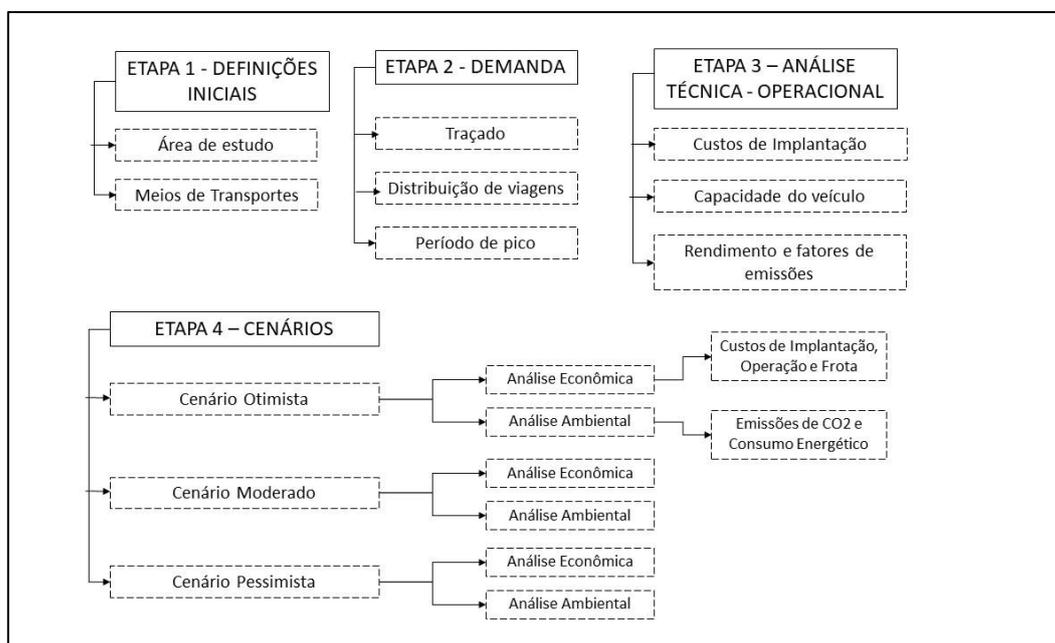
Vale ressaltar que as dimensões do veículo, a capacidade por carro e a quantidade de carros por composição dos veículos de MagLev na tabela acima são as referências adotadas pela dissertação, mas podem variar em função da necessidade de outros projetos. Isso se deve ao fato de não existir uma linha em operação no mundo, portanto não há dimensionamento preestabelecido.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para a realização deste trabalho, pesquisou-se a metodologia mais adequada para o atendimento dos objetivos propostos. O procedimento metodológico visa definir o tipo de pesquisa, a população (universo da pesquisa), a amostragem, os instrumentos de coleta de dados e a forma como se pretende tabular e analisar esses dados.

O presente capítulo descreve como esta pesquisa foi planejada, incluindo a área de estudo escolhida, os parâmetros da demanda, os meios de transportes analisados, suas características particulares e os cenários de aplicação.

Figura 10 - Fluxograma das etapas definidas para análise da viabilidade econômica e ambiental dos meios.



Fonte: Elaboração própria.

3.1 Definições iniciais

A pesquisa deve estabelecer, a priori, o entendimento de conceitos necessários para a estruturação e o desenvolvimento do trabalho, tais como os aspectos do estudo de viabilidade e a classificação dos sistemas de transporte quanto à sua capacidade e/ou energia de propulsão.

Em seguida, deve-se determinar o enfoque do estudo; neste caso, os modos de transporte elétricos de média capacidade e a área de estudo para sua aplicação.

Com a área de estudo definida, o passo seguinte é identificar os meios de transporte coletivo urbano de média capacidade, sua disponibilidade na região e a disposição viária para sua implantação.

3.2 Demanda

O estudo da demanda realizado neste trabalho baseou-se em três pontos: traçado, projeção da demanda e distribuição de viagens.

A proposta de traçado envolve a análise estratégica de implantação de novas estações ou de readequação das existentes. Dentro do estudo do traçado, é preciso ter atenção quanto ao dimensionamento da distância entre as paradas a fim de que o deslocamento se torne mais rápido e fluido. Sabe-se, pois, que as distâncias curtas entre as estações reduzem a velocidade comercial do sistema, enquanto as longas demais tendem a estimular a segregação espacial e desfavorecem atividades intermediárias como o comércio local.

A previsão da demanda futura, por sua vez, tem como objetivo orientar o estudo no que tange à variação da demanda em períodos futuros, com horizontes de tempo determinados de acordo com a necessidade de análise do trabalho. Dados socioeconômicos como tamanho da população, emprego, renda familiar, matrículas escolares, tamanho da família e posse de automóveis por região são comumente utilizados para o cálculo da demanda futura.

Por fim, de posse da demanda futura, o próximo passo é analisar a variação horária de viagens, identificando os horários de pico, uma vez que é a partir deles que o dimensionamento de frota é construído.

3.3 Análise técnica-operacional

Essa etapa tem como objetivo identificar características técnicas e operacionais específicas dos meios de transportes escolhidos para o estudo, como o comprimento total do veículo, a largura, a declividade máxima operacional, o raio de curvatura, a velocidade média comercial, o intervalo mínimo entre trens, a capacidade da composição e a capacidade da linha.

Para o cálculo da capacidade de linha, medida em passageiros/hora, Vuchic (2007) elaborou a fórmula descrita abaixo.

$$C_L = \frac{3600 \times n \times C_v}{h_{min}} \quad (1)$$

sendo C_L a capacidade da linha, n o número de carros por composição, C_v a capacidade de cada carro e o h_{min} o intervalo mínimo entre composições (em segundos).

Para análise de custos de implantação dos sistemas e de aquisição dos veículos, deve-se buscar referência dos respectivos trabalhos e converter os dados encontrados para o valor presente com base em algum índice que ajuste a inflação.

A estimativa de custos de implantação, em geral, envolve valores relativos à mão de obra especializada, à implantação do canteiro de obras, à construção da via permanente, à infraestrutura, às estações, ao sistema de inteligência, aos terminais e às obras de arte especiais necessárias ao longo do traçado.

O custo operacional pode ser calculado em função da demanda em determinado período. Alguns itens como custos de serviço, manutenção do material rodante, administrativo, gestão operacional, energia e manutenção das instalações fixas são bem usuais nesse tipo de detalhamento. No caso específico dos veículos de levitação magnética por supercondutores, é necessário incluir o custo mensal de abastecimento do veículo por nitrogênio líquido.

Para análise ambiental, existe uma variedade de parâmetros, dentre os quais: emissões de CO₂, material particulado, consumo energético, eficiência energética e poluição sonora.

3.4 Cenários

Para melhor compreensão das análises a serem realizadas, os dados devem ser aplicados em diferentes cenários, seja por alteração de demanda, por horizonte de tempo, ou por qualquer delimitação desejada. Os cenários ajudam a observar os dados em diferentes situações, almejando resultados mais plausíveis e condizentes com a realidade do local.

O método para análise econômica pretendida foi o fluxo de caixa – ferramenta da gestão financeira em que se pode acompanhar as movimentações financeiras de uma empresa ou setor, identificando as entradas e saídas de recursos, além de taxas. A sigla “LAJIDA” significa Lucros Antes de Juros, Impostos, Depreciações e Amortizações, e a sigla “LAJIR” representa Lucros Antes de Juros e Impostos de Renda.

Neste fluxo de caixa, foram estudados o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR), o *break even point* e o aporte público necessário para zerar o VPL com a tarifa vigente da área de estudo.

O método para análise ambiental foi calcular as emissões de dióxido de carbono e o consumo energético aplicados aos três cenários em função dos rendimentos e emissões de cada sistema de transportes.

3.5 Tópicos Conclusivos

Este capítulo teve como objetivo descrever a linha de pesquisa adotada para que fossem cumpridos os objetivos propostos pela dissertação.

O primeiro passo foi a definição da área de estudo, com suas delimitações e sistemas escolhidos para análise.

A etapa seguinte foi a escolha da demanda e do local para aplicação do estudo, com destaque para a projeção de distribuição de viagens, seus períodos de pico e o traçado.

Por fim, explicou-se como será realizada a análise técnico-operacional, quais serão os enfoques e em que cenários serão aplicadas as análises.

4. APLICAÇÃO DO ESTUDO

Este capítulo tem como finalidade a aplicação do procedimento metodológico, tendo a cidade de Goiânia como área de estudo, especificamente o Eixo Anhanguera.

4.1 Área de estudo

A dissertação desenvolveu-se em função do estudo de viabilidade da aplicação de três soluções em tecnologias ferroviárias de média capacidade no Eixo Anhanguera, localizado em Goiânia/GO, sob a ótica da análise econômica, técnica e ambiental.

O município de Goiânia, capital do estado de Goiás, é situado na Região Centro-Oeste do Brasil. Localizada no centro do estado, a cidade foi planejada e construída para ser a capital política e administrativa de Goiás sob influência da Marcha para o Oeste – política desenvolvida pelo governo de Getúlio Vargas para acelerar o desenvolvimento e incentivar a ocupação do Centro-Oeste brasileiro. O município sofreu um acelerado crescimento populacional desde a década de 1960, chegando a pouco mais de 1,5 milhão de habitantes, segundo estimativas do IBGE para 2019 (IBGE, 2020).

Nesse sentido, Goiânia é a segunda cidade mais populosa do Centro-Oeste, sendo superada apenas por Brasília. Considerada um centro estratégico para áreas como indústria, medicina, moda e agricultura, é um importante polo econômico da região (MIRAGAY, 2001).

O fator preponderante para a escolha do Eixo Anhanguera como área de estudo foi a sua importância como elemento estruturador do transporte coletivo de Goiânia e da região metropolitana. O Eixo Anhanguera foi implantado na década de 70, cuja operação restringiu-se ao trecho entre os terminais DERGO e Praça da Bíblia, com o intuito de racionalizar a rede de linhas radiais convencionais que existiam à época, integrando-as em terminais em um modelo conhecido como “tronco-alimentador” (RMTC/Odebrecht, 2012).

Modelos como esse visam ao aumento da produtividade do sistema sobre pneus, eliminando sobreposições de oferta e permitindo o uso de veículos de maior capacidade. Quando associados a um corredor exclusivo, proporcionam maior velocidade comercial e, por isso, menores frotas operacionais. Ademais, o Eixo Anhanguera foi implantado como um corredor segregado para a circulação dos ônibus no eixo da via. Tal medida proporcionou a garantia de maior velocidade para os ônibus e a reserva de um espaço viário exclusivo para o transporte coletivo (RMTC/Odebrecht, 2012).

No final dos anos 1990, o Corredor Anhanguera deu início à operação de ônibus articulados, à implantação do pagamento nas paradas e à implantação de plataformas centrais niveladas com o piso dos veículos e com embarque pelo lado esquerdo do ônibus. Essas medidas favoreceram o embarque e o desembarque de passageiros, refletindo na velocidade comercial (RMTC/Odebrecht, 2012).

Ao longo dos anos, o crescimento da frota de automóveis e as pressões pela ampliação dos pontos de travessia do Corredor levaram à abertura de várias interseções e a mudanças no plano semaforico, com consequências negativas para os tempos de viagem. A inexistência de faixas de ultrapassagem, de prioridade semaforica e de gerenciamento remoto com localização automática dificulta o controle e aumenta o tempo de viagem do usuário. A consequência é uma velocidade operacional de 17km/h na operação do corredor goianiense (Benedetti, 2013).

4.2 Demanda

O consórcio da Rede Metropolitana de Transportes Coletivos da Grande Goiânia (RMTC), em parceria com a prefeitura de Goiânia/GO, realizou em 2011 um projeto de viabilidade do VLT para aplicação no Eixo Anhanguera.

Atualmente esse corredor conta com 23 pontos de embarque e desembarque de passageiros, sendo que cinco deles estão associados a terminais de ônibus contendo o restante do sistema da RMTC e as outras 18 estações são destinadas ao atendimento de usuários lindeiros. Os cinco terminais podem ser agrupados em dois nas extremidades, Padre Pelágio e Novo Mundo, e três situados ao longo do Eixo: Dergo, Praça A e Praça da Bíblia. As estações intermediárias aos terminais são: Iquego, Capuava, Anicuns, Cascavel, José Hermano, Campinas, 24 de outubro, Lago das Rosas, HGG, Jockey Clube, Bandeirantes (Leste e Oeste), Rua 20, Botafogo, Universitária, BR-153, Vila Morais, Palmito e Anhanguera.

Os cinco terminais podem ser considerados os pontos de maior concentração de movimentos de embarque e desembarque de passageiros, com demandas superiores a 25 mil embarques diários, a exceção do Terminal Dergo, que tem 18 mil embarques por dia. Entre as estações comuns, destacam-se José Hermano, Campinas, HGG, Jockey Clube, Bandeirantes (Leste e Oeste) e Rua 20, com embarques diários entre 8 mil e 11 mil.

A demanda diária de VLT projetada para 2020 é de 270.370 passageiros nos dias úteis. Os dados mostram um período de pico matutino entre 7h e 8h com 26.538 viagens, e um

período vespertino entre 18h e 19h com 25.806 viagens. Foi considerado neste trabalho um total de 250 dias úteis por ano. Nesta demanda estão incluídos os passageiros com embarque nas plataformas do corredor registrados nas catracas entres os meses de agosto e novembro de 2011, como demonstrado na Tabela 19 abaixo.

Tabela 19 – Embarque de passageiros por faixa horária no Eixo Anhanguera.

Período	Faixa Hora	Embarque Total	Demanda	
			Term. Pq. Pelágio - Term. N.Mundo	Term. N. Mundo - Term. Pq. Pelágio
Pré-pico manhã	5h – 6h	8.178	4.622	3.556
Pico manhã	6h – 7h	24.672	13.944	10.727
	7h – 8h	26.538	15.000	11.538
Entre-pico manhã	8h – 9h	14.939	8.444	6.495
	9h – 10h	12.715	6.594	6.122
	10h – 11h	13.314	6.904	6.410
	11h – 12h	13.371	6.934	6.438
Pico almoço	12h – 13h	16.426	8.621	7.805
	13h – 14h	15.599	8.186	7.413
Entre-pico tarde	14h – 15h	14.085	6.648	7.437
	15h – 16h	15.548	7.339	8.209
	16h – 17h	18.139	8.562	9.577
Pico tarde	17h – 18h	24.935	11.055	13.880
	18h – 19h	25.806	11.441	14.365
Noite 1	19h – 20h	10.038	4.451	5.587
	20h – 21h	5.152	2.283	2.868
	21h – 22h	5.025	2.230	2.795
Noite 2	22h – 23h	4.925	2.463	2.463
	23h – 24h	965	483	483
Total		270.370	136.202	134.168

4.3 Aspectos Ambientais

Os parâmetros adotados para análise ambiental são as emissões de CO₂, dadas em gCO₂, e o consumo energético, dado em kWh. Para balizar este estudo, foram aplicados os valores encontrados no Inventário da MCTIC de 2018.

O modelo estudado para as análises do VLT foi um sistema com catenárias, em que a alimentação é feita através de energia elétrica em tensão de trabalho de 750 Vcc suprida por sistema de rede aérea. O Plano de Negócios do VLT para Cuiabá/MT, realizado pela empresa KPMG em 2016, calculou os seguintes valores de consumo por linha:

Tabela 20 – Consumo de energia elétrica anual por linha.

LINHAS	Consumo Anual (kWh)	Quilometragem Percorrida (km)	kWh/km
L1: Aeroporto – CPA	10.531.383,80	1.380.260,00	7,63
L2: Centro - Coxipó	8.077.693,75	923.165,00	8,75

Fonte: KPMG (2016)

Com base nesses valores, foi calculada a média ponderada de consumo de energia elétrica por quilômetro rodado entre as duas linhas, cujo resultado foi o valor de 8,08 kWh/km rodado. Partindo do princípio de que o veículo de VLT comporta até 600 passageiros, o consumo energético é dado em 0,0135 kWh/pkm. Tal resultado será adotado para as contas futuras de consumo energético do VLT na dissertação.

Pedroso (2017) defendeu uma tese sobre a avaliação energética, econômica e socioambiental para sistemas de transportes urbanos. Em sua pesquisa, o autor propôs um inventário baseado nos dados fornecidos pelas principais fabricantes de veículos para o sistema Monotrilho no mundo, como apresentado abaixo.

Tabela 21 – Inventário sobre dados de veículos de monotrilho

	HITACHI	SCOMI	BOMBARDIER
QUANTIDADE DE CARROS	4	4	7
CAPACIDADE (POR CARRO)	140	121	143
POTÊNCIA EM kW (POR CARRO)	180	200	200
VELOCIDADE MÉDIA (km/h)	35	35	35
INTENSIDADE ENERGÉTICA (kWh/pkm)	0,0367	0,0472	0,040
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (pkm/kWh)	27,222	21,175	25,025

Fonte: Pedroso (2017).

Baseado no resultado encontrado pelo autor para o consumo energético do veículo Bombardier, que é o mesmo aplicado nesta dissertação, é possível calcular a emissão de CO_{2eq} do veículo adotando o valor de 74,00 gCO₂/kWh, estabelecido no inventário do MCTIC de 2019. O valor da emissão de CO₂ encontrado é de 2,957 gCO₂/pkm.

Moura (2016) realizou uma análise energética deste módulo de transporte com aferições in loco da energia consumida em um ciclo na linha experimental de 168 m de extensão usando três situações de ocupação do veículo (20%, 30% e 55% da capacidade). O veículo vazio foi pesado e a massa encontrada foi de 2.240 kg. Além disso, foi adotado um peso padrão de 70 kg por passageiro.

Em função dos dados obtidos, foi projetada uma equação para determinar os valores de consumo energético para uma ocupação total do veículo. Tal equação se encontra abaixo:

$$y = -(8 \times 10^{-8})x^2 + 0,0005x - 0,5401 \quad (2)$$

em que y é o consumo energético, em kWh, de um ciclo e x é o peso do veículo, em kg.

Tabela 22 – Indicadores ambientais em função da ocupação do veículo MagLev-Cobra.

Massa (kg)	Ocupação	Cons. Ciclo (kW)	Cons. Hora (kWh)	Cons. Dia (kWh)
2.240	0%	0,104	0,622	5,633
2.590	25%	0,130	0,780	6,240
2.660	30%	0,137	0,822	6,576
3.010	55%	0,140	0,840	6,720
3.640	100%	0,220	1,320	10,557

Fonte: Moura (2016).

Com os resultados encontrados, os dados obtidos foram adaptados para a realidade da aplicação na dissertação, com as dimensões obtidas no tópico 4.2 e suas respectivas massas de acordo com o percentual de ocupação do veículo.

Tabela 23 – Indicadores ambientais em função da ocupação do veículo MagLev dimensionado.

Massa (kg)	Ocupação	Cons. Ciclo (kW)	Cons. Hora (kWh)	Cons. Dia (kWh)
31.065	0%	1,437	8,621	68,964
52.940	25%	2,657	15,943	127,547
57.315	30%	2,952	17,712	141,693
79.190	55%	3,683	22,100	176,796
118.565	100%	3,977	23,864	190,910

Fonte: Reprodução própria, baseado em Moura (2016).

Em função dos dados obtidos, foi projetada uma nova equação, que se encontra abaixo:

$$y = -(4 \times 10^{-10})x^2 + (9 \times 10^{-5})x - 1,0705 \quad (2)$$

em que y é o consumo energético, em kWh, de um ciclo de 10 minutos e x é o peso do veículo, em kg.

Para se chegar à unidade de medida em passageiro.km (pkm) no resultado obtido, podemos estimar o valor do consumo energético do veículo do MagLev-Cobra.

$$\text{Consumo Energético} = \frac{23,864 \text{ kWh}}{(1250 \text{ pass.} * (13,5 \text{ km}))} = 0,00141 \text{ kWh/pkm} \quad (3)$$

A aplicação do fator de conversão do inventário do MCTIC (2019) ao valor de consumo energético acima resultou no valor de referência de emissão de CO₂ para o MagLev.

$$\text{Emissão de CO}_2 = 0,00141 \frac{\text{kWh}}{\text{pkm}} * 74,00 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}} = 0,1046 \text{ gCO}_2/\text{pkm} \quad (4)$$

Baseado nas referências pesquisadas, foram obtidos os seguintes valores de parâmetros para os sistemas estudados:

Tabela 24 - Valores de parâmetros de emissões de CO₂ e de consumo energético.

	Emissão de CO₂ (gCO₂/pkm)	Consumo Energético (kWh/pkm)	Fonte:
VLT	0,997	0,0135	MCTIC (2018)
MONOTRILHO	2,957	0,0400	Pedroso (2017)
MAGLEV	0,105	0,0014	Reprodução Própria

4.4 Cálculo da Frota Total

O cálculo da frota operante (FO) foi obtido a partir da equação entre a demanda de passageiros no sentido de maior fluxo no horário de pico (Pass.), o tempo de ciclo (TC) em segundos e a capacidade do veículo (Cv).

$$FO = \frac{(\text{Pass}/C_v) \times TC}{3600} \quad (5)$$

A frota reserva (FR) é igual a 10% da frota operante, e a frota total é o somatório das frotas operante e reserva. A capacidade de um veículo de VLT é de 600 passageiros, enquanto a do MagLev e do Monotrilho são de 1000 passageiros.

Tabela 25 – Cálculo da frota operacional para cada sistema de transporte.

Período	Faixa Hora	Embarque Total	Frota (VLT)	Frota (MAGLEV)	Frota (MONOTRILHO)
Pré-pico manhã	5h – 6h	8.178	11	4	4
Pico manhã	6h – 7h	24.672	32	11	11
	7h – 8h	26.538	34	12	12
	8h – 9h	14.939	20	7	7
Entre-pico manhã	9h – 10h	12.715	15	6	6
	10h – 11h	13.314	16	6	6
	11h – 12h	13.371	16	6	6
Pico almoço	12h – 13h	16.426	20	7	7
	13h – 14h	15.599	19	7	7
Entre-pico tarde	14h – 15h	14.085	17	6	6
	15h – 16h	15.548	19	7	7
Pico tarde	16h – 17h	18.139	22	8	8
	17h – 18h	24.935	32	11	11
	18h – 19h	25.806	33	12	12
Noite 1	19h – 20h	10.038	13	5	5
	20h – 21h	5.152	7	3	3
	21h – 22h	5.025	7	3	3
Noite 2	22h – 23h	4.925	6	2	2
	23h – 24h	965	2	1	1
Total		270.370			

Fonte: Reprodução própria

Tabela 26 – Resumo da frota total para cada sistema.

	VLT	MAGLEV	MONOTRILHO
Demanda (passageiros)	15.000	15.000	15.000
Capacidade do veículo (Cv)	600	1000	1000
Tempo de Ciclo (s)	4896	2798	2798
Velocidade Média (km/h)	20	35	35
Frota Operante	34	12	12
Frota Reserva	4	2	2
Frota Total	38	14	14

Fonte: Reprodução própria.

4.5 Aquisição dos Veículos

Os valores de aquisição dos veículos foram calculados a partir de um conjunto de casos de tecnologias em operação com dados consolidados, como explicitado abaixo:

Tabela 27 – Custos de aquisição de veículos para a tecnologia VLT em operação no mundo.

Nº	MODELO	LOCAL	ANO	FROTA	CUSTO UNITÁRIO ¹	CUSTO EM DÓLAR (JUL/2019)
1	ALSTOM 402	Rio de Janeiro/Brasil	2015	32	€ 7.187.500,00	US\$ 8.042.747,81
2	ALSTOM 302	Goiânia/Brasil	2015	60	R\$ 7.750.000,00	US\$ 2.690.390,39
3	ALSTOM 402	Dublin/Irlanda	2017	7	€ 5.000.000,00	US\$ 5.594.786,00
4	CAF	Besançon/França	2014	19	€ 1.831.578,95	US\$ 2.049.650,40
5	ALSTOM 302/402	Bordeaux/França	2020	47	€ 3.255.319,15	US\$ 3.642.702,13
6	ALSTON 302	Dijon/França	2012	32	€ 2.050.000,00	US\$ 2.293.910,85
7	ALSTON 302	Paris/França	2019	15	€ 3.000.000,00	US\$ 3.357.000,00
8	ALSTON 302	Paris/França	2013	19	€ 2.605.263,16	US\$ 2.915.272,28
9	ALSTON 302	Tours/França	2013	21	€ 3.476.190,48	US\$ 3.889.834,20

Fonte: Reprodução própria, baseado em dados do site da Alstom e Swedsoft.

A partir dos dados obtidos, retiraram-se os valores extremos e calculou-se a média por veículo de VLT adquirido (US\$ 3.483.413,69). Nesse valor, aplicou-se a conversão para real, com base na cotação do dólar em julho de 2019, que era de R\$ 3,85. Sendo assim, cada veículo de VLT é adquirido por R\$ 13.411.142,71.

Tabela 28 – Custos de aquisição de veículos para a tecnologia Monotrilho em operação no mundo.

Nº	LOCAL	ANO	FROTA	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO EM DÓLAR (JUL/2019)
1	São Paulo/Brasil	2019	14	R\$ 81.377.930,95	US\$ 21.137.124,92
2	Seattle/EUA	2012	15	US\$ 15.000.000,00	US\$ 29.464.285,71
3	Mumbai/Índia	2014	16	US\$ 26.406.250,00	US\$ 43.261.303,19
4	Moscou/Rússia	2014	6	US\$ 10.000.000,00	US\$ 16.382.978,72

Fonte: Reprodução própria, baseado em dados do site da Metrô CPTM.

A partir dos 4 casos estudados, retirou-se o valor de Mumbai por se tratar de um ponto fora da curva e calculou-se a média por veículo de Monotrilho adquirido (US\$ 22.328.129,79). Novamente foi convertido o valor para real, baseado na cotação do dólar

em julho de 2019, que era de R\$ 3,85. Sendo assim, cada veículo de Monotrilho é adquirido por R\$ 85.963.299,69.

Como não existe um sistema em operação dos veículos de levitação magnética para que se possa obter dados de aquisição de veículos, foram obtidos valores hipotéticos a partir de elementos definidos para o veículo experimental do MagLev-Cobra.

A carroceria do protótipo custou R\$ 99.310,00, sendo 1,5 m de comprimento e 2,5 m de largura, o que dá um custo de R\$ 26.482,76 por m² de carroceria. Esta taxa foi usada adiante para projetar o valor do veículo escolhido.

$$C_v = \frac{C_L x h_{min}}{3600 x n} = \frac{15000 x 240}{3600 x n} = 1000/n \quad (6)$$

Tabela 29 – Dimensionamento do veículo MAGLEV

Número de Carros por Composição	3	4	5	6
Comprimento do Carro em mts	37,10	27,70	22,20	18,50
Largura do Carro em mts	1,50	1,50	1,50	1,50
Custo da Carroceria por Carro (em Reais)	R\$ 1.473.766,00	R\$ 1.100.359,00	R\$ 881.876,00	R\$ 734.897,00
Custo da Carroceria por Composição (em Reais)	R\$ 4.421.298,00	R\$ 4.401.436,00	R\$4.409.380,00	R\$ 4.409.382,00

Fonte: Reprodução própria.

Como demonstrado na tabela, as dimensões com menor custo por composição foram carros de 27,7 m de comprimento, com 4 carros por composição. Os dados de entrada abaixo foram obtidos através de informações fornecidas pela equipe do laboratório de supercondutores da UFRJ.

- Número de passageiros por carro (pass.): 250 passageiros
- Peso médio de passageiros (P): 70 quilogramas.
- Quantidade de carros por composição (n): 4 carros.
- Dimensões do carro (Largura x Comprimento): 1,50 x 27,70 metros.
- Peso da composição por m² (P_{COMP.}): 149,33 kg/m².
- Capacidade de carga do criostato (Cap._{CR}): 200 quilogramas.
- Preço unitário criostato (Custo_{CR}): R\$ 2.500,00
- Custo da carroceria por metro quadrado (Custo_{CARR}): R\$ 1.100.359,00
- Custo do motor linear por metro (Custo_{ML}): R\$ 30.000,00

- Custo do ar-condicionado por metro (Custo_{AR}): R\$ 2.000,00

Sabendo que cada criostato suporta uma carga de 200kg, calculou-se o peso do veículo por m² e a quantidade de criostatos necessários para suportar o peso do trem e possibilitar sua levitação. Além disso, foi adotado um desconto de 20% no investimento do criostato, assumindo-se o princípio de economia de escala, que propõe uma redução nos custos de produção de determinado produto em larga escala.

Tabela 30 – Custos detalhados da aquisição de 14 veículos de levitação magnética.

A. Carga por Carro (Peso x pass.)	14.000,00 kg	F. Investimento criostato com o bloco/veículo (Custo _{CR} x E x n)	R\$ 810.000,00
B. Área do carro (L x C)	166,20 m ²	G. Investimento na carroceria (Custo _{CARR} x n)	R\$ 4.401.436,00
C. Tara (Área x P _{COMP.})	24.864,00 kg	H. Investimento Motor Linear e Ar-Condicionado (Custo _{AR} + Custo _{ML}) x (Comp. x n)	R\$ 3.581.600,00
D. Peso Total (Tara + Carga x n)	80.864,00 kg	I. Custo Total por Composição (F + G + H)	R\$ 8.793.036,00
E. Quantidade Total de criostato. (Peso Total/Cap. _{CR})	405 unidades	J. Custo Total de Aquisição de veículos (14 x I)	R\$ 123.102.504,00

Fonte: Reprodução própria.

4.6 Custo de implantação

Para análise de custos de implantação dos sistemas e de aquisição dos veículos, foram pesquisados exemplos de projetos com base na data de referência dos respectivos trabalhos. Em seguida, os custos foram convertidos para o valor presente baseado no índice IGP-M, que foi escolhido por registrar a inflação de bens de produção, como matérias-primas e materiais de construção, e por ser o índice adotado para reajustes de tarifas públicas.

A estimativa de custos de implantação e de aquisição dos veículos do VLT foi baseada em dados do projeto do Eixo Anhanguera, datado em maio de 2011, cuja extensão é de 13,5 km. Na planilha desse documento registrou-se que o investimento no projeto básico é equivalente a 3% do custo total de infraestrutura. Tal proporção foi mantida para os outros sistemas. Os custos de implantação do VLT estão detalhados abaixo:

Tabela 31 – Custos detalhados de implantação do VLT de 13,5km.

Corredor				R\$ 427.505.120,00
ATIVIDADES	Qtd.	Unidade	Valor Unitário	Valor Total
Via Permanente				R\$ 254.105.120,00
Projeto Básico	3	%	R\$ 2.467.040,00	R\$ 7.401.120,00
Desvios	13,60	Km	R\$ 450.000,00	R\$ 6.120.000,00
Inst. Provisórias	1	Global	R\$ 15.000.000,00	R\$ 15.000.000,00
Viadutos	0,272	Km	R\$ 22.000.000,00	R\$ 5.984.000,00
Trincheira	0,79	Km	R\$ 80.000.000,00	R\$ 63.200.000,00
Via Permanente	13,6	Km	R\$ 2.900.000,00	R\$ 39.440.000,00
Infra e Superestrutura	13,6	Km	R\$ 8.600.000,00	R\$ 116.960.000,00
Sistema de Alimentação				R\$ 119.200.000,00
Sistema Catenária	13,6	Km	R\$ 2.000.000,00	R\$ 27.200.000,00
Subestações Primárias	1	un.	R\$ 20.000.000,00	R\$ 20.000.000,00
Subestações de Alimentação	9	un.	R\$ 8.000.000,00	R\$ 72.000.000,00
Sistema de Sinalização e Controle				R\$ 33.000.000,00
Subsistema de Rastreamento	1	Global	R\$ 12.000.000,00	R\$ 12.000.000,00
Subsistema Auxiliar	1	Global	R\$ 8.000.000,00	R\$ 8.000.000,00
Subsistema de Intertravamento	8	un.	R\$ 1.000.000,00	R\$ 8.000.000,00
Subsistema de Semáforo	1	Global	R\$ 5.000.000,00	R\$ 5.000.000,00
Sistema de Telecomunicações				R\$ 21.200.000,00
Subsistema de Dados	1	Global	R\$ 6.000.000,00	R\$ 6.000.000,00
Subsistema de Telefonia	1	Global	R\$ 1.000.000,00	R\$ 1.000.000,00
CFTV	1	Global	R\$ 6.500.000,00	R\$ 6.500.000,00
Subsistema de Sonorização	1	Global	R\$ 1.500.000,00	R\$ 1.500.000,00
Subsistema de Informação do Usuário	1	Global	R\$ 5.500.000,00	R\$ 5.500.000,00
Subsistema de Cronometria	1	Global	R\$ 700.000,00	R\$ 700.000,00
Terminais de Integração				R\$ 16.049.635,00
Terminal Novo Mundo				R\$ 3.411.249,49
Projeto Básico	3	%	R\$ 33.118,93	R\$ 99.356,78
Obra Civil	3.015,30	m ²	R\$ 998,87	R\$ 3.011.892,71
Comunicação	1	global	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	8	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 120.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Terminal Praça da Bíblia				R\$ 4.482.893,92
Projeto Básico	3	%	R\$ 43.523,24	R\$ 130.569,73
Obra Civil	1.704,25	m ²	R\$ 998,87	R\$ 1.702.324,20
Comunicação	1	global	R\$ 70.000,00	R\$ 70.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	8	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 120.000,00
Elevador	6	un.	R\$ 60.000,00	R\$ 360.000,00
Escadas Rolantes	10	un.	R\$ 200.000,00	R\$ 2.000.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00

Terminal Praça "A"				R\$ 3.313.411,28
Projeto Básico	3	%	R\$ 32.169,04	R\$ 96.507,12
Obra Civil	1.288,36	m²	R\$ 998,87	R\$ 1.286.904,15
Comunicação	1	global	R\$ 70.000,00	R\$ 70.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	8	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 120.000,00
Elevador	4	un.	R\$ 60.000,00	R\$ 240.000,00
Escadas Rolantes	7	un.	R\$ 200.000,00	R\$ 1.400.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Terminal Dergo				R\$ 2.079.665,26
Projeto Básico	3	%	R\$ 20.190,92	R\$ 60.572,77
Obra Civil	1.360,63	m²	R\$ 998,87	R\$ 1.359.092,49
Comunicação	1	global	R\$ 400.000,00	R\$ 400.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	12	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 180.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00
Terminal Novo Mundo				R\$ 2.762.415,04
Projeto Básico	3	%	R\$ 26.819,56	R\$ 80.458,69
Obra Civil	2.224,47	m²	R\$ 998,87	R\$ 2.221.956,35
Comunicação	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	16	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 240.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 120.000,00	R\$ 120.000,00
Estações de Parada - 17 padrão e 1 especial				R\$26.730.759,06
Estação Padrão (17 ESTAÇÕES)	Qtd.	Un.	Valor Unitário	R\$22.499.181,73
Projeto Básico	3	%	R\$ 12.849,33	R\$ 38.548,00
Obra Civil	944,00	m²	R\$ 998,87	R\$ 942.933,28
Comunicação	1	global	R\$ 12.000,00	R\$ 12.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	6	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 90.000,00
Portas de Plataforma	16	global	R\$ 15.000,00	R\$ 240.000,00
BR 153 (Subterrâneo)				R\$ 4.231.577,33
Projeto Básico	3	%	R\$ 41.083,28	R\$ 123.249,83
Obra Civil	650,00	m²	R\$ 4.994,35	R\$ 3.246.327,50
Comunicação	1	global	R\$ 12.000,00	R\$ 12.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	6	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 90.000,00
Escadas Rolantes	2	global	R\$ 200.000,00	R\$ 400.000,00
Elevador	2	global	R\$ 60.000,00	R\$ 120.000,00
Portas de Plataforma	16	Global	R\$ 15.000,00	R\$ 240.000,00
Pátio Novo Mundo e CCO, Reurbanização e Paisagismo				R\$201.249.387,61
Pátio Novo Mundo e CCO	Qtd.	Un.	Valor Unitário	R\$108.446.053,05
Obra Civil (Solo e Edificações)	61.015,00	m²	R\$998,87	R\$ 60.946.053,05
Via Permanente	5,00	km	R\$ 2.900.000,00	R\$ 14.500.000,00
Equipamentos de Manutenção	1	global	R\$ 18.000.000,00	R\$ 18.000.000,00
CCO	1	global	R\$ 15.000.000,00	R\$15.000.000,00
Reurbanização e Paisagismo	Qtd.	Un.	Valor Unitário	R\$ 92.803.334,56
<i>Pavimentação</i>				<i>R\$ 21.180.640,00</i>
Imprimação impermeabilizante	272.000,00	m²	R\$3,33	R\$ 905.760,00
Regularização do Leito	272.000,00	m²	R\$0,63	R\$ 171.360,00

Camada Asfáltica	272.000,00	m²	R\$73,91	R\$ 20.103.520,00
<i>Drenagem</i>				<i>R\$ 14.502.694,56</i>
Tubo de concreto para dreno	54,40	km	R\$ 171.340,00	R\$ 9.320.896,00
Guia pré-fabricada de concreto	54,40	km	R\$ 71.100,00	R\$ 3.867.840,00
Boca de lobo	544,00	un.	R\$ 1.217,25	R\$ 662.184,00
Poço de visita	136,00	un.	R\$ 4.792,46	R\$ 651.774,56
<i>Urbanismo e Obras</i>				<i>R\$ 57.120.000,00</i>
Paisagismo e Urbanização	27,20	km	R\$ 1.500.000,00	R\$ 40.800.000,00
Mobiliário Urbano	27,20	km	R\$ 600.000,00	R\$ 16.320.000,00
TOTAL DO INVESTIMENTO NA IMPLANTAÇÃO DO VLT (13,6 km) – NOV/2013				R\$ 671.534.901,66

Fonte: Adaptado de RMTC (2011).

Já os valores obtidos para o sistema Monotrilho se basearam em um estudo feito pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, em dezembro de 2010, que buscou orçar a prestação de serviços de implantação de um Sistema Monotrilho para a Linha 17 – Ouro do Metrô de São Paulo com 17,68 km de extensão. O estudo desmembrou as etapas de implantação do seguinte modo:

Tabela 32 – Custos detalhados de implantação do Monotrilho de 17,82 km.

TOTAL DO INVESTIMENTO INFRAESTRUTURA MONOTRILHO (17,82 km) – JAN/2011				R\$ 1.142.977.888,64
ATIVIDADES	Qtd.	Un.	Valor Unitário	Valor Total
Projeto executivo e Obra Civil - 17,82km				R\$ 828.905.191,36
Projeto Executivo de Obras Civis e Arquitetura	3	%	R\$ 7.541.310,61	R\$ 22.623.931,82
Canteiro de Obras	1	global	R\$52.150.198,84	R\$ 52.150.198,84
Instalação e operação do canteiro	1	global	R\$ 25.369.697,28	R\$ 25.369.697,28
Investigações geotécnicas	1	global	R\$ 4.859.345,21	R\$ 4.859.345,21
Implantação de desvio de tráfego	1	global	R\$ 2.293.795,97	R\$ 2.293.795,97
Remanejamento de interferências	1	global	R\$ 45.510.828,31	R\$ 45.510.828,31
Drenagem superficial ao longo da faixa de implantação do monotrilho	1	global	R\$ 16.117.695,62	R\$ 16.117.695,62
Pavimentação e/ou recomposição de pavimentos	1	global	R\$ 14.045.267,06	R\$ 14.045.267,06
Contenções e fundações	1	global	R\$ 210.889.635,38	R\$ 210.889.635,38
Pilares e vigas moldadas "in loco"	1	global	R\$ 61.495.538,27	R\$ 61.495.538,27
Vigas-guia pré-moldadas para monotrilho	1	global	R\$ 221.607.783,19	R\$ 221.607.783,19
Passagem de emergência	1	global	R\$ 91.371.879,70	R\$ 91.371.879,70
Estrutura de suporte para aparelho de mudança de via	1	global	R\$ 12.247.069,80	R\$ 12.247.069,80
Aparelho de mudança de via - Track Switch	1	global	R\$ 14.657.331,44	R\$ 14.657.331,44
Sobressalentes de aparelho de mudança de via e ferramentas especiais	1	global	R\$ 366.743,04	R\$ 366.743,04
Obras de Arte Especiais	1	global	R\$ 33.298.450,43	R\$ 33.298.450,43
Sistemas				R\$ 247.753.442,27

Sistema de Sinalização	1	global	R\$ 133.015.648,32	R\$ 133.015.648,32
Bandejamento e Redes de fibras ópticas para transmissão de dados	1	global	R\$ 18.179.716,41	R\$ 18.179.716,41
Sistema de Controle Centralizado	1	global	R\$ 9.595.259	R\$ 9.595.259,30
Sistema de Portas de Plataforma	1	global	R\$ 24.554.010,29	R\$ 24.554.010,29
Sistema de Captação de energia pelo trem	1	global	R\$ 46.481.912,58	R\$ 46.481.912,58
Máquina de Lavar Trens	1	global	R\$ 2.756.180,16	R\$ 2.756.180,16
Veículos de Via para manutenção e inspeção	1	global	R\$ 1.993.949,00	R\$ 1.993.949,00
Sobressalentes, Ferramentas Especiais e Vigas de Testes	1	global	R\$ 11.176.766,21	R\$ 11.176.766,21

Serviços Gerais				R\$ 36.410.270,68
Seguros Obrigatórios	1	global	R\$ 8.725.239,92	R\$ 8.725.239,92
Controle Tecnológico	1	global	R\$ 1.525.370,99	R\$ 1.525.370,99
Instrumentação Geotécnica	1	global	R\$ 5.389.045,96	R\$ 5.389.045,96
Manejo Arbóreo	1	global	R\$ 4.604.672,29	R\$ 4.604.672,29
Locação de imóvel para fábrica de pré-moldados	1	global	R\$ 9.222.014,13	R\$ 9.222.014,13
Comunicação Social e Interferência na vizinhança	1	global	R\$ 6.824.290,45	R\$ 6.824.290,45
Viagens de inspeção	1	global	R\$ 119.636,94	R\$ 119.636,94
Integração				R\$ 29.908.984,33

Fonte: Adaptado de METRÔ/SP (2012).

O levantamento dos custos de infraestrutura ferroviária do MagLev é diferenciado, pois envolve os valores da construção de uma via elevada de estrutura metálica mais os custos por quilômetro da superestrutura combinada por trilhos e ímã. Além disso, na aba de custos de terminais e estações, foram projetados os valores dos pilares necessários para manter a estrutura elevada, como previsto no início da dissertação. Tais dados estão apresentados abaixo.

Tabela 33 – Dimensionamento dos pilares para as estações e terminais do MagLev no Eixo Anhanguera.

Estações	Pilares	h	Qtd	kg / m
Terminal Padre Pelágio - 4 plataformas de 77,6m	Perfil 355,6 x 25	4,0	28	206,47
Terminal Dergo - 1 plataforma de 79,9m	Perfil 355,6 x 25	4,0	7	206,47
Terminal Praça A - 3 plataformas de 39,6m	Perfil 355,6 x 25	4,0	12	206,47
Terminal Praça da Bíblia - 3 plataformas de 77,6m	Perfil 355,6 x 25	4,0	21	206,47
Terminal Novo Mundo - 4 plataformas de 80,6m	Perfil 355,6 x 25	4,0	28	206,47
Estações de Parada – Plataformas de 68m cada	Perfil 355,6 x 25	4,0	6	206,47

Fonte: Adaptado de Brand (2013).

Tabela 34 – Custos detalhados de Implantação do MagLev de 13,6 km.

TOTAL DO INVESTIMENTO EM INFRAESTRUTURA MAGLEV (13,6 km) – NOV/2013				R\$ 575.342.688,67
Corredor				R\$ 324.217.172,43
ATIVIDADES	Quantidade	Uni	Valor Unitário	Valor Total
Via Permanente				R\$ 257.217.172,43
Projeto Básico	3	%	R\$ 2.497.254,10	R\$ 7.491.762,30
Inst. Provisórias	1	global	R\$ 15.000.000,00	R\$ 15.000.000,00
Trilhos de Ímã	13,6	Km	R\$ 12.259.221,33	R\$ 166.725.410,13
Estruturas de Aço	13,6	Km	R\$ 5.000.000,00	R\$ 68.000.000,00
Sistema de Alimentação e Proteção dos Trilhos				R\$ 20.800.000,00
Criogenia	1	global	R\$ 400.000,00	R\$ 400.000,00
Tintas Antioxidantes	13,6	Km	R\$ 1.500.000,00	R\$ 20.400.000,00
Sistema de Sinalização e Controle				R\$ 25.000.000,00
Subsistema de Rastreamento	1	Global	R\$ 12.000.000,00	R\$ 12.000.000,00
Subsistema Auxiliar	1	Global	R\$ 8.000.000,00	R\$ 8.000.000,00
Subsistema de Semáforo	1	un.	R\$ 5.000.000,00	R\$ 5.000.000,00
Sistema de Telecomunicações				R\$ 21.200.000,00
Subsistema de Dados	1	Global	R\$ 6.000.000,00	R\$ 6.000.000,00
Subsistema de Telefonia	1	Global	R\$ 1.000.000,00	R\$ 1.000.000,00
CFTV	1	Global	R\$ 6.500.000,00	R\$ 6.500.000,00
Subsistema de Sonorização	1	Global	R\$ 1.500.000,00	R\$ 1.500.000,00
Subsistema de Informação do Usuário	1	Global	R\$ 5.500.000,00	R\$ 5.500.000,00
Subsistema de Cronometria	1	Global	R\$ 700.000,00	R\$ 700.000,00
Terminais de Integração				R\$ 17.079.395,23
Terminal Padre Pelágio				R\$ 4.571.652,22
Projeto Básico	3	%	R\$ 44.384,97	R\$ 133.154,92
Obra Civil	3015,30	m²	R\$ 998,87	R\$ 3.011.892,71
Comunicação	1	global	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00
Escadas Rolantes	2	global	R\$ 200.000,00	R\$ 400.000,00
Elevador	2	global	R\$ 60.000,00	R\$ 120.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	8	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 120.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Estrutura Metálica em Aço Estrutural Perfil 355,6 x 25	23.124,64	Kg	R\$ 4,61	R\$ 106.604,59
Acionamento Eletrônico das Portas	5	un.	R\$ 100.000,00	R\$ 500.000,00
Terminal Praça da Bíblia				R\$ 3.195.345,97
Projeto Básico	3	%	R\$ 31.022,78	R\$ 93.068,33
Obra Civil	1.704,25	m²	R\$ 998,87	R\$ 1.702.324,20

Comunicação	1	global	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00
Escadas Rolantes	2	global	R\$ 200.000,00	R\$ 400.000,00
Elevador	2	global	R\$ 60.000,00	R\$ 120.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	8	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 120.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Estrutura Metálica em Aço Estrutural Perfil 355,6 x 25	17.343,48	kg	R\$ 4,61	R\$ 79.953,44
Acionamento Eletrônico das Portas	5	un.	R\$ 100.000,00	R\$ 500.000,00
Terminal Praça "A"				R\$ 2.767.463,32
Projeto Básico	3	%	R\$ 26.868,58	R\$ 80.605,73
Obra Civil	1.288,36	m²	R\$ 998,87	R\$ 1.286.904,15
Comunicação	1	global	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00
Escadas Rolantes	2	global	R\$ 200.000,00	R\$ 400.000,00
Elevador	2	global	R\$ 60.000,00	R\$ 120.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	8	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 120.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Estrutura Metálica em Aço Estrutural Perfil 355,6 x 25	17.343,48	kg	R\$ 4,61	R\$ 79.953,44
Acionamento Eletrônico das Portas	5	un.	R\$ 100.000,00	R\$ 500.000,00
Terminal Dergo				R\$ 2.786.915,94
Projeto Básico	3	%	R\$ 26.868,58	R\$ 80.605,73
Obra Civil	1.360,63	m²	R\$ 998,87	R\$ 1.286.904,15
Comunicação	1	global	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00
Escadas Rolantes	2	global	R\$ 200.000,00	R\$ 400.000,00
Elevador	2	global	R\$ 60.000,00	R\$ 120.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	8	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 120.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Estrutura Metálica em Aço Estrutural Perfil 355,6 x 25	5.781,16	kg	R\$ 4,61	R\$ 79.953,44
Acionamento Eletrônico das Portas	5	un.	R\$ 100.000,00	R\$ 500.000,00
Terminal Novo Mundo				R\$ 3.758.017,77
Projeto Básico	3	%	R\$ 36.485,61	R\$ 109.456,83
Obra Civil	2.224,47	m²	R\$ 998,87	R\$ 2.221.956,35
Comunicação	1	global	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00
Escadas Rolantes	2	global	R\$ 200.000,00	R\$ 400.000,00
Elevador	2	global	R\$ 60.000,00	R\$ 120.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	8	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 120.000,00

Equipamentos de Acessibilidade	1	global	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Estrutura Metálica em Aço Estrutural Perfil 355,6 x 25	23.124,64	Kg	R\$ 4,61	R\$ 106.604,59
Acionamento Eletrônico das Portas	5	un.	R\$ 100.000,00	R\$ 500.000,00
Estações de Parada				R\$ 43.156.987,82
18 Estações Padrão com 80 m de comprimento				R\$ 43.156.987,82
Projeto Básico	3	%	R\$ 23.277,77	R\$ 69.833,31
Obra Civil	944,00	m²	R\$ 998,87	R\$ 942.933,28
Comunicação	1	global	R\$ 12.000,00	R\$ 12.000,00
Escadas Rolantes	6	un.	R\$ 15.000,00	R\$ 90.000,00
Elevador	16	global	R\$ 15.000,00	R\$ 240.000,00
Bilhetagem e Controle de Acesso	2	global	R\$ 200.000,00	R\$ 400.000,00
Equipamentos de Acessibilidade	2	global	R\$ 60.000,00	R\$ 120.000,00
Estrutura Metálica em Aço Estrutural Perfil 355,6 x 25	4.955,28	kg	R\$ 4,61	R\$ 22.843,84
Acionamento Eletrônico das Portas	5	un.	R\$ 100.000,00	R\$ 500.000,00
Pátio Novo Mundo e CCO				R\$ 72.473.026,53
Pátio Novo Mundo e CCO				R\$ 72.473.026,53
Obra Civil (Solo e Edificações)	30.507,50	m²	R\$ 998,87	R\$ 30.473.026,53
Equipamentos de Manutenção	1	global	R\$ 27.000.000,00	R\$ 27.000.000,00
CCO	1	global	R\$ 15.000.000,00	R\$ 15.000.000,00

Fonte: Reprodução própria, baseado em RMTC (2011) e Brand (2013).

O resultado do levantamento do custo de implantação de cada sistema foi reajustado para o mês de julho de 2019 através do índice IGP-M e, em seguida, padronizado em custo por km.

Tabela 35 – Compilado dos custos de implantação dos sistemas com ajuste do IGP-M.

	VLT	MAGLEV	MONOTRILHO
CUSTO DE IMPLANTAÇÃO SEM AJUSTE DO IGP-M	R\$ 671.534.901,66	R\$ 575.342.688,67	R\$ 1.142.977.888,64
CUSTO DE IMPLANTAÇÃO AJUSTADO (JULHO/19)	R\$ 1.032.931.196,78	R\$ 775.761.218,40	R\$ 1.874.982.082,11
CUSTO DE IMPLANTAÇÃO POR km	R\$ 75.950.823,29	R\$ 57.041.266,06	R\$ 105.217.849,73

Fonte: Reprodução própria.

4.7 Custo de operação

O custo operacional de cada tecnologia foi desmembrado em cinco categorias: mão de obra operacional, mão de obra de manutenção, serviços terceirizados, custo de energia e

custos de manutenção. O levantamento dos custos, inclusive o salário bruto com encargos sociais de cada colaborador envolvido, é baseado em dados apresentados nos relatórios de projeto do VLT de Goiânia e de Cuiabá.

Na parte de custos operacionais, foram adicionados os impostos sobre a receita tarifária. São eles: a taxa de fiscalização, que corresponde a 1,0%, e a taxa de sistema de arrecadação (Sit-pass), que corresponde a 8,0% da receita tarifária. Tais impostos estão inseridos no fluxo de caixa ao final deste trabalho.

4.7.1. Custos com mão de obra operacional

A mão de obra operacional tem duas subdivisões: a parte operacional direta (condutor, bilheteiros e agentes de estação) e a parte operacional indireta (Centro de Controle Operacional e Salas Técnicas). Na pesquisa foram divididas por MOO₁ e MOO₂.

MOO₁:

- Condutor: o cálculo da quantidade necessária de condutores por dia útil é determinado em função da frota operacional no período de pico, da frota operacional no período de entre-pico, de operadores de espera nos terminais de ponta (4 por período) e da taxa de abstenção (3,3%).

Assim:

Quantidade de condutores necessários no VLT = (Frota período da manhã + Frota entre-pico + Frota período da tarde + 3 × Operadores de ponta) × (1,033)

= (34 + 20 + 33 + 3 × 4) × 1,033 = (87+12) x 1,033 = 103 condutores.

Adotando-se um salário bruto de R\$ 3.752,00, o total é de R\$ 4.604.469,41 em remunerações anuais.

Como o Monotrilho e o MagLev são tecnologias autoguiadas, não há necessidade de dispor de condutor; sendo assim, não há custo envolvido neste setor.

- Bilheteiros: seguindo a proporcionalidade do estudo de VLT de Cuiabá para a quantidade de bilheteria em função da dimensão da estação (terminal ou parada), foram calculados 3 bilheteiros para cada estação de parada e 5 para estações terminais, com salário mensal de R\$ 2219,00 para cada funcionário. No estudo desta dissertação foram projetadas 5 estações terminais e 12 estações de parada, totalizando 61 bilheteiros e um custo anual de R\$ 1.624.308,00.

- Agentes de estação: são os funcionários responsáveis por auxiliar os passageiros nas estações com dúvidas gerais. Tomando como base a mesma proporção de bilheteiros citada anteriormente e um salário de R\$ 2.550,00 por agente de estação, conclui-se que são 61 agentes de estação a um custo anual de R\$ 1.866.600,00.

MOO₂: o setor de operação requer também um corpo gerencial, técnico e de suporte, que atuará nas instalações centrais. Para o dimensionamento desse quadro, partiu-se de uma avaliação das necessidades em função do porte da operação e de uma estrutura de cargos comum a empresas operadoras ferroviárias. A tabela abaixo mostra a estrutura dimensionada, e os salários adotados baseiam-se em informações retiradas de sites de emprego sobre a remuneração média de cada setor.

Tabela 36 – Quadro de pessoal da área de operação.

ATIVIDADES	Efetivo	Custo Unitário	Custo Mensal	Custo Anual
Gerência de Operações	2		R\$ 16.256,00	R\$ 195.072,00
Chefia	1	R\$15.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 180.000,00
Recepção/Secretaria	1	R\$ 1.256,00	R\$ 1.256,00	R\$ 15.072,00
Planejamento/Engenharia Operacional	3		R\$ 96.756,00	R\$ 1.161.072,00
Engenheiro Sênior	1	R\$12.650,00	R\$ 12.650,00	R\$ 151.800,00
Analista de Sistemas	1	R\$ 8.194,00	R\$ 8.194,00	R\$ 98.328,00
Assistente Técnico	1	R\$ 2.638,00	R\$ 2.638,00	R\$ 31.656,00
Gerência Controle de Tráfego	19		R\$ 56.923,00	R\$ 683.076,00
Gerente Operação	1	R\$ 8.680,00	R\$ 8.680,00	R\$ 104.160,00
Engenheiro Sênior	1	R\$ 7.671,00	R\$ 7.671,00	R\$ 92.052,00
Supervisor de Controle de Tráfego (Assistente)	1	R\$ 3.830,00	R\$ 3.830,00	R\$ 45.960,00
Supervisor de Tração	4	R\$ 3.727,00	R\$ 14.908,00	R\$ 178.896,00
Supervisor CCO	4	R\$ 5.185,00	R\$ 20.740,00	R\$ 248.880,00
Controlador de CCO	8	R\$ 1.794,00	R\$ 14.352,00	R\$ 172.224,00
Gerência Estações	9		R\$ 1.766,00	R\$ 21.192,00
Gerente Estações	1	R\$ 5.157,00	R\$ 5.157,00	R\$ 61.884,00
Engenheiro Pleno	1	R\$ 9.689,00	R\$ 9.689,00	R\$ 116.268,00
Supervisor de Estação (Assistente)	1	R\$ 1.766,00	R\$ 1.766,00	R\$ 21.192,00
Supervisor de Linha	6	R\$ 1.250,00	R\$ 7.500,00	R\$ 90.000,00
CUSTO TOTAL				R\$2.060.412,00

Fonte: Reprodução própria, baseado nos sites Catho, Vagas.com e EducamaisBrasil.

4.7.2. Custos com mão de obra de manutenção

No cálculo de mão de obra de manutenção do MagLev, houve distinção no setor de material levitante. Por se tratar de tecnologia nova, a equipe responsável pela manutenção do veículo exige conhecimento específico. Sendo assim, foram acrescentados 50% no salário

dos técnicos deste setor e no do supervisor de manutenção. A tabela abaixo mostra a estrutura dimensionada.

Tabela 37 – Quadro de pessoal da área de manutenção.

ATIVIDADES	Efetivo	Custo Unitário	Custo Mensal	Custo Anual
Diretoria de Manutenção	2		R\$ 14.256,00	R\$ 171.072,00
Diretor	1	R\$ 13.000,00	R\$ 13.000,00	R\$ 156.000,00
Recepção/Secretaria	1	R\$ 1.256,00	R\$ 1.256,00	R\$ 15.072,00
Planejamento e Engenharia de Manutenção	9		R\$ 48.719,00	R\$ 584.628,00
Engenheiro Sênior	1	R\$ 12.650,00	R\$ 12.650,00	R\$ 151.800,00
Engenheiro Pleno	1	R\$ 9.689,00	R\$ 9.689,00	R\$ 116.268,00
Técnico Sênior	1	R\$ 6.255,00	R\$ 6.255,00	R\$ 75.060,00
Técnico Pleno	1	R\$ 3.659,00	R\$ 3.659,00	R\$ 43.908,00
Analista de Sistemas	1	R\$ 8.194,00	R\$ 8.194,00	R\$ 98.328,00
Cadista	2	R\$ 2.006,00	R\$ 4.012,00	R\$ 48.144,00
Controlador de Manutenção	2	R\$ 2.130,00	R\$ 4.260,00	R\$ 51.120,00
Sistemas Elétrico e Eletromecânico	16		R\$ 62.241,00	R\$ 746.892,00
Engenheiro Sênior	1	R\$ 12.650,00	R\$ 12.650,00	R\$ 151.800,00
Engenheiro Pleno	1	R\$ 9.689,00	R\$ 9.689,00	R\$ 116.268,00
Supervisor de Manutenção	2	R\$ 5.407,00	R\$ 10.814,00	R\$ 129.768,00
Técnico Pleno	6	R\$ 2.632,00	R\$ 15.792,00	R\$ 189.504,00
Oficial Mecânico/ Elétrico	6	R\$ 2.216,00	R\$ 13.296,00	R\$ 159.552,00
Sistemas Eletrônicos	22		R\$ 86.139,00	R\$ 1.033.668,00
Engenheiro Sênior	1	R\$ 12.650,00	R\$ 12.650,00	R\$ 151.800,00
Engenheiro Pleno	1	R\$ 9.689,00	R\$ 9.689,00	R\$ 116.268,00
Técnico Sênior	6	R\$ 4.800,00	R\$ 28.800,00	R\$ 345.600,00
Técnico Pleno	6	R\$ 2.500,00	R\$ 15.000,00	R\$ 180.000,00
Oficial Eletroeletrônico	8	R\$ 2.500,00	R\$ 20.000,00	R\$ 240.000,00
Gerência de Material Rodante e Via Permanente	2		R\$ 10.341,00	R\$ 124.092,00
Gerente de Manutenção	1	R\$ 9.085,00	R\$ 9.085,00	R\$ 109.020,00
Secretária	1	R\$ 1.256,00	R\$ 1.256,00	R\$ 15.072,00
Material Rodante	18		R\$ 71.469,00	R\$ 857.628,00
Engenheiro Sênior	1	R\$ 12.650,00	R\$ 12.650,00	R\$ 151.800,00
Engenheiro Pleno	1	R\$ 9.689,00	R\$ 9.689,00	R\$ 116.268,00
Supervisor de Manutenção	2	R\$ 5.407,00	R\$ 10.814,00	R\$ 129.768,00
Técnico Sênior	2	R\$ 3.352,00	R\$ 6.704,00	R\$ 80.448,00
Técnico Pleno	2	R\$ 2.518,00	R\$ 5.036,00	R\$ 60.432,00
Oficial Mecânico	6	R\$ 2.216,00	R\$ 13.296,00	R\$ 159.552,00
Téc. Elétrico Sênior	2	R\$ 3.800,00	R\$ 7.600,00	R\$ 91.200,00
Téc. Elétrico Pleno	2	R\$ 2.840,00	R\$ 5.680,00	R\$ 68.160,00
Via Permanente, Edificações e Obras	20		R\$ 65.153,00	R\$ 781.836,00
Engenheiro Sênior	1	R\$ 12.650,00	R\$ 12.650,00	R\$ 151.800,00
Engenheiro Pleno	1	R\$ 9.689,00	R\$ 9.689,00	R\$ 116.268,00
Supervisor de Manutenção	2	R\$ 5.407,00	R\$ 10.814,00	R\$ 129.768,00
Oficial Via Permanente	8	R\$ 2.500,00	R\$ 20.000,00	R\$ 240.000,00
Ajudante	8	R\$ 1.500,00	R\$ 12.000,00	R\$ 144.000,00
Gerência de Manutenção	1		R\$ 9.085,00	R\$ 109.020,00

Gerente de Manutenção	1	R\$ 9.085,00	R\$ 9.085,00	R\$ 109.020,00
CUSTO TOTAL				R\$ 4.299.816,00

Fonte: Reprodução própria, baseado nos sites Catho, Vagas.com e EducamaisBrasil.

4.7.3. Custos de serviços terceirizados

No cálculo de serviços terceirizados, foram considerados os serviços de segurança e de limpeza. Os serviços de segurança serão requeridos nas estações, nos terminais e nos edifícios que compõem a estrutura física a serviço dos sistemas estudados. Trata-se de serviços de segurança patrimonial, de valores e de contenção de acessos não autorizados nas estações.

Para cada estação terminal, foram estabelecidos 5 seguranças de 12h no período diurno e 5 seguranças de 12h no período noturno. Já para cada estação de parada, a proporção foi de 3 seguranças no período diurno e 1 no noturno. A conta, portanto, é a seguinte:

- Seguranças diurnos (44h): 5 funcionários trabalhando 261 dias do ano, com remuneração de R\$ 126,00 por dia, totalizando R\$ 164.430,00 anuais.
- Seguranças diurnos (12h): 61 funcionários trabalhando todos os dias em esquema de escala, com remuneração de R\$ 166,00 por dia, totalizando R\$ 3.695.990,00 anuais.
- Seguranças noturnos (44h): 37 funcionários trabalhando todos os dias em esquema de escala, com remuneração de R\$ 186,00 por dia, totalizando R\$ 2.511.930,00 anuais.

Somando essas remunerações, o custo anual de segurança ficou em R\$ 6.372.350,00.

O custo com os serviços de limpeza dos edifícios e estações foram calculados considerando uma estimativa de postos de trabalho por função (encarregados e serventes). Foram calculados 11 colaboradores para limpeza de terminais, sendo 6 responsáveis pela limpeza de estações de parada.

Custos Padrões:

- Colaboradores para limpeza de terminais: 11 por estação terminal x 5 estações = 55 funcionários por mês
- Colaboradores para limpeza de estações de parada: 6 por estação de parada x 12 estações = 72 funcionários por mês.
- Salário: R\$ 2.270,00 por funcionário.
- Custo total anual = (55+ 72) x 2.270,00 x 12 = R\$3.459.480,00

Custos Específicos:

- Colaboradores para limpeza de trens (1 por veículo) = 38 funcionários para o VLT, 16 funcionários para o MagLev e 14 para o Monotrilho.
- Salário: R\$ 2.270,00 por funcionário.
- Custo total anual: VLT = R\$1.035.120,00; MagLev = R\$435.840,00; Monotrilho = R\$381.360,00.

Além do custo com a equipe de profissionais de limpeza, considerou-se o consumo de água e insumos, calculados da seguinte forma:

- Consumo de água para limpeza das edificações: 40 m³ por estação/mês x 17 estações = 680 m³ por mês
- Consumo de água para limpeza dos trens de VLT: 8 m³ por limpeza profunda x 4 limpezas profundas/mês x 38 trens de VLT = 1.216 m³ por mês.
- Consumo de água para limpeza dos trens de MagLev: 8 m³ por limpeza profunda x 4 limpezas profundas/mês x 16 trens de MagLev = 512 m³ por mês.
- Consumo de água para limpeza dos trens de Monotrilho: 8 m³ por limpeza profunda x 4 limpezas profundas/mês x 14 trens de Monotrilho = 448 m³ por mês.
- Custo da água de R\$ 9,47 por m³;
- Insumos: R\$ 320,00 por mês e por trem
- Custo total anual VLT = (680 + 1216) x 9,47 x 12 + 38 x 320 x 12 = R\$ 361.381,44
- Custo total anual MagLev = (680 + 512) x 9,47 x 12 + 16 x 320 x 12 = R\$ 196.898,88
- Custo total anual Monotrilho = (680 + 448) x 9,47 x 12 + 14 x 320 x 12 = R\$ 181.945,92

Por fim, os custos anuais de serviços terceirizados de VLT ficaram em R\$ 11.228.331,44; os gastos para o MagLev foram de R\$ 10.464.568,88; e os para o Monotrilho foram de R\$ 10.395.135,92.

4.7.4. Custos de manutenção

A estimativa de gastos anuais devido ao consumo de materiais a serem aplicados na manutenção preventiva e corretiva foi estabelecida da seguinte maneira: segundo a proporção da produção quilométrica, no caso do material rodante; segundo a proporção por unidade de custo de implantação, no caso das instalações; e de acordo com o quilômetro construído, no caso dos itens relacionados à via. Os custos de manutenção foram segmentados em quatro setores: material rodante (ou levitante), sistemas fixos, equipamentos e edificações, e infraestrutura.

4.7.4.1 Material rodante (ou levitante)

O custeio de materiais e serviços relativos ao material rodante – ou levitante no caso do MagLev – é diretamente proporcional à quilometragem que os veículos percorrem anualmente. Adotou-se um custo médio unitário de R\$ 2,41/km considerando uma disponibilidade de frota operacional de 38 veículos tipo VLT, mesmo valor adotado nos estudos de VLT para Cuiabá/MT. Como os veículos de levitação magnética consomem menos energia, adotou-se uma redução de 20% no custo médio unitário, chegando ao valor de R\$ 1,93.

- Total de viagens: 469 viagens de VLT, 233 viagens de MagLev e 288 viagens de Monotrilho.
- Distância percorrida: 1.899.450,00 km de VLT, 950.640,00 km de MagLev e 1.175.040,00 km de Monotrilho.
- Custo total anual VLT = 1.899.450,00 km x 2,41 R\$/km = R\$ 4.577.674,50
- Custo total anual MagLev = 950.640,00 km x 1,93 R\$/km = R\$ 1.832.833,92
- Custo total anual Monotrilho = 1.175.040,00 km x 2,41 R\$/km = R\$ 2.831.846,40

4.7.4.2 Sistemas fixos de sinalização, energia e auxiliares

A estimativa de custeio de materiais de manutenção para sistemas fixos foi calculada admitindo-se uma proporção anual do valor do investimento. O valor assumido foi de 0,85% por ano. Para o investimento no VLT, consideraram-se os seguintes valores:

- Sinalização: R\$ 2,426 milhões por km
- Sistema de Energia: R\$ 8,764 milhões por km
- Sistemas de Telecomunicações e Auxiliares: R\$ 1,558 milhões por km

Assim, a estimativa de gasto anual com manutenção dos sistemas fixos para o VLT é de R\$ 1.473.900,00.

Para o investimento no MagLev, consideraram-se os seguintes valores:

- Sinalização: R\$ 1,838 milhões por km
- Sistema de Energia: R\$ 1,529 milhões por km
- Sistemas Telecomunicações e Auxiliares: R\$ 1,558 milhões por km

Assim, a estimativa de gasto anual com manutenção dos sistemas fixos para o MagLev é de R\$ 569.500,00.

Para o investimento no Monotrilho, consideraram-se os seguintes valores:

- Sinalização: R\$ 7,464 milhões por km
- Sistema de Energia: R\$ 2,608 milhões por km

- Sistemas Telecomunicações e Auxiliares: R\$ 1,020 milhões por km

Assim, a estimativa de gasto anual com manutenção dos sistemas fixos para o Monotrilho é de R\$1.282.350,91.

4.7.4.3 Equipamentos e edificações

A estimativa de equipamentos e edificações para sistemas fixos foi calculada admitindo-se uma proporção anual do valor do investimento. O valor assumido foi de 1,6% por ano para os investimentos em edificações e de 0,51% para os equipamentos.

VLT:

- Equipamentos (0,51%) = 0,51% x 18 milhões de reais = R\$ 91.800,00
- Edificações (1,60%) -
 - 1,60% x R\$ 161.446.053,05 em pátios e edificações administrativas = R\$2.582.136,85
 - 1,60% x R\$ 3.209.927,00 em edificações de grande porte (terminais) = R\$ 256.794,16
 - 1,60% x R\$ 1.485.042,17 em edificações de pequeno porte (estações de parada) = R\$ 285.128,10

MagLev:

- Equipamentos (0,51%) = 0,51% x 27 milhões de reais = R\$ 137.700,00
- Edificações (1,60%) –
 - 1,60% x R\$ 133.769.133,19 em pátios e edificações administrativas = R\$ 2.140.306,13
 - 1,60% x R\$ 3.415.879,05 em edificações de grande porte = R\$273.270,32
 - 1,60% x R\$ 2.397.610,43 em edificações de pequeno porte = R\$ 690.511,81

Monotrilho:

- Equipamentos (0,51%) = 0,51% x 18 milhões de reais = R\$ 91.800,00
- Edificações (1,60%)
 - 1,60% x R\$108.446.053,05 em pátios e edificações administrativas = R\$ 1.735.136,85
 - 1,60% x R\$ 3.195.345,97 em edificações de grande porte = R\$255.627,68
 - 1,60% x R\$ 43.156.987,82 em edificações de pequeno porte = R\$ 12.429.212,49

4.7.4.4. Infraestrutura

A estimativa de custeio de infraestrutura para sistemas fixos foi calculada admitindo-se uma proporção anual do valor do investimento. O valor assumido foi de 0,85% por ano para os investimentos via permanente e de 1,6% para investimentos em infraestrutura.

Tabela 38 – Investimento total em manutenção de via permanente e em infraestrutura

VLT	Investimento/km	Custo Material	Investimento Total
Via Permanente e Catenária (0,85%)	R\$ 18.684.200,00	R\$ 158.815,70	R\$ 2.159.893,52
Infraestrutura da Via (1,6%)	R\$ 8.600.000,00	R\$ 137.600,00	R\$ 1.871.360,00

MAGLEV			
Via Permanente (0,85%)	R\$ 18.913.027,39	R\$ 160.760,73	R\$ 2.186.345,97
Infraestrutura da Via (1,6%)	R\$ 5.615.800,00	R\$ 89.852,80	R\$ 1.221.998,08
MONOTRILHO			
Via Permanente e Catenária (0,85%)	R\$ 13.945.689,36	R\$ 118.538,36	R\$ 1.612.121,69
Infraestrutura da Via (1,6%)	R\$ 27.721.265,82	R\$ 443.540,25	R\$ 6.032.147,44

Fonte: Reprodução própria.

Somando tudo, os custos anuais de manutenção de VLT ficaram em R\$ 13.299.687,13, os gastos para o MagLev foram de R\$ 9.052.466,23 e para o Monotrilho foram de R\$ 26.270.243,46

4.7.5. Custos de energia

O consumo de energia foi pautado em algumas observações: a primeira diz respeito ao fato de que existem tarifas distintas entre o consumo no período de ponta e no período fora de ponta. No período de ponta, ou pico, a tarifa é de R\$ 0,25/kWh, enquanto no período fora de ponta é de R\$ 0,16/kWh. Tais valores foram retirados de sites da ANEEL e de estudos de VLT publicados.

Outra observação é que 15,85% do consumo das instalações e da infraestrutura é feito no período de pico e 84,15% fora do período de pico. O consumo da linha foi obtido através do cálculo de consumo energético no tópico 4.3 de aspectos ambientais.

Tabela 39 – Custos de energia calculados nos meios de transporte estudados.

VLT	Consumo (kWh/km)	km percorrida	Consumo anual	Custo anual
Linha	8,08	1.899.450,00	15.347.556,00	R\$ 3.052.843,14
Instalações e Infraestrutura	7.660.000			R\$ 1.332.180,93
TOTAL				R\$ 4.385.024,07
MAGLEV	Consumo (kWh/km)	km percorrida	Consumo anual	Custo anual
Linha	2,5	950.640	2.376.600	R\$ 472.738,92
Instalações e Infraestrutura	7.660.000			R\$ 1.332.180,93
TOTAL				R\$ 1.804.919,85
MONOTRILHO	Consumo (kWh/km)	km percorrida	Consumo anual	Custo anual
Linha	39,96	1.175.040	46.954.645	9.339.934,45
Instalações e Infraestrutura	7.660.000			1.332.180,93
TOTAL				R\$ 10.672.115,38

Fonte: Reprodução própria.

Tabela 40 – Resumo dos custos de operação anuais detalhados dos sistemas estudados.

	VLT	MAGLEV	MONOTRILHO
CUSTOS OPERACIONAIS – 2013	R\$ 43.368.648,05	R\$ 31.388.094,96	R\$ 57.188.630,76
Mão de Obra Operacional – MOO	R\$ 10.155.789,41	R\$ 5.551.320,00	R\$ 5.551.320,00
Mão de obra Manutenção – MOM	R\$ 4.299.816,00	R\$ 4.514.820,00	R\$ 4.299.816,00
Serviços terceirizados – ST	R\$ 11.228.331,44	R\$ 10.464.568,88	R\$ 10.395.135,92
Custos de Manutenção – CMT	R\$ 13.299.687,13	R\$ 9.052.466,23	R\$ 26.270.243,46
Custos de Energia – CEN	R\$ 4.385.024,07	R\$ 1.804.919,85	R\$ 10.672.115,38

Fonte: Reprodução própria, baseado em RMTC (2011) e KPMG (2016).

Além desses custos, foram calculadas as despesas administrativas, indicadas na tabela abaixo. Nesta tabela, adotou-se que os custos administrativos diversos (CAD) são iguais a 40% do custo da mão de obra administrativa (MOA). Tal proporção foi baseada nos planos de negócios estudados.

Tabela 41 – Custos detalhados de despesas administrativas dos sistemas estudados

ATIVIDADES	Efetivo	Custo Unitário	Custo Mensal	Custo Anual
Diretoria Administrativa	2		R\$ 14.256,00	R\$ 259.368,00
Diretor	1	R\$ 13.000,00	R\$ 13.000,00	R\$ 156.000,00
Secretária	1	R\$ 1.256,00	R\$ 1.256,00	R\$ 15.072,00
Gerência Financeira	2		R\$ 7.358,00	R\$ 88.296,00
Gerente Financeiro	1	R\$ 6.102,00	R\$ 6.102,00	R\$ 73.224,00
Secretária	1	R\$ 1.256,00	R\$ 1.256,00	R\$ 15.072,00
Gestão CCP	2		R\$ 11.633,00	R\$ 139.596,00
Gerente Gestão CCP	1	R\$ 9.851,00	R\$ 9.851,00	R\$ 118.212,00
Assistente Administrativo (NS)	1	R\$ 1.782,00	R\$ 1.782,00	R\$ 21.384,00
Contas a Pagar, a Receber e Tesouraria	3		R\$ 12.715,00	R\$ 152.580,00
Coordenador Contas a Pagar e a Receber	1	R\$ 8.326,00	R\$ 8.326,00	R\$ 99.912,00
Tesoureiro	1	R\$ 2.122,00	R\$ 2.122,00	R\$ 25.464,00
Auxiliar Técnico Contabilidade	1	R\$ 2.267,00	R\$ 2.267,00	R\$ 27.204,00
Contabilidade/Setor Fiscal	5		R\$ 17.620,00	R\$ 211.440,00
Contador Sênior	1	R\$ 7.817,00	R\$ 7.817,00	R\$ 93.804,00
Analista Contábil	1	R\$ 3.345,00	R\$ 3.345,00	R\$ 40.140,00
Encarregado Patrimônio (NS)	1	R\$ 1.606,00	R\$ 1.606,00	R\$ 19.272,00
Assistente Técnico	2	R\$ 2.426,00	R\$ 4.852,00	R\$ 58.224,00

Operações Financeiras - Planejamento	2		R\$ 15.364,00	R\$ 184.368,00
Coordenador Planejamento Sênior	1	R\$ 9.724,00	R\$ 9.724,00	R\$ 116.688,00
Analista Financeiro	1	R\$ 5.640,00	R\$ 5.640,00	R\$ 67.680,00
Assessoria de TI Corporativa	3		R\$ 13.046,00	R\$ 156.552,00
Analista Sistemas Sênior	1	R\$ 8.194,00	R\$ 8.194,00	R\$ 98.328,00
Assistente Técnico	2	R\$ 2.426,00	R\$ 4.852,00	R\$ 58.224,00
Gerência RH	1		R\$ 8.240,00	R\$ 98.880,00
Gerente RH	1	R\$ 8.240,00	R\$ 8.240,00	R\$ 98.880,00
Gestão Pessoal	19		R\$ 52.784,00	R\$ 633.408,00
Coordenador Pessoal	1	R\$ 5.292,00	R\$ 5.292,00	R\$ 63.504,00
Analista Pessoal	8	R\$ 3.709,00	R\$ 29.672,00	R\$ 356.064,00
Assistente Administrativo	10	R\$ 1.782,00	R\$ 17.820,00	R\$ 213.840,00
Treinamento	1		R\$ 6.002,00	R\$ 72.024,00
Coordenador T&D	1	R\$ 6.002,00	R\$ 6.002,00	R\$ 72.024,00
Segurança e Medicina do Trabalho	6		R\$ 33.413,00	R\$ 400.956,00
Médico Trabalho	1	R\$ 11.098,00	R\$ 11.098,00	R\$ 133.176,00
Enfermeiro	3	R\$ 3.856,00	R\$ 11.568,00	R\$ 138.816,00
Engenheiro Segurança	1	R\$ 7.872,00	R\$ 7.872,00	R\$ 94.464,00
Técnico Segurança	1	R\$ 2.875,00	R\$ 2.875,00	R\$ 34.500,00
Gerência de Suprimentos	1		R\$ 10.342,00	R\$ 124.104,00
Gerente de Suprimentos	1	R\$ 10.342,00	R\$ 10.342,00	R\$ 124.104,00
Gestão e Controle de Estoques	7		R\$ 14.148,00	R\$ 169.776,00
Engenheiro Pleno	1	R\$ 3.549,00	R\$ 3.549,00	R\$ 42.588,00
Assistente Técnico	1	R\$ 2.420,00	R\$ 2.420,00	R\$ 29.040,00
Chefe Almoxarifado	1	R\$ 1.791,00	R\$ 1.791,00	R\$ 21.492,00
Almoxarife	2	R\$ 1.770,00	R\$ 3.540,00	R\$ 42.480,00
Auxiliar Almoxarife	2	R\$ 1.424,00	R\$ 2.848,00	R\$ 34.176,00
Compras e Contratação	3		R\$ 13.247,00	R\$ 158.964,00
Engenheiro de Compras	1	R\$ 8.285,00	R\$ 8.285,00	R\$ 99.420,00
Comprador	1	R\$ 3.180,00	R\$ 3.180,00	R\$ 38.160,00
Assistente Administrativo	1	R\$ 1.782,00	R\$ 1.782,00	R\$ 21.384,00
Gerência de Serviços Gerais	1		R\$ 5.345,00	R\$ 64.140,00
Gerente de Serviços Gerais	1	R\$ 5.345,00	R\$ 5.345,00	R\$ 64.140,00
Serviços Gerais	3		R\$ 7.786,00	R\$ 93.432,00
Coordenador	1	R\$ 5.147,00	R\$ 5.147,00	R\$ 61.764,00
Auxiliar Administrativo/Recepcionista	1	R\$ 1.256,00	R\$ 1.256,00	R\$ 15.072,00
Copeiro	1	R\$ 1.383,00	R\$ 1.383,00	R\$ 16.596,00
Arquivo/Documentação Técnica/Biblioteca	1		R\$ 1.550,00	R\$ 18.600,00
Arquivista (NS)	1	R\$ 1.550,00	R\$ 1.550,00	R\$ 18.600,00

Fonte: Reprodução própria, baseado nos sites de emprego Vagas.com, Catho e EducamaisBrasil.

O resultado do levantamento do custo de operação de cada sistema foi reajustado para o ano de 2019 com os índices de IPCA (38,93%) e INCC (29,28%). Em seguida, foi padronizado em custo por ano.

4.8 Tópicos conclusivos

Com todas as atividades e os processos levantados, a etapa seguinte foi reajustá-los para o mês de junho de 2019. Isso porque se trata da data mais recente em que seus valores não tiveram grande influência do câmbio do dólar, seja pela desvalorização do real devido à política econômica brasileira, seja pela crise sanitária mundial que se instaurou no final do mesmo ano e abalou a economia como um todo.

O resultado desse reajuste e da categorização das atividades por setores (implantação, operação, manutenção e despesas administrativas) se encontra na tabela abaixo.

Tabela 42 – Custos anuais de operação, manutenção e despesas administrativas no ano de 2019.

	VLT	MAGLEV	MONOTRILHO
CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO	R\$ 1.032.931.196,78	R\$ 775.761.218,40	R\$ 1.874.982.082,11
CUSTOS OPERACIONAIS	R\$ 58.933.515,82	R\$ 48.274.916,05	R\$ 59.844.769,73
CUSTOS DE MANUTENÇÃO	R\$ 89.673.065,20	R\$ 73.867.776,73	R\$ 201.018.014,13
DESPESAS ADMINISTRATIVAS	R\$ 22.115.635,02	R\$ 22.115.635,02	R\$ 22.115.635,02

Fonte: Reprodução própria.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo tem como objetivo analisar os custos de aquisição de veículos, de implantação e de operação dos sistemas. Além disso, visa avaliar os indicadores de cada sistema sob a ótica ambiental.

5.1 Análise econômica

Para serem validados, todos os dados serão trazidos ao valor presente por um índice de conversão: o IGP-M (Índice Geral de Preços do Mercado) acumulado até julho de 2019 como data base.

O projeto do VLT Anhanguera foi realizado em maio de 2012 e a variação do IGP-M observada no período foi de 153,82%. O projeto da Linha 17 – Ouro do Monotrilho foi realizado em janeiro de 2011, sendo a variação do IGP-M de 164,04%. Por fim, a linha experimental do MagLev foi concluída em outubro de 2014 e a variação do índice foi de 138,2%. Tais índices foram aplicados sobre os valores da tabela 17 e atualizados para o valor presente, como descrito na tabela abaixo:

Tabela 43 – Valores de implantação, operação e aquisição dos veículos ajustados pelo IGP-M.

MODO DE TRANSPORTE	ÍNDICE IGP-M	IMPLANTAÇÃO (R\$ em milhões)	VEÍCULO (R\$ em milhões)	OPERAÇÃO (R\$ em milhões)
VLT	1,5382	1114,45	429,16	77,50
MONOTRILHO	1,6404	1874,98	945,60	71,73
MAGLEV	1,3483	616,10	208,50	67,78

Os resultados apresentados foram aplicados a três cenários distintos de fluxos de caixa com projeção de 30 anos de operação e 2 de implantação com base na tarifa vigente do VLT de Goiânia no ano de 2019, que era de R\$ 4,30.

O primeiro cenário prevê uma demanda de 12 mil *pphps* no 27º ano de operação; o segundo calcula uma demanda de 15 mil *pphps*; e o terceiro, 18 mil *pphps*. Tais cenários foram escolhidos para representar de forma mais fidedigna a necessidade do Eixo Anhanguera, o qual projeta uma demanda de 15 mil *pphps* para um intervalo de tempo de 25 anos.

Nesse fluxo de caixa, serão estudados os seguintes aspectos: o VPL para cada sistema, baseado na tarifa vigente no ano de 2019 e com taxa de 8,0% ao ano; o *break even point*, sob a forma de tarifa hipotética para que o VPL seja zerado; o aporte público necessário para que o VPL seja zero, utilizando-se a tarifa vigente de R\$ 4,30; e a taxa interna de retorno (TIR). A tabela abaixo resume os indicadores encontrados nas análises.

Tabela 44 – Resultado da análise econômica por cenários.

DEMANDA DE 12 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO				
	VPL	TARIFA	APOORTE PÚBLICO	TIR
VLT	-R\$6.132.917.914,37	R\$6,19	R\$522.016.758,85	0,70%
MAGLEV	-R\$1.231.261.396,32	R\$4,67	R\$102.377.118,23	6,09%
MONOTRILHO	-R\$27.597.523.534,56	R\$12,66	R\$2.314.141.634,59	#NÚM!

Para esse cenário, vale destacar que todos os sistemas estudados contiveram tarifas hipotéticas acima da vigente no município (R\$ 4,30), em especial o monotrilho, o qual apresentou uma tarifa quase três vezes maior. A partir desses resultados, pode-se afirmar que a demanda de 12 mil passageiros/hora/sentido é onerosa para o poder público em qualquer sistema analisado.

DEMANDA DE 15 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO				
	VPL	TARIFA	APOORTE PÚBLICO	TIR
VLT	-R\$3.086.820.913,59	R\$5,03	R\$252.055.123,91	5,12%
MAGLEV	-R\$818.683.845,32	R\$4,54	R\$69.061.198,24	6,87%
MONOTRILHO	-R\$26.562.659.828,92	R\$10,65	R\$2.198.820.901,56	-8,87%

Novamente todos os sistemas tiveram tarifas hipotéticas acima da vigente no município, porém é perceptível a redução da tarifa hipotética que proporciona um VPL igual a zero. No caso do Monotrilho, essa redução representa 15,87% de economia em comparação ao cenário anterior. Para o sistema MagLev, a redução foi de 2,78%. O que chamou atenção, entretanto, foi a proximidade com a tarifa vigente – apenas R\$0,24 acima da tarifa aplicada no município de Goiânia em 2019.

DEMANDA DE 18 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO				
	VPL	TARIFA	APOORTE PÚBLICO	TIR
VLT	R\$713.049.938,55	R\$4,16	-R\$62.356.797,00	8,54%
MAGLEV	R\$5.639.202.701,91	R\$3,16	-R\$493.152.862,23	13,99%
MONOTRILHO	-R\$16.992.132.070,32	R\$7,73	R\$1.485.975.768,01	#NÚM!

No último cenário aplicado, tanto o VLT quanto o MagLev obtiveram resultados satisfatórios na análise econômica, com VPL positivo e tarifas menores que a vigente. Consequentemente, não existe a necessidade de aporte financeiro por parte do poder público para cobrir os custos da operação do sistema. Isso significa que, no cenário de 18 mil passageiros/hora/sentido, a tarifa aplicada pelo município é suficiente para cobrir todos os gastos inerentes à operação do sistema MagLev e do VLT.

Analisando os indicadores encontrados, pode-se afirmar que o sistema MagLev é o mais vantajoso em todos os cenários, pois apresenta o Valor Presente Líquido menos oneroso, o menor aporte público e o menor *break even point*.

Todos os sistemas apontaram o cenário de 18 mil *pphps* como sendo o melhor sob o ponto de vista do empreendedor e do governo, com o VPL menos oneroso e menor aporte público necessário para cobrir a tarifa de R\$ 4,30. Vale destacar uma redução de quase R\$ 1,80 na tarifa do VLT e de R\$ 1,30 na tarifa do MagLev quando aplicada a demanda de 18 mil *pphps*.

O sistema Monotrilho foi o mais oneroso em todos os indicadores, o que corrobora as conclusões de outros autores. A redução de quase R\$ 7,00 na tarifa na comparação entre 12 e 18 mil *pphps* é um indício de que o sistema tem potencial para operar na média-alta capacidade.

5.2 Análise ambiental

A avaliação dos meios de transporte sob a ótica ambiental apresenta uma clara vantagem do sistema MAGLEV sobre os outros meios, principalmente quando comparado ao monotrilho.

Os resultados foram obtidos através de uma equação que envolvia a demanda diária da Tabela 9 (de 228.607 passageiros por dia) e a proposição de 250 dias úteis por ano, em que se resulta a demanda anual de 57.151.760 passageiros. Tal demanda é apresentada na tabela abaixo e indica um crescimento de 1,5044% a.a. durante os 10 primeiros anos de projeto e de 0,4023% nos 20 anos seguintes.

Tabela 45 – Projeção da demanda anual de projeto.

ANO	2020	2021	2022	2023	2024	2025
DEMANDA	57.151.760	58.011.537	58.884.248	59.770.089	60.669.256	61.581.949
ANO	2026	2027	2028	2029	2030	2031
DEMANDA	62.508.373	63.448.734	64.403.242	65.372.109	66.355.551	66.622.501
ANO	2032	2033	2034	2035	2036	2037
DEMANDA	66.890.525	67.159.628	67.429.813	67.701.085	67.973.448	68.246.907
ANO	2038	2039	2040	2041	2042	2043
DEMANDA	68.521.467	68.797.130	69.073.903	69.351.789	69.630.794	69.910.920
ANO	2044	2045	2046	2047	2048	2049
DEMANDA	70.192.174	70.474.559	70.758.080	71.042.742	71.328.549	71.615.505

Para cada demanda anual apresentada acima, foram calculados, por ano, o consumo energético e as emissões de poluentes por cada tecnologia, com base nos índices encontrados na Tabela 14. O resultado compilado está apresentado abaixo.

Tabela 46 – Resultado da análise ambiental por cenários em 30 anos de operação.

DEMANDA DE 12 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO				
	Emissão de CO ₂ (ton.CO ₂) em 1 ano	Emissão de CO ₂ (ton.CO ₂) em 30 anos	Consumo Energético em 1 ano (MWh)	Consumo Energético em 30 anos (MWh)
VLT	45,56	1.575,24	615,71	21.287,09
MAGLEV	4,77	164,93	64,47	2.228,82
MONOTRILHO	135,20	4.674,27	1.827,03	63.165,80

DEMANDA DE 15 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO				
	Emissão de CO ₂ (ton.CO ₂) em 1 ano	Emissão de CO ₂ (ton.CO ₂) em 30 anos	Consumo Energético em 1 ano (MWh)	Consumo Energético em 30 anos (MWh)
VLT	56,95	1.969,06	769,64	26.608,86
MAGLEV	5,96	206,17	80,58	2.786,03
MONOTRILHO	169,00	5.842,84	2.283,79	78.957,25

DEMANDA DE 18 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO				
	Emissão de CO ₂ (ton.CO ₂) em 1 ano	Emissão de CO ₂ (ton.CO ₂) em 30 anos	Consumo Energético em 1 ano (MWh)	Consumo Energético em 30 anos (MWh)
VLT	40,51	1.462,19	547,45	19.759,28
MAGLEV	4,24	153,10	57,32	2.068,86
MONOTRILHO	120,21	4.338,79	1.624,48	58.632,30

Os veículos de levitação magnética emitem 89,5% menos CO_{2eq} que o VLT na sua operação. Seu consumo energético também deve ser destacado, pois, enquanto o VLT consome 547,45 MWh na maior demanda, o MagLev gasta apenas 57,32 MWh.

Além disso, na comparação com o sistema Monotrilho, os veículos de levitação magnética também demonstram ser mais vantajosos, visto que suas taxas de emissões de poluentes e de consumo energético são 28,5 vezes menores em relação àquele sistema.

6. HIERARQUIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS

Levando em consideração os resultados das análises econômica e ambiental, foi possível concluir que, sob as condições encontradas, os veículos de levitação magnética são os que melhor se adequam à proposta de implantação no Eixo Anhanguera.

Tabela 47 - Hierarquização das Tecnologias

	ANÁLISE ECONÔMICA			ANÁLISE AMBIENTAL	
	VPL	Tarifa	Aporte Público	Emissão de CO ₂	Consumo Energético
MAGLEV	1	1	1	1	1
VLT	2	2	2	2	2
MONOTRILHO	3	3	3	2	2

Vale ressaltar que existem algumas dúvidas e imprecisões nos levantamentos feitos na análise econômica que podem alterar a hierarquização dos sistemas, principalmente por se tratar de tecnologia nova sem qualquer outra semelhante em operação, o que permitiria a busca de dados mais precisos. Em contrapartida, era de se esperar que o MagLev e o VLT apresentassem resultados parecidos e que o Monotrilho necessitasse de investimentos mais expressivos.

As dúvidas se referem predominantemente aos custos de operação e de manutenção, tais como: a questão da mão de obra, o investimento de manutenção do material levitante e os custos de natureza administrativa. Todos esses dados foram comparados neste trabalho com os resultados obtidos em um sistema VLT.

Quanto às imprecisões, estas dizem respeito ao item de custos de implantação, em especial o subitem de obras civis, que neste trabalho foi tratado como custo de construção das estações elevadas, seja a estação de parada, seja a estação terminal. Novamente, tal dado foi levantado em comparação aos encontrados nas referências do VLT, acrescentando-se os cálculos dos custos de implantação de pilares metálicos que suportem os esforços provenientes de uma estação elevada.

Na análise ambiental, certamente existem imprecisões que podem ter escapado na projeção do resultado. Isso, contudo, não é suficiente para alterar a ordem de grandeza dos dados ou a hierarquização das tecnologias, já que os veículos de levitação magnética se destacam justamente no quesito ambiental.

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

A dissertação se propôs a analisar as características dos veículos de levitação magnética e responder quais aspectos da análise técnica, econômica e ambiental são predominantes na escolha do meio de transporte urbano para um sistema de média capacidade, delimitando o estudo em tecnologias de transporte urbano elétrico. O aspecto técnico é voltado para dois pontos principais: saber a capacidade de cada sistema e identificar qual tipo de tecnologia é mais eficiente.

Quanto a esta questão é importante ressaltar que cada sistema analisado possui um nicho de melhor atuação, com qualidades e dificuldades provenientes da adaptação do sistema ao ambiente a ser aplicado. Isso significa que a avaliação técnica por si, não é suficiente para a escolha de uma tecnologia, sendo necessário um estudo detalhado do local de estudo como topografia, densidade populacional, entre outros; características operacionais, como se será usado para transporte urbano ou interurbano, a possibilidade de construir vias exclusivas para as tecnologias envolvidas e se tais vias serão por estruturas elevadas ou não.

Os aspectos econômicos exercem grande influência na escolha do modo e, neste caso, os veículos de levitação magnética por supercondutores ganham destaque pela aparente economia – haja vista os esforços atuantes na infraestrutura serem reduzidos pela ausência de contato roda-trilho. O presente trabalho mostrou que é possível implementar o sistema de veículos de levitação magnética em locais com a demanda entre 12 e 18 mil *pphps*.

A fim de que se obtenha uma análise mais detalhada sobre o desempenho do veículo, é de extrema importância sua aplicação em forma de projeto-piloto contando com linha experimental maior. Assim, podem ser estudados os problemas relativos à sua operação durante longos períodos, como o desgaste provocado tanto nos veículos quanto nos trilhos de ímã em razão da exposição.

A análise ambiental se limitou a estudar os efeitos dos sistemas na fase de operação quanto às suas emissões e consumo energético. A dissertação evitou adentrar no conceito de Análise de Ciclo de Vida pois a tecnologia de levitação magnética supercondutora não possui uma operação real aplicada para que se extraia resultados factíveis da fase de descarte dos materiais, tornando a ACV incompleta e suscetível a falhas. Na delimitação da análise que a dissertação se propôs a realizar, o maglev confirmou as hipóteses que é o sistema com melhor desempenho ambiental. O baixo consumo energético e as emissões de poluentes podem ser explicadas pela configuração do veículo, bem mais leve que seus

concorrentes e sendo assim, demanda menos energia para trafegar pelo trilho de ímãs. A levitação do veículo por criostatos é outro ponto positivo pois demanda baixo consumo de energia elétrica neste processo.

Como recomendações para trabalhos futuros, citam-se as seguintes possibilidades de estudos: análise do ciclo de vida dos componentes do veículo, desde sua produção até seu descarte – considerando-se que o conceito de sustentabilidade é cada vez mais pesquisado pela ciência; e estudo de políticas para manutenção da via permanente – especialmente por ser diferenciada, pois é uma configuração de trilhos de ímã e estruturas metálicas elevadas.

Outro tema que pode ser abordado é a análise da segurança dos veículos de levitação magnética por supercondutores em tráfego urbano, determinando o raio mínimo das curvas e a estabilidade lateral do veículo.

A análise econômica realizada nesta dissertação foi pautada em comparações e equivalências com outros sistemas de transportes já estabelecidos no mercado. Para outros trabalhos, recomenda uma avaliação mais independente e refinamento dos dados dos veículos de levitação magnética sem a necessidade de comparações, o que aproximaria a análise à realidade de uma operação de sistemas de transportes.

Por fim, além de demais estudos, também podem ser pensados projetos de fabricação dos trilhos de ímã no Brasil, para acelerar o tempo de conclusão dos sistemas e reduzir seu custo de implantação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, R., JUN, Y. L., AZHAR, M. F., & JUNEJO, N. U. R. (2014). Comprehensive Study and Review on MagLev Train System. *Applied Mechanics and Materials*, 615, 347-351. doi:10.4028
- ALBALATE, D., BEL., G. (2010) IWhat shapes local public transportation in Europe? Economics, mobility, institutions and geography. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 46, (5), pp. 775-790.
- ALBALATE, D., BEL, G. (2012) High-speed rail: lessons for policy makers from experiences abroad. *Public Administration Review* 72, p. 336-349, 2012. doi.org/10.1111/j.1540-6210.2011.02492.x
- ALONZO, C.M.; Aletà, N.B.; Ruiz, R.M.A. Smart Mobility in Smart Cities. In XII Congreso de Ingeniería del Transporte; Springer: Valencia, Spain, 2016; pp. 1209-1219.
- ALOUICHE, P.L. (2008). VLT: um transporte moderno, sustentável e urbanisticamente correto para as cidades brasileiras. *Anais da 14a Semana de Tecnologia Metroferroviária*. 2008.
- ALSTOM. *Alstoms Citadis trams arrive in Dublin from La Rochelle*: Virtual Book, 2017. Disponível em: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2017/11/alstoms-citadis-trams-arrive-in-dublin-from-la-rochelle>. Acesso em 27 jan. 2021.
- AMARAL ET AL. (2018) MagLev Technology Review for Improving Urban Mobility. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019: AHFE 2018, AISC 777, pp. 268–275, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94706-8_30
- AMARAL et al (2019) MagLev Technology Review for Improving Urban Mobility AHFE 2018, AISC 777, pp. 268–275, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94706-8_30, 2019.
- ANDRADE, C. E. S. (2016). Avaliação da emissão de dióxido de carbono e do uso de energia no ciclo de vida de sistemas metroferroviários de passageiros: Aplicação na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2016.
- ATKINS (2015). Monorail Assessment Report For The I-24 Southeast Corridor - Final Report. Tennessee Department of Transportation, 2015.
- BEIJING INTERNATIONAL (ORG.). S1 line of Beijing subway to use maglev trains. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20130920053027/http://www.ebeijing.gov.cn/BeijingInfo/NewsUpdate/OlympicNews/t1074179.htm>>. Acesso em: 16 jan. 2020.
- BERNARDES, F. F.; FERREIRA, W. R. (2015). Veículo leve sobre trilhos (VLT) – proposta de implantação para o transporte público em Uberlândia/MG. *Revista Caminhos de Geografia Uberlândia* v. 17, n. 58 junho/2016 p. 189–204.
- BOQUET, Yves (2017) The renaissance of tramways and urban redevelopment in France. *Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development*. doi:10.1515/mgrsd-2017-0005. Acessado em: 02 de março de 2020.
- BRAND, Rafael R. (2013) Projeto de Passarela Composta de Perfis Tubulares em Aço – Escola Politécnica (UFRJ), Rio de Janeiro, 2013.
- CABRAL, T. (2015). Dinâmica e controle de um sistema MagLev simplificado. Dissertação (mestrado) - UNESP, São Paulo, 2015.
- CARRASCO et al. (2013). Mode choice of university students commuting to school and the role of active travel. *Journal of Transport Geography*, 2013.
- CHEN, D., YIN, J., CHEN, L., & XU, H. (2017). Parallel Control and Management for High-Speed MagLev Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(2), 431–440. doi:10.1109/tits.2016.2577037

- CHESTER, M.; HORVATH, A. (2009a) Life-cycle Energy and Emissions Inventories for Motorcycles, Diesel Automobiles, School Buses, Electric Buses, Chicago Rail, and New York City Rail Disponível em <<http://escholarship.org/uc/item/6z37f2jr.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2020.
- CHESTER, M.; HORVATH, A. (2009b) Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, v. 4 no. 2. DOI: 10.1088/1748-9.
- CHESTER, M.; EISENSTEIN, W.; PINCETL, S.; ELIZABETH, Z.; MATUTE, J.; BUNGE, P. (2012) Environmental Life-cycle Assessment of Los Angeles Metro's Orange Bus Rapid Transit and Gold Light Rail Transit Lines. CESEM – Center for Earth Systems Engineering and Management, 2012. Disponível em <<http://repository.asu.edu/attachments/94226/content/chester-ASU-SSEBE-CESEM-2012-WPS-003.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2020.
- CMSP (2011). Contrato de Prestação de Serviços de Implantação de um Sistema Monotrilho, incluindo o projeto, as obras civis, a fabricação, o fornecimento de sistemas e material rodante para a linha 17-Ouro do metrô de SP. Contrato N° 4220921301, São Paulo, 2011.
- CNT (2016). Transporte metroferroviário de passageiros. Confederação Nacional de Transporte, Brasília, 2016.
- CoMET (2008). Energy Costs, Renewables and CO2 Emissions Nova Phase 10 Case Study. Community of Metros.
- CONEXÃO AEROPORTO (2019). TRENSURB, Porto Alegre/RS. Disponível em: <http://www.trensurb.gov.br/paginas/galeria_projetos_detalhes.php?codigo_sitemap=87>. Acessado em 05 jun. 2019.
- COTSALAS, V. (2000). "It Floats! It Speeds! It's a Train!". *The New York Times*.
- DELL'OLIO, L. et al. (2014) A methodology to promote sustainable mobility in college campuses. *Transportation Research Procedia*, v. 3, p. 838-847, 2014.
- DENG, Z., LI, J., ZHANG, W., GOU, Y., REN, Y., & ZHENG, J. (2017). High-temperature superconducting magnetic levitation vehicles: Dynamic characteristics while running on a ring test line. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(3), 95-102.
- D'OVIDIO, G et al. (2003) Light Rail MagLev with Superconductor Materials System Design. *Transactions on the Built Environment* vol 64, p. 657-665, 2003.
- EPE (2014). Balanço energético nacional de 2014 – Ano base 2013: Relatório Síntese. Rio de Janeiro.
- FERRAZ, A. C. C. P.; TORRES, I. G. E. (2004) Transporte Público Urbano. 2ª. ed. São Carlos, SP: RiMa Editora, 2004.
- FISTOLA, R. (2010): The joint city. *TeMaLab J. Mobil., L. Use Environ.* 3, 15–20
- FUNDO VERDE (2014) Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) - Linha circular de veículo leve sobre trilho (VLT) na Ilha do Fundão com conexão com a região do Porto Maravilha e da Ligação Aquaviária entre a Ilha do Fundão, Praça XV e Praia Vermelha. Relatório de atividades, COPPE/UFRJ, 2014.
- GHAFOORIPOUR et al. (2012) An efficient cost analysis of monorail in the Middle East using statistics of existing monorail and metro models. *Urban Transport*, 128 (18): 241-252. doi:10.2495/UT120221
- GOLDNER et al. (2014). Diagnóstico da Mobilidade em um Campus Universitário: o Caso da UFSC-Trindade. In: XVIII Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito Transporte e Logística. 2014.
- GOODALL, R. (1985). "The theory of electromagnetic levitation". *Physics in Technology*. 16 (5): 207–213. doi:10.1088/0305-4624/16/5/I02.

- GOU, J. (2018) Development Status and Global Competition Trends Analysis of MagLev Transportation Technology Based on Patent Data. *Urban Rail Transit* (2018) 4(3):117–129.
- GRAZ (2012) Supplier for Generations - Business Report of Holding Graz 2012. Disponível em: <<http://www.holding-graz.at/holding-graz/unternehmen/geschaeftsbericht.html>>. Acesso em 02 mar. 2020.
- GROSSRIEDER, C. (2011) Life-Cycle assessment of future High speed Rail in Norway. Disponível em <<http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:441342/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2020.
- HELLINGER R, MNICH P (2009) Linear motor-powered transportation: history, present status, and future outlook. *Proc IEEE* 97:1892–1900
- HODGES, T. (2010) Public Transportation's Role in Responding to Climate Change. Office of Budget and Policy. January, p. 20, 2010.
- HOLMER, P. (2003) Faster than a speeding bullet train., *IEEE Spectrum*, vol. 40, no. 8, pp. 30–34, Aug. 2003.
- IBGE (2020). Estimativas da População. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais.html>>. Acesso em 17 mar. 2020.
- IPCC (2014). IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014 – Synthesis Report. Intergovernmental panel on climate change, 2014.
- IPEA (2011). Infraestrutura Social e Urbana no Brasil subsídios para uma agenda de pesquisa e formulação de políticas públicas – A mobilidade urbana no Brasil. Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro, nº 94. Brasília, 2011.
- ISO (2013). Space systems – definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment. Gênova 2013.
- ISODA, M. K. D. T, 2013, Transporte sobre Trilhos na Região Metropolitana de São Paulo: estudo sobre a concepção e inserção das redes de transporte de alta capacidade. Dissertação de Mestrado – FAUUSP, São Paulo.
- IRESON, N. (2008). "Dutch university working on affordable electromagnetic suspension". *MotorAuthority.com*.
- JANIĆ, M. (2020). Estimation of direct energy consumption and CO2 emission by high speed rail, transrapid maglev and hyperloop passenger transport systems. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1-22.
- JAPAN TRAVEL (2019) Chiba Urban Monorail. Disponível em <<https://www.japan.travel/en/ph/spot-activity/chiba-urban-monorail>> Acesso em 02 mar. 2020.
- JIANG, J., BAI, X., WU, L., & ZHANG, Y. (2012). Design consideration of a super-high speed high temperature superconductor maglev evacuated tube transport (I). *Journal of Modern Transportation*, 20(2), 108-114.
- JIAO Y., WEN Y., LIU S. (2016) Uphill traction strategy optimization of middle/low-speed maglev train, *Electric Drive for Locomotives*, 2016(02): 37–39, 2016.
- JICA (2010) The Preparatory Survey for Urban Transport Development Project in Sao Paulo. São Paulo, 2010.
- JOHANNES, K. (2018). MagLev trends in public transport: The perspectives of MagLev transportation systems. *Транспортные системы и технологии*, 4(3 S1).

- KATO, H.; OSADA, M.; SHIBAHARA, N.; HAYASHI, Y. (2005) A Life Cycle Assessment for evaluating environmental impacts of inter-regional high-speed mass transit projects. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v.6, pp. 3211 - 3224.
- KPMG (2016) Produto 3 – Plano de Negócios e Estudo de Viabilidade Econômico - Financeira do VLT. São Paulo, 2016.
- LEE, C.-Y. et al. (2013) Development of superconducting-hybrid magnetic levitation system for high-speed EMS maglev. *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems*, p.1922–1927, October 2013.
- LEE, H.W. et al. (2006) Review of MagLev train technologies. *IEEE Trans.Magn.* 42,1917–1925, 2006.
- LI, M., LUO, S., MA, W., LEI, C., LI, T., HU, Q., ... & HAN, Y. (2020). Experimental study on dynamic performance of medium and low speed maglev train-track-bridge system. *International Journal of Rail Transportation*, 1-24.
- LIU, J. ET AL (2011). Integrity assurance of GNSS-based train integrated positioning system. *Sci. China Technol. Sci.* 2011, 54, 1779–1792.
- LIU, J., XIE, M., GUO, F., CAI, J., & LI, Y. (2020). Adaptability Study of MagLev Vehicle Bogie Frame at 600 km/h. In *Resilience and Sustainable Transportation Systems* (pp. 617-626). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- LIU P. ET AL. (2019). Optimization operation of electric locomotive based on two-stage adaptive Gauss relocation pseudospectral approach, *Acta Automatica Sinica*, doi: 10.16383/j.aas.c190211, 2019.
- LIU, R. & DENG, Y. (2004) Comparing Operations Characteristics of HSR and MagLev Systems_Case Shanghai Corridor. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1863, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2004, pp. 19–27.
- LIU, Y., SUN, G., WEI, R. (2006): The developmental status and future prospects of MagLev technology. In: *MagLev2006, Proceeding*, vol. 1, pp. 59–64, 2006.
- LONG, Z. Q., CHEN, X. Y., & FAN, C. X. (2017). Middle—Low speed maglev train suspension control system common cause failure risk analysis. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 7218-7224). IEEE.
- LUO J., HU W., LIU Y. (2010) Traction characteristic analysis and calculation of mid-low speed maglev trains, *Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles*, 33(6):21–23, 2010.
- LUTZEMBERGER, G., MUSOLINO, A., & RIZZO, R. (2017). Automated people mover: a comparison between conventional and permanent magnets MAGLEV systems. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(4), 295-302.
- MAGLEV, SHANGHAI. Chronicle of Events. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20120809150428/http://www.smtdc.com/en/gycf2.asp>>. Acesso em: 16 jan. 2020.
- MATTOS, L.S et al. (2016) MagLev-Cobra Operational Tests *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, n. 3, Abril 2016
- METRÔ (2010) EIA-RIMA – Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental da linha 17 – OURO – Ligação do Aeroporto de Congonhas à Rede Metroferroviária. São Paulo, 2010.
- METRÔ/SP (2012) Contrato N° 4220921301 – Prestação de Serviços de Implantação de um Sistema Monotrilho São Paulo, 2012.
- MIN D.J., JUNG M.R. & KIM M.Y. (2017) Dynamic interaction analysis of maglev-guideway system based on a 3D full vehicle mode. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 17(1): 1750006.

- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (2017): Anuário Estatístico de Transportes 2010–2016 (2017)
- MIRAGAY, Júlio (2001). A região de Brasília-Goiânia: Formação, problemas e potencialidades. *Revista Conjuntura* (5): 10-26
- MIRALLES-GUASCH, C.; DOMENE, E. (2010) Sustainable transport challenges in a suburban university: The case of the Autonomous University of Barcelona. *Transport policy*, v. 17, n. 6, p. 454-463, 2010.
- MOSKOWITZ, J.P., COHUAU, J.L (2009), “STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation”, França, 2009.
- MOTTA, E. S. (2011) Otimização de Trilho Magnético de um Sistema de Levitação Supercondutora para Veículo MagLev. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.
- MOURA, V.R. (2016) Análise Energética do Módulo de Transporte do MagLev-Cobra. Rio de Janeiro, UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.
- MCTIC. (2018) A Planilha de Inventários Corporativos da MCTIC, 2019. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em 30 mai. 2019.
- NAKAMURA, S. (1979). Development of high speed surface transport system (HSST). *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-15, no. 6, pp. 1428–1433, Nov. 1979.
- NETO, J. B. P. et al (2020). An Accurate GNSS-Based Redundant Safe Braking System for Urban Elevated Rail MagLev Trains. *Information*, 11(11), 531.
- NEXO (2018) Hidrelétricas, carvão, petróleo: como cada país gera sua energia. Disponível em: <<https://www.nexojournal.com.br/grafico/2018/03/27/Hidrelétricas-carvão-petróleo-como-cada-país-gera-sua-energia>>. Acesso em 02 mar. 2020.
- OECD (2010) Reducing Transport Greenhouse Gas Emissions Trends & Data 2010. Leipzig, Alemanha 2010.
- OGAWA, K. (2006). "Hitachi Exhibits Electromagnetic Suspension System". techon.nikkeibp.co.jp.
- OTSUKA, A. (2020). A new approach to inter-regional network externalities in Japan. *Regional Science Policy & Practice*.
- PARK, D. Y.; SHIN, B. C.; HAN, H. (2009). "Korea's Urban MagLev Program". *Proceedings of the IEEE*. 97 (11): 1886–1891.
- PEDROSO, G. (2017) Avaliação energética, econômica e socioambiental de alternativas para sistemas de transportes urbanos coletivos a partir do modelo de apoio multicritério à decisão. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- POST, R. F.; RYUTOV, D. D (2000) The inductrack: a simpler approach to magnetic levitation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 10, p. 901–904, Mar. 2000.
- POWELL J. et al (2003) MAGLEV 2000 Urban Transit System. *Transportation Research Record* 1838 Paper No. 03-3083
- QIAN, Zhou (Ed.). Changsha MagLev Line Completes Investment over 490 Million Yuan. Disponível em: <<https://english.rednet.cn/c/2014/11/21/3528574.htm>>. Acesso em 16 jan. 2020.
- RAILWAY TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE (Org.). Principle of MagLev. Disponível em: <<https://www.rtri.or.jp/rd/maglev/>>. Acesso em 16 jan. 2020.
- RAILWAY TECHNOLOGY (Org.) Chongqing Metro, CHINA. Disponível em: <<https://www.railway-technology.com/projects/chongqing-metro>>. Acesso em 02 mar. 2020.
- RAN, S. (2002) Research of Operation Plan in Beijing–Shanghai Corridor. *Railway Transport and Economy*, Vol. 24, No. 5, May 2002, pp. 32–34.

- RAO P., LIU S. (2012). Traction calculation algorithm research for low speed maglev train, *Electric Drive for Locomotives*, 2012(05):66–69, 2012.
- RATP (2014) RATP's tram network in Île-de-France. Disponível em <https://web.archive.org/web/20140426233553/http://www.ratp.fr/en/ratp/r_108570/le-reseau-tramway-ratp-en-ile-de-france/>. Acesso em 02 mar. 2020.
- REZA H.M., HASSAN Z. & REZA S. (2012) An adaptive robust controller for time delay maglev transportation systems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 17(12): 4792–4801.
- RICCARDI, P. E. R., 2011, Integração entre Modalidades de Transporte no Meio Urbano: Situação de Porto Alegre. Departamento de Engenharia Civil - UFRGS, Porto Alegre.
- RICHES E. (1988) “Will MagLev lift off?,” *IEE Review*, pp. 427–430, Dec.1988.
- RMTC (2011). Projeto de Implantação de VLT no Eixo Anhanguera/GO, Goiânia, 2011.
- ROTH, J.; SCHAICH, T.; TROMMER, G.F (2012). Cooperative GNSS-based method for vehicle positioning. *Gyroscopy Navig.*2012, 3, 245–254.
- RTE. *Despite higher passenger numbers, Luas losses mount up*: Virtual Book, 2019. Disponível em: <https://www.rte.ie/news/business/2019/1127/1095433-luas-losses/>. Acesso em 25 jan. 2021.
- SANTOS, A. M. M (2011). Controlo por computador de um sistema de levitação magnética. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto - ISEP, 2011.
- SEEG (2017) Emissões de GEE do Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris. Documento-síntese Período 1970-2015. Observatório do Clima, 2017.
- SEO, Y.J. et al. (2008) Service Availability of the Urban MagLev System in Korea. 2008
- SCHOLLE E.A. E SCHWARTZ J. (1994) “Power dissipation due to vibration-induced disturbances in maglev superconducting magnets,” *IEEE Trans.Appl. Supercond.*, vol. 4, no. 4, pp. 205–210, Dec. 1994
- SHAWKI, N., ALAM, S., & GUPTA, A. K. S. (2014). Design and implementation of a magnetic levitation system using phase lead compensation technique. In 2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST) (pp. 294-299). IEEE.
- SOTELO, G. et al. (2013) Tests with one module of the Brazilian maglev-cobra vehicle. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, June 2013.
- SOUSA, W. T., STEPHAN, R. M., COSTA, F. S., RODRIGUEZ, E. F., MARTINS, F. G., DE OLIVEIRA, R. A., & ANDRADE JR, R. D. (2016). Projeto MagLev Cobra-Levitação Supercondutora para Transporte Urbano. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(4).
- STEIN, P. P. (2013) Barreiras, motivações e estratégias para mobilidade sustentável no campus São Carlos da USP. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- STEPHAN, R. M., DE ANDRADE, R., & FERREIRA, A. C. (2012). Superconducting light rail vehicle: A transportation solution for highly populated cities. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 7(4), 122-127.
- STEPHAN, R.M (2015) MagLev-Cobra: Tecnologia de levitação magnética no Brasil. *Ciência Hoje*, v.55, p.20 - 25, 2015.
- STEPHAN R.M et al. (2017) Superconducting Levitation Applied to Urban Transportation. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 2017.

- STEPHAN R.M et al. (2018) Retrospective and Perspectives of the Superconducting Magnetic Levitation (SML) Technology Applied to Urban Transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2018.
- STEPHAN, R. M., LEVI, C., & BENETTI, P. (2018). UFRJ Campus: A City of Innovative Mobility. In *Towards Green Campus Operations* (pp. 371-384). Springer, Cham.
- STEPHAN, R.M. (2020) The Vital Contribution of MagLev Vehicles for the Mobility in Smart Cities. *Electronics* 2020, 9, 978; doi:10.3390/electronics9060978
- STRIPPLE, H.; UPPENBERG, S. (2010) Life cycle assessment of railways and rail transports. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm. Disponível em <<http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b75d4/1445517456715/B1943.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2020.
- SU S. ET AL. (2013) A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2): 883–893, 2013.
- SUCENA, M. P. e STEPHAN, R. M. (2012) Modelo para gestão ambiental de sistemas de transporte urbano por levitação magnética com aplicação da teoria fuzzy. *Journal of Transport Literature*, vol. 6, n. 3, pp. 152-179.
- TERI (2012) Life cycle analysis of transport modes New Delhi. The Energy and Resources Institute. New Delhi, 2012.
- TFL - TRANSPORT FOR LONDON (2008). London Underground Carbon Footprint Report 2008. p. 1–33, 2008.
- THE INTERNATIONAL MAGLEV BOARD: “Facts”. Disponível em: <http://www.maglevboard.net/en/facts>; Acesso em 1 jul. 2017.
- THOMPSON, M; THORNTON, R. (1999). "Flux-Canceling Electrodynamic MagLev Suspension: Part II Test Results and Scaling Laws". *IEEE Transactions on Magnetics*. 35 (3). doi:10.1109/20.764894.
- TRAINWEB. TGV SIGNAL SYSTEMS, 2002. Disponível em: <http://mercurio.iet.unipi.it/tgv/signals.html>. Acesso em 20 jun. 2021.
- TRANSRAPID INTERNATIONAL INC., 2002. Comparison of System Characteristics, February 2001.
- TSUCHISHIMA H. E HERAI T. (1991) “Superconducting magnet and on-board refrigeration system on Japanese MAGLEV vehicle,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 2, pp. 2272–2275, Mar. 1991.
- TSUCHIYA, M. OHSAKI, H. (2000). "Characteristics of electromagnetic force of EMS-type maglev vehicle using bulk superconductors". *IEEE Transactions on Magnetics*. 36(5): 3683–3685. doi:10.1109/20.908940.
- UIC - INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS: “High-Speeds Databases and Atlas”. Disponível em: [http:// https://uic.org/IMG/pdf/20210601_high_speed_lines_in_the_world.pdf](http://https://uic.org/IMG/pdf/20210601_high_speed_lines_in_the_world.pdf); Acesso em 30 nov. 2021.
- UNITED NATIONS: World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. <https://esa.un.org/unpd/wup/DataQuery/>
- VERMILYEA, M.E. E MINAS C. (1993) “A cryogen-free superconducting magnet design for MagLev vehicle applications,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 3, no. 1, pp. 444–447, Mar. 1993.
- VLT-RIO (2019). Demonstrativos Financeiros Anuais. Disponível em: <<https://www.vltrio.com.br>>. Acessado em: 24 de maio de 2019.
- VUCHIC, V. R. (2005) Urban Public Transportation Systems. *Transportation Engineering and Planning – Vol. I - Urban Public Transportation Systems – Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Department of Systems Engineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, USA.

- VUCHIC, V. R. (2007) *Urban transit systems and technology*. John Wiley & Sons, 2007.
- VUCHIC, V.R., e CASELLO, J. (2002). An Evaluation of MagLev Technology and Its Comparison with High-Speed Rail. *Transportation Quarterly*, Vol. 56, No. 2, Spring 2002, pp. 33–49.
- WANG H.P., LI J AND ZHANG K (2007) Vibration analysis of the maglev guideway with the moving load. *Journal of Sound and Vibration* 305(4–5): 621–640.
- WANG, D., LI, X., LIANG, L., & QIU, X. (2019). Influence of the track structure on the vertical dynamic interaction analysis of the low-to-medium-speed maglev train-bridge system. *Advances in Structural Engineering*, 22(14), 2937-2950.
- WANG, Q., MENG, L., LAI, Q., LIU, J., & XU, Y. (2018). A Method for Calculating Capacity of A Medium-Speed MagLev Line. In *2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)* (pp. 1-5). IEEE.
- WU, Y. K., LIU, F., ZHANG, B., YANG, X.P. AND WU C. L. (2016). “Fatigue life analysis of levitation chassis of long stator maglev vehicle.” [In Chinese] *Modern Manufacturing Engineering*.
- YAGHOUBI, H., et al. (2012): *MagLev*. In: Perpinya, D.X. (eds.) *MagLev, Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*, p. 522. InTech, 2012.
- YAN, L. (2004). Suggestion for selection of MagLev option for Beijing- Shanghai high-speed line. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, no. 2, pp. 936–939, Jun. 2004.
- YANG, L., ZHAO, Z. S. (2004). “The finite element analysis on structure strength of the maglev bogie.” [In Chinese] *Machinery*, 31(2).
- YASUDA, Y. et al. (2004). "The first HSST maglev commercial train in Japan". *Proceedings of the 18th international conference on magnetically levitated systems and linear drives (MAGLEV 2004)*. Acesso em 12 dez. 2019.
- YAU J.D. (2009) Response of a maglev vehicle moving on a series of guideways with differential settlement. *Journal of Sound and Vibration* 324(3–5): 816–831.
- ZARY, B. (2015). *Procedimento de auxílio ao estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental de projetos de transporte urbano coletivo*. Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.
- ZENG X. (2017). Research on maximum traction control of low and medium speed maglev train of Line S1, *Journal of the China Railway Society*, 39(06): 55–58, 2017.
- ZHONG, W., XU, H., ZHANG, W., LOXTON, R., & ZHANG, Y. (2020). Optimal Operation for Medium-speed MagLev Trains. In *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 5499-5504). IEEE.

ANEXOS

I – Fluxo de Caixa do VLT, Monotrilho e MAGLEV para os cenários aplicados (valores em milhões de reais)

VLT - DEMANDA DE 12 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO												
ANO	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA TOTAL	0,00	0,00	232,52	236,01	239,56	243,17	246,83	250,54	254,31	258,13	262,02	265,96
Receita Tarifária	0,00	0,00	232,52	236,01	239,56	243,17	246,83	250,54	254,31	258,13	262,02	265,96
(-) Deduções	0,00	0,00	-20,11	-20,42	-20,72	-21,03	-21,35	-21,67	-22,00	-22,33	-22,66	-23,01
RECEITA LÍQUIDA	0,00	0,00	212,40	215,60	218,84	222,13	225,48	228,87	232,31	235,81	239,35	242,95
(-) Custos e Despesas	-75,65	-75,65	-164,25	-164,57	-164,89	-165,21	-165,54	-165,88	-166,22	-166,56	-166,91	-167,26
(-) Custos Administrativos Variáveis	0,00	0,00	-2,56	-2,60	-2,64	-2,67	-2,72	-2,76	-2,80	-2,84	-2,88	-2,93
LAJIDA	-75,65	-75,65	45,59	48,43	51,32	54,25	57,22	60,24	63,30	66,41	69,56	72,76
(-) Depreciação	0,00	0,00	50,41	50,41	50,41	50,41	50,41	48,93	48,93	48,93	48,93	48,93
LAJIR	-75,65	-75,65	96,00	98,85	101,73	104,66	107,63	109,17	112,23	115,34	118,49	121,70
(-) IR e CSLL	0,00	0,00	-32,64	-33,61	-34,59	-35,58	-36,59	-37,12	-38,16	-39,22	-40,29	-41,38
LUCRO LÍQUIDO	-75,65	-75,65	63,36	65,24	67,14	69,07	71,04	72,05	74,07	76,12	78,21	80,32
(+) Depreciação	0,00	0,00	-50,41	-50,41	-50,41	-50,41	-50,41	-48,93	-48,93	-48,93	-48,93	-48,93
(-) Investimento	-94,86	-695,62	-790,47	0,00	0,00	0,00	0,00	203,85	0,00	0,00	305,77	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-170,51	-771,27	-777,52	14,83	16,73	18,66	20,62	226,97	25,14	27,19	335,05	31,39
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-170,51	-941,78	-1719,30	-1704,48	-1687,75	-1669,09	-1648,46	-1421,49	-1396,35	-1369,16	-1034,11	-1002,73
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
RECEITA TOTAL	267,03	268,10	269,18	270,27	271,35	272,44	273,54	274,64	275,75	276,86		
Receita Tarifária	267,03	268,10	269,18	270,27	271,35	272,44	273,54	274,64	275,75	276,86		
(-) Deduções	-23,10	-23,19	-23,28	-23,38	-23,47	-23,57	-23,66	-23,76	-23,85	-23,95		
RECEITA LÍQUIDA	243,93	244,91	245,90	246,89	247,88	248,88	249,88	250,88	251,89	252,91		
(-) Custos e Despesas	-167,36	-167,46	-167,55	-167,65	-167,75	-167,85	-167,95	-168,05	-168,14	-168,24		
(-) Custos Administrativos Variáveis	-2,94	-2,95	-2,96	-2,97	-2,98	-3,00	-3,01	-3,02	-3,03	-3,05		
LAJIDA	73,63	74,51	75,38	76,26	77,15	78,03	78,92	79,82	80,72	81,62		
(-) Depreciação	48,93	48,93	48,93	48,93	48,93	39,64	39,64	39,64	39,64	39,64		
LAJIR	122,57	123,44	124,32	125,19	126,08	117,67	118,56	119,46	120,35	121,25		
(-) IR e CSLL	-41,67	-41,97	-42,27	-42,57	-42,87	-40,01	-40,31	-40,61	-40,92	-41,23		

LUCRO LÍQUIDO	80,89	81,47	82,05	82,63	83,21	77,66	78,25	78,84	79,43	80,03
(+) Depreciação	-48,93	-48,93	-48,93	-48,93	-48,93	-39,64	-39,64	-39,64	-39,64	-39,64
(-) Investimento	0,00	407,70	0,00	0,00	101,92	0,00	0,00	244,62	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	31,96	440,24	33,12	33,70	136,20	38,03	38,61	283,82	39,80	40,39
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-970,76	-530,53	-497,41	-463,72	-327,51	-289,49	-250,87	32,95	72,74	113,14
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RECEITA TOTAL	277,97	279,09	280,21	281,34	282,47	283,61	284,75	285,89	287,04	288,20
Receita Tarifária	277,97	279,09	280,21	281,34	282,47	283,61	284,75	285,89	287,04	288,20
(-) Deduções	-24,04	-24,14	-24,24	-24,34	-24,43	-24,53	-24,63	-24,73	-24,83	-24,93
RECEITA LÍQUIDA	253,92	254,95	255,97	257,00	258,04	259,07	260,12	261,16	262,21	263,27
(-) Custos e Despesas	-168,35	-168,45	-168,55	-168,65	-168,75	-168,85	-168,96	-169,06	-169,16	-169,27
(-) Custos Administrativos Variáveis	-3,06	-3,07	-3,08	-3,09	-3,11	-3,12	-3,13	-3,14	-3,16	-3,17
LAJIDA	82,52	83,43	84,34	85,26	86,18	87,10	88,03	88,96	89,89	90,83
(-) Depreciação	19,25	19,25	19,25	19,25	19,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LAJIR	101,77	102,68	103,60	104,51	105,43	87,10	88,03	88,96	89,89	90,83
(-) IR e CSLL	-34,60	-34,91	-35,22	-35,53	-35,85	-29,61	-29,93	-30,25	-30,56	-30,88
LUCRO LÍQUIDO	67,17	67,77	68,37	68,98	69,58	57,49	58,10	58,71	59,33	59,95
(+) Depreciação	-19,25	-19,25	-19,25	-19,25	-19,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Investimento	0,00	0,00	0,00	407,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	47,92	48,52	49,12	457,42	50,33	57,49	58,10	58,71	59,33	59,95
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	161,05	209,57	258,69	716,12	766,45	823,94	882,03	940,75	1000,08	1060,03

MAGLEV - DEMANDA DE 12 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO												
ANO	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA TOTAL	0	0	232,52	236,01	239,56	243,17	246,83	250,54	254,31	258,13	262,02	265,96
Receita Tarifária	0	0	232,52	236,01	239,56	243,17	246,83	250,54	254,31	258,13	262,02	265,96
(-) Deduções	0	0	-20,11	-20,42	-20,722	-21,03	-21,35	-21,67	-22,00	-22,32	-22,67	-23,01
RECEITA LÍQUIDA	0	0	212,4	215,6	218,84	222,13	225,48	228,87	232,31	235,81	239,35	242,95
(-) Custos e Despesas	-61,08	-61,08	-141,1	-141,4	-141,74	-142,1	-142,4	-142,7	-143,07	-143,41	-143,76	-144,11
(-) Custos Administrativos Variáveis	0	0	-2,55	-2,59	-2,63	-2,67	-2,71	-2,75	-2,79	-2,83	-2,88	-2,92
LAJIDA	-61,08	-61,08	68,74	71,58	74,46	77,39	80,36	83,38	86,44	89,55	92,71	95,91
(-) Depreciação	0	0	33,58	33,58	33,58	33,58	33,58	32,09	32,09	32,09	32,08	32,08
LAJIR	-61,08	-61,08	102,33	105,17	108,05	110,98	113,96	115,48	118,54	121,65	124,80	128,00
(-) IR e CSLL	0	0	-34,79	-35,76	-36,74	-37,73	-38,75	-39,26	-40,30	-41,36	-42,43	-43,52
LUCRO LÍQUIDO	-61,08	-61,08	67,54	69,41	71,31	73,25	75,21	76,21	78,23	80,28	82,36	84,48
(+) Depreciação	0	0	-33,59	-33,59	-33,58	-33,59	-33,59	-32,09	-32,09	-32,09	-32,08	-32,08
(-) Investimento	-58,13	-426,3	-484,4	0	0	0	0	95,31	0	0	142,97	0
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-119,2	-487,4	-450,5	35,82	37,72	39,66	41,62	139,44	46,145	48,197	193,25	52,39
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-119,20	-606,56	-1057,01	-1021,19	-983,46	-943,80	-902,18	-762,74	-716,59	-668,40	-475,14	-422,75
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
RECEITA TOTAL	267,03	268,10	269,18	270,27	271,35	272,44	273,54	274,64	275,75	276,86		
Receita Tarifária	267,03	268,10	269,18	270,27	271,35	272,44	273,54	274,64	275,75	276,86		
(-) Deduções	-23,10	-23,19	-23,28	-23,38	-23,47	-23,57	-23,66	-23,76	-23,85	-23,95		
RECEITA LÍQUIDA	243,93	244,91	245,90	246,89	247,88	248,88	249,88	250,88	251,89	252,91		
(-) Custos e Despesas	-144,21	-144,31	-144,40	-144,50	-144,60	-144,70	-144,80	-144,90	-145,00	-145,10		
(-) Custos Administrativos Variáveis	-2,94	-2,95	-2,96	-2,97	-2,98	-3,00	-3,01	-3,02	-3,03	-3,05		
LAJIDA	96,78	97,66	98,53	99,41	100,30	101,18	102,07	102,97	103,87	104,77		
(-) Depreciação	32,09	32,09	32,09	32,09	32,09	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50		
LAJIR	128,87	129,75	130,62	131,50	132,39	129,68	130,57	131,47	132,36	133,27		
(-) IR e CSLL	-43,82	-44,11	-44,41	-44,71	-45,01	-44,09	-44,39	-44,70	-45,00	-45,31		

LUCRO LÍQUIDO	85,06	85,63	86,21	86,79	87,37	85,59	86,18	86,77	87,36	87,96
(+) Depreciação	-32,09	-32,09	-32,09	-32,09	-32,09	-28,50	-28,50	-28,50	-28,50	-28,50
(-) Investimento	0,00	190,63	0,00	0,00	47,66	0,00	0,00	114,38	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	52,97	244,17	54,12	54,70	102,94	57,09	57,68	172,65	58,86	59,46
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-369,79	-125,61	-71,49	-16,79	86,15	143,24	200,92	373,57	432,43	491,89
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RECEITA TOTAL	277,97	279,09	280,21	281,34	282,47	283,61	284,75	285,89	287,04	288,20
Receita Tarifária	277,97	279,09	280,21	281,34	282,47	283,61	284,75	285,89	287,04	288,20
(-) Deduções	-24,04	-24,14	-24,24	-24,34	-24,43	-24,53	-24,63	-24,73	-24,83	-24,93
RECEITA LÍQUIDA	253,92	254,95	255,97	257,00	258,04	259,07	260,12	261,16	262,21	263,27
(-) Custos e Despesas	-145,20	-145,30	-145,40	-145,50	-145,60	-145,70	-145,81	-145,91	-146,01	-146,12
(-) Custos Administrativos Variáveis	-3,06	-3,07	-3,08	-3,09	-3,11	-3,12	-3,13	-3,14	-3,16	-3,17
LAJIDA	105,67	106,58	107,49	108,41	109,33	110,25	111,18	112,11	113,04	113,98
(-) Depreciação	18,97	18,97	18,97	18,97	18,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LAJIR	124,64	125,55	126,46	127,38	128,30	110,25	111,18	112,11	113,04	113,98
(-) IR e CSLL	-42,38	-42,69	-43,00	-43,31	-43,62	-37,49	-37,80	-38,12	-38,43	-38,75
LUCRO LÍQUIDO	82,26	82,86	83,46	84,07	84,68	72,77	73,38	73,99	74,61	75,23
(+) Depreciação	-18,97	-18,97	-18,97	-18,97	-18,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Investimento	0,00	0,00	0,00	190,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	63,29	63,89	64,50	255,73	65,71	72,77	73,38	73,99	74,61	75,23
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	555,18	619,07	683,57	939,30	1005,01	1077,77	1151,15	1225,14	1299,75	1374,98

MONOTRILHO - DEMANDA DE 12 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO												
ANO	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA TOTAL	0,00	0,00	232,52	236,01	239,56	243,17	246,83	250,54	254,31	258,13	262,02	265,96
Receita Tarifária	0,00	0,00	232,52	236,01	239,56	243,17	246,83	250,54	254,31	258,13	262,02	265,96
(-) Deduções	0,00	0,00	-20,11	-20,42	-20,72	-21,03	-21,35	-21,67	-22,00	-22,33	-22,66	-23,01
RECEITA LÍQUIDA	0,00	0,00	212,40	215,60	218,84	222,13	225,48	228,87	232,31	235,81	239,35	242,95
(-) Custos e Despesas	-184,30	-184,30	-276,81	-277,12	-277,44	-277,77	-278,09	-278,43	-278,77	-279,11	-279,46	-279,82
(-) Custos Administrativos Variáveis	0,00	0,00	-2,56	-2,60	-2,64	-2,67	-2,72	-2,76	-2,80	-2,84	-2,88	-2,93
LAJIDA	-184,30	-184,30	-66,96	-64,12	-61,23	-58,31	-55,33	-52,32	-49,25	-46,15	-42,99	-39,79
(-) Depreciação	0,00	0,00	93,26	93,26	93,26	93,26	93,26	91,76	91,76	91,76	91,76	91,76
LAJIR	-184,30	-184,30	26,30	29,14	32,03	34,96	37,93	39,45	42,51	45,62	48,77	51,97
(-) IR e CSLL	0,00	0,00	-8,94	-9,91	-10,89	-11,88	-12,90	-13,41	-14,45	-15,51	-16,58	-17,67
LUCRO LÍQUIDO	-184,30	-184,30	17,36	19,23	21,14	23,07	25,03	26,03	28,06	30,11	32,19	34,30
(+) Depreciação	0,00	0,00	-93,26	-93,26	-93,26	-93,26	-93,26	-91,76	-91,76	-91,76	-91,76	-91,76
(-) Investimento	-188,95	-1385,60	-1574,54	0,00	0,00	0,00	0,00	481,39	0,00	0,00	722,09	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-373,24	-1569,89	-1650,45	-74,03	-72,12	-70,19	-68,23	415,67	-63,71	-61,66	662,52	-57,46
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-373,24	-1943,14	-3593,58	-3667,61	-3739,73	-3809,93	-3878,15	-3462,49	-3526,20	-3587,85	-2925,33	-2982,79
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
RECEITA TOTAL	267,03	268,10	269,18	270,27	271,35	272,44	273,54	274,64	275,75	276,86		
Receita Tarifária	267,03	268,10	269,18	270,27	271,35	272,44	273,54	274,64	275,75	276,86		
(-) Deduções	-23,10	-23,19	-23,28	-23,38	-23,47	-23,57	-23,66	-23,76	-23,85	-23,95		
RECEITA LÍQUIDA	243,93	244,91	245,90	246,89	247,88	248,88	249,88	250,88	251,89	252,91		
(-) Custos e Despesas	-279,91	-280,01	-280,11	-280,20	-280,30	-280,40	-280,50	-280,60	-280,70	-280,80		
(-) Custos Administrativos Variáveis	-2,94	-2,95	-2,96	-2,97	-2,98	-3,00	-3,01	-3,02	-3,03	-3,05		
LAJIDA	-38,92	-38,05	-37,17	-36,29	-35,41	-34,52	-33,63	-32,73	-31,84	-30,94		
(-) Depreciação	91,76	91,76	91,76	91,76	91,76	78,48	78,48	78,48	78,48	78,48		
LAJIR	52,84	53,72	54,59	55,47	56,36	43,96	44,85	45,75	46,65	47,55		
(-) IR e CSLL	-17,97	-18,26	-18,56	-18,86	-19,16	-14,95	-15,25	-15,55	-15,86	-16,17		

LUCRO LÍQUIDO	34,88	35,45	36,03	36,61	37,20	29,02	29,60	30,19	30,79	31,38
(+) Depreciação	-91,76	-91,76	-91,76	-91,76	-91,76	-78,48	-78,48	-78,48	-78,48	-78,48
(-) Investimento	0,00	962,79	0,00	0,00	240,70	0,00	0,00	577,67	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-56,89	906,48	-55,73	-55,15	186,13	-49,47	-48,88	529,38	-47,70	-47,10
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-3039,68	-2133,20	-2188,93	-2244,08	-2057,95	-2107,42	-2156,30	-1626,91	-1674,61	-1721,71
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RECEITA TOTAL	277,97	279,09	280,21	281,34	282,47	283,61	284,75	285,89	287,04	288,20
Receita Tarifária	277,97	279,09	280,21	281,34	282,47	283,61	284,75	285,89	287,04	288,20
(-) Deduções	-24,04	-24,14	-24,24	-24,34	-24,43	-24,53	-24,63	-24,73	-24,83	-24,93
RECEITA LÍQUIDA	253,92	254,95	255,97	257,00	258,04	259,07	260,12	261,16	262,21	263,27
(-) Custos e Despesas	-280,90	-281,00	-281,10	-281,20	-281,30	-281,40	-281,51	-281,61	-281,71	-281,82
(-) Custos Administrativos Variáveis	-3,06	-3,07	-3,08	-3,09	-3,11	-3,12	-3,13	-3,14	-3,16	-3,17
LAJIDA	-30,03	-29,12	-28,21	-27,29	-26,37	-25,45	-24,52	-23,59	-22,66	-21,72
(-) Depreciação	30,34	30,34	30,34	30,34	30,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LAJIR	0,31	1,22	2,13	3,05	3,97	-25,45	-24,52	-23,59	-22,66	-21,72
(-) IR e CSLL	-0,11	-0,42	-0,73	-1,04	-1,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LUCRO LÍQUIDO	0,21	0,81	1,41	2,01	2,62	-25,45	-24,52	-23,59	-22,66	-21,72
(+) Depreciação	-30,34	-30,34	-30,34	-30,34	-30,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Investimento	0,00	0,00	0,00	962,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-30,14	-29,54	-28,94	934,46	-27,72	-25,45	-24,52	-23,59	-22,66	-21,72
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-1751,85	-1781,39	-1810,32	-875,86	-903,59	-929,04	-953,56	-977,16	-999,81	-1021,53

MAGLEV - DEMANDA DE 15 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO												
ANO	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA TOTAL	0,00	0,00	290,65	295,02	299,46	303,96	308,53	313,18	317,89	322,67	327,52	332,45
Receita Tarifária	0,00	0,00	290,65	295,02	299,46	303,96	308,53	313,18	317,89	322,67	327,52	332,45
(-) Deduções	0,00	0,00	-25,14	-25,52	-25,90	-26,29	-26,69	-27,09	-27,50	-27,91	-28,33	-28,76
RECEITA LÍQUIDA	0,00	0,00	265,50	269,50	273,55	277,67	281,85	286,09	290,39	294,76	299,19	303,69
(-) Custos e Despesas	-66,88	-66,88	-156,97	-157,37	-157,76	-158,17	-158,58	-159,00	-159,42	-159,85	-160,29	-160,73
(-) Custos Administrativos Variáveis	0,00	0,00	-3,20	-3,25	-3,29	-3,34	-3,39	-3,44	-3,50	-3,55	-3,60	-3,66
LAJIDA	-66,88	-66,88	105,34	108,89	112,49	116,15	119,87	123,64	127,47	131,35	135,30	139,30
(-) Depreciação	0,00	0,00	40,68	40,68	40,68	40,68	40,68	39,18	39,18	39,18	39,18	39,18
LAJIR	-66,88	-66,88	146,01	149,56	153,17	156,83	160,54	162,82	166,65	170,53	174,48	178,48
(-) IR e CSLL	0,00	0,00	-49,64	-50,85	-52,08	-53,32	-54,59	-55,36	-56,66	-57,98	-59,32	-60,68
LUCRO LÍQUIDO	-66,88	-66,88	96,37	98,71	101,09	103,51	105,96	107,46	109,99	112,55	115,15	117,80
(+) Depreciação	0,00	0,00	-40,68	-40,68	-40,68	-40,68	-40,68	-39,18	-39,18	-39,18	-39,18	-39,18
(-) Investimento	-70,77	-518,97	-589,74	0,00	0,00	0,00	0,00	119,14	0,00	0,00	178,71	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-137,65	-585,86	-534,05	58,04	60,42	62,83	65,28	187,43	70,81	73,37	254,69	78,62
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-137,65	-723,51	-1257,56	-1199,53	-1139,11	-1076,28	-1010,99	-823,57	-752,76	-679,38	-424,69	-346,08
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
RECEITA TOTAL	333,79	335,13	336,48	337,83	339,19	340,56	341,93	343,30	344,68	346,07		
Receita Tarifária	333,79	335,13	336,48	337,83	339,19	340,56	341,93	343,30	344,68	346,07		
(-) Deduções	-28,87	-28,99	-29,11	-29,22	-29,34	-29,46	-29,58	-29,70	-29,82	-29,93		
RECEITA LÍQUIDA	304,91	306,14	307,37	308,61	309,85	311,10	312,35	313,61	314,87	316,13		
(-) Custos e Despesas	-160,85	-160,98	-161,10	-161,22	-161,34	-161,46	-161,59	-161,71	-161,84	-161,96		
(-) Custos Administrativos Variáveis	-3,67	-3,69	-3,70	-3,72	-3,73	-3,75	-3,76	-3,78	-3,79	-3,81		
LAJIDA	140,39	141,48	142,57	143,67	144,78	145,89	147,00	148,12	149,24	150,37		
(-) Depreciação	39,18	39,18	39,18	39,18	39,18	34,69	34,69	34,69	34,69	34,69		
LAJIR	179,57	180,66	181,75	182,85	183,96	180,58	181,69	182,81	183,93	185,06		
(-) IR e CSLL	-61,05	-61,42	-61,80	-62,17	-62,54	-61,40	-61,77	-62,15	-62,54	-62,92		

LUCRO LÍQUIDO	118,51	119,23	119,96	120,68	121,41	119,18	119,91	120,65	121,39	122,14
(+) Depreciação	-39,18	-39,18	-39,18	-39,18	-39,18	-34,69	-34,69	-34,69	-34,69	-34,69
(-) Investimento	0,00	238,28	0,00	0,00	59,57	0,00	0,00	142,97	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	79,34	318,34	80,78	81,51	141,81	84,49	85,23	228,94	86,70	87,45
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-266,74	51,60	132,38	213,89	355,69	440,18	525,41	754,35	841,05	928,50
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RECEITA TOTAL	347,46	348,86	350,26	351,67	353,09	354,51	355,93	357,37	358,80	360,25
Receita Tarifária	347,46	348,86	350,26	351,67	353,09	354,51	355,93	357,37	358,80	360,25
(-) Deduções	-30,06	-30,18	-30,30	-30,42	-30,54	-30,66	-30,79	-30,91	-31,04	-31,16
RECEITA LÍQUIDA	317,41	318,68	319,96	321,25	322,54	323,84	325,15	326,45	327,77	329,09
(-) Custos e Despesas	-162,09	-162,21	-162,34	-162,46	-162,59	-162,72	-162,85	-162,98	-163,11	-163,24
(-) Custos Administrativos Variáveis	-3,82	-3,84	-3,85	-3,87	-3,88	-3,90	-3,92	-3,93	-3,95	-3,96
LAJIDA	151,50	152,63	153,77	154,92	156,07	157,22	158,38	159,55	160,71	161,89
(-) Depreciação	22,77	22,77	22,77	22,77	22,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LAJIR	174,27	175,41	176,55	177,69	178,84	157,22	158,38	159,55	160,71	161,89
(-) IR e CSSL	-59,25	-59,64	-60,03	-60,42	-60,81	-53,46	-53,85	-54,25	-54,64	-55,04
LUCRO LÍQUIDO	115,02	115,77	116,52	117,28	118,04	103,77	104,53	105,30	106,07	106,84
(+) Depreciação	-22,77	-22,77	-22,77	-22,77	-22,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Investimento	0,00	0,00	0,00	238,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	92,25	93,00	93,75	332,79	95,26	103,77	104,53	105,30	106,07	106,84
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	1020,74	1113,74	1207,49	1540,28	1635,54	1739,31	1843,84	1949,14	2055,21	2162,05

MONOTRILHO - DEMANDA DE 15 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO												
ANO	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA TOTAL	0,00	0,00	290,65	295,02	299,46	303,96	308,53	313,18	317,89	322,67	327,52	332,45
Receita Tarifária	0,00	0,00	290,65	295,02	299,46	303,96	308,53	313,18	317,89	322,67	327,52	332,45
(-) Deduções	0,00	0,00	-25,14	-25,52	-25,90	-26,29	-26,69	-27,09	-27,50	-27,91	-28,33	-28,76
RECEITA LÍQUIDA	0,00	0,00	265,50	269,50	273,55	277,67	281,85	286,09	290,39	294,76	299,19	303,69
(-) Custos e Despesas	-201,36	-201,36	-303,13	-303,53	-303,93	-304,33	-304,74	-305,16	-305,59	-306,02	-306,45	-306,90
(-) Custos Administrativos Variáveis	0,00	0,00	-3,20	-3,25	-3,29	-3,34	-3,39	-3,44	-3,50	-3,55	-3,60	-3,66
LAJIDA	-201,36	-201,36	-40,83	-37,27	-33,67	-30,01	-26,29	-22,52	-18,69	-14,81	-10,86	-6,86
(-) Depreciação	0,00	0,00	102,26	102,26	102,26	102,26	102,26	100,76	100,76	100,76	100,76	100,76
LAJIR	-201,36	-201,36	61,43	64,98	68,59	72,25	75,97	78,24	82,07	85,95	89,90	93,90
(-) IR e CSLL	0,00	0,00	-20,89	-22,09	-23,32	-24,57	-25,83	-26,60	-27,90	-29,22	-30,56	-31,93
LUCRO LÍQUIDO	-201,36	-201,36	40,55	42,89	45,27	47,69	50,14	51,64	54,16	56,73	59,33	61,97
(+) Depreciação	0,00	0,00	-102,26	-102,26	-102,26	-102,26	-102,26	-100,76	-100,76	-100,76	-100,76	-100,76
(-) Investimento	-201,87	-1480,40	-1682,27	0,00	0,00	0,00	0,00	601,74	0,00	0,00	902,61	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-403,24	-1681,76	-1743,99	-59,37	-56,99	-54,57	-52,12	552,62	-46,60	-44,03	861,19	-38,79
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-403,24	-2085,00	-3828,99	-3888,36	-3945,35	-3999,92	-4052,04	-3499,42	-3546,02	-3590,05	-2728,87	-2767,65
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
RECEITA TOTAL	333,79	335,13	336,48	337,83	339,19	340,56	341,93	343,30	344,68	346,07		
Receita Tarifária	333,79	335,13	336,48	337,83	339,19	340,56	341,93	343,30	344,68	346,07		
(-) Deduções	-28,87	-28,99	-29,11	-29,22	-29,34	-29,46	-29,58	-29,70	-29,82	-29,93		
RECEITA LÍQUIDA	304,91	306,14	307,37	308,61	309,85	311,10	312,35	313,61	314,87	316,13		
(-) Custos e Despesas	-307,02	-307,14	-307,26	-307,38	-307,50	-307,63	-307,75	-307,87	-308,00	-308,12		
(-) Custos Administrativos Variáveis	-3,67	-3,69	-3,70	-3,72	-3,73	-3,75	-3,76	-3,78	-3,79	-3,81		
LAJIDA	-5,77	-4,68	-3,59	-2,49	-1,38	-0,28	0,84	1,96	3,08	4,20		
(-) Depreciação	100,76	100,76	100,76	100,76	100,76	84,16	84,16	84,16	84,16	84,16		
LAJIR	94,99	96,08	97,17	98,27	99,38	83,89	85,00	86,12	87,24	88,37		
(-) IR e CSLL	-32,30	-32,67	-33,04	-33,41	-33,79	-28,52	-28,90	-29,28	-29,66	-30,04		

LUCRO LÍQUIDO	62,69	63,41	64,13	64,86	65,59	55,36	56,10	56,84	57,58	58,32
(+) Depreciação	-100,76	-100,76	-100,76	-100,76	-100,76	-84,16	-84,16	-84,16	-84,16	-84,16
(-) Investimento	0,00	1203,49	0,00	0,00	300,87	0,00	0,00	722,09	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-38,07	1166,14	-36,63	-35,90	265,70	-28,80	-28,06	694,77	-26,58	-25,84
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-2805,72	-1639,59	-1676,21	-1712,11	-1446,42	-1475,21	-1503,27	-808,51	-835,09	-860,93
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RECEITA TOTAL	347,46	348,86	350,26	351,67	353,09	354,51	355,93	357,37	358,80	360,25
Receita Tarifária	347,46	348,86	350,26	351,67	353,09	354,51	355,93	357,37	358,80	360,25
(-) Deduções	-30,06	-30,18	-30,30	-30,42	-30,54	-30,66	-30,79	-30,91	-31,04	-31,16
RECEITA LÍQUIDA	317,41	318,68	319,96	321,25	322,54	323,84	325,15	326,45	327,77	329,09
(-) Custos e Despesas	-188,38	-188,51	-188,64	-188,76	-188,89	-189,02	-189,15	-189,28	-189,40	-189,53
(-) Custos Administrativos Variáveis	-3,82	-3,84	-3,85	-3,87	-3,88	-3,90	-3,92	-3,93	-3,95	-3,96
LAJIDA	125,20	126,34	127,48	128,62	129,77	130,92	132,08	133,25	134,41	135,59
(-) Depreciação	22,37	22,37	22,37	22,37	22,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LAJIR	147,57	148,70	149,84	150,99	152,14	130,92	132,08	133,25	134,41	135,59
(-) IR e CSLL	-50,17	-50,56	-50,95	-51,34	-51,73	-44,51	-44,91	-45,30	-45,70	-46,10
LUCRO LÍQUIDO	97,39	98,14	98,90	99,65	100,41	86,41	87,17	87,94	88,71	89,49
(+) Depreciação	-22,37	-22,37	-22,37	-22,37	-22,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Investimento	0,00	0,00	0,00	509,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	75,03	75,78	76,53	586,91	78,04	86,41	87,17	87,94	88,71	89,49
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	609,15	684,93	761,46	1348,37	1426,41	1512,82	1600,00	1687,94	1776,65	1866,14

VLT - DEMANDA DE 18 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO												
ANO	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA TOTAL	0,00	0,00	348,77	354,02	359,35	364,75	370,24	375,81	381,46	387,20	393,03	398,94
Receita Tarifária	0,00	0,00	348,77	354,02	359,35	364,75	370,24	375,81	381,46	387,20	393,03	398,94
(-) Deduções	0,00	0,00	-30,17	-30,62	-31,08	-31,55	-32,03	-32,51	-33,00	-33,49	-34,00	-34,51
RECEITA LÍQUIDA	0,00	0,00	318,61	323,40	328,26	333,20	338,21	343,30	348,47	353,71	359,03	364,43
(-) Custos e Despesas	-88,14	-88,14	-199,76	-200,23	-200,71	-201,20	-201,69	-202,19	-202,70	-203,22	-203,74	-204,28
(-) Custos Administrativos Variáveis	0,00	0,00	-3,84	-3,89	-3,95	-4,01	-4,07	-4,13	-4,20	-4,26	-4,32	-4,39
LAJIDA	-88,14	-88,14	115,01	119,27	123,60	127,99	132,45	136,98	141,57	146,23	150,96	155,77
(-) Depreciação	0,00	0,00	72,17	72,17	72,17	72,17	72,17	70,69	70,69	70,69	70,69	70,69
LAJIR	-88,14	-88,14	187,18	191,44	195,77	200,16	204,62	207,67	212,26	216,92	221,65	226,46
(-) IR e CSLL	0,00	0,00	-63,64	-65,09	-66,56	-68,06	-69,57	-70,61	-72,17	-73,75	-75,36	-77,00
LUCRO LÍQUIDO	-88,14	-88,14	123,54	126,35	129,21	132,11	135,05	137,06	140,09	143,17	146,29	149,46
(+) Depreciação	0,00	0,00	-72,17	-72,17	-72,17	-72,17	-72,17	-70,69	-70,69	-70,69	-70,69	-70,69
(-) Investimento	-136,04	-997,61	-1133,65	0,00	0,00	0,00	0,00	305,77	0,00	0,00	458,66	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-224,17	-1085,75	-1082,28	54,18	57,04	59,94	62,88	372,14	69,40	72,48	534,26	78,77
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-224,17	-1309,92	-2392,20	-2338,02	-2280,99	-2221,05	-2158,17	-1786,03	-1716,63	-1644,15	-1109,89	-1031,12
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
RECEITA TOTAL	400,54	402,16	403,77	405,40	407,03	408,67	410,31	411,96	413,62	415,28		
Receita Tarifária	400,54	402,16	403,77	405,40	407,03	408,67	410,31	411,96	413,62	415,28		
(-) Deduções	-34,65	-34,79	-34,93	-35,07	-35,21	-35,35	-35,49	-35,63	-35,78	-35,92		
RECEITA LÍQUIDA	365,90	367,37	368,85	370,33	371,82	373,32	374,82	376,33	377,84	379,36		
(-) Custos e Despesas	-204,42	-204,56	-204,71	-204,86	-205,00	-205,15	-205,30	-205,45	-205,60	-205,75		
(-) Custos Administrativos Variáveis	-4,41	-4,42	-4,44	-4,46	-4,48	-4,50	-4,51	-4,53	-4,55	-4,57		
LAJIDA	157,07	158,38	159,70	161,02	162,34	163,67	165,01	166,35	167,69	169,05		
(-) Depreciação	70,69	70,69	70,69	70,69	70,69	56,75	56,75	56,75	56,75	56,75		
LAJIR	227,76	229,07	230,39	231,71	233,03	220,42	221,76	223,10	224,44	225,80		
(-) IR e CSLL	-77,44	-77,88	-78,33	-78,78	-79,23	-74,94	-75,40	-75,85	-76,31	-76,77		

LUCRO LÍQUIDO	150,32	151,19	152,05	152,93	153,80	145,48	146,36	147,24	148,13	149,03
(+) Depreciação	-70,69	-70,69	-70,69	-70,69	-70,69	-56,75	-56,75	-56,75	-56,75	-56,75
(-) Investimento	0,00	611,55	0,00	0,00	152,89	0,00	0,00	366,93	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	79,63	692,05	81,36	82,24	236,00	88,73	89,61	457,42	91,38	92,28
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-951,48	-259,44	-178,07	-95,84	140,16	228,89	318,50	775,92	867,31	959,58
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RECEITA TOTAL	416,95	418,63	420,32	422,01	423,70	425,41	427,12	428,84	430,56	432,30
Receita Tarifária	416,95	418,63	420,32	422,01	423,70	425,41	427,12	428,84	430,56	432,30
(-) Deduções	-36,07	-36,21	-36,36	-36,50	-36,65	-36,80	-36,95	-37,09	-37,24	-37,39
RECEITA LÍQUIDA	380,89	382,42	383,96	385,50	387,05	388,61	390,17	391,74	393,32	394,90
(-) Custos e Despesas	-205,90	-206,05	-206,20	-206,35	-206,50	-206,66	-206,81	-206,97	-207,12	-207,28
(-) Custos Administrativos Variáveis	-4,59	-4,60	-4,62	-4,64	-4,66	-4,68	-4,70	-4,72	-4,74	-4,76
LAJIDA	170,40	171,77	173,14	174,51	175,89	177,27	178,66	180,06	181,46	182,87
(-) Depreciação	26,17	26,17	26,17	26,17	26,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LAJIR	196,58	197,94	199,31	200,68	202,06	177,27	178,66	180,06	181,46	182,87
(-) IR e CSLL	-66,84	-67,30	-67,76	-68,23	-68,70	-60,27	-60,75	-61,22	-61,70	-62,18
LUCRO LÍQUIDO	129,74	130,64	131,54	132,45	133,36	117,00	117,92	118,84	119,77	120,69
(+) Depreciação	-26,17	-26,17	-26,17	-26,17	-26,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Investimento	0,00	0,00	0,00	611,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	103,57	104,47	105,37	717,83	107,19	117,00	117,92	118,84	119,77	120,69
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	1063,15	1167,62	1272,99	1990,82	2098,00	2215,00	2332,92	2451,76	2571,53	2692,22

MAGLEV - DEMANDA DE 18 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO												
ANO	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA TOTAL	0,00	0,00	348,77	354,02	359,35	364,75	370,24	375,81	381,46	387,20	393,03	398,94
Receita Tarifária	0,00	0,00	348,77	354,02	359,35	364,75	370,24	375,81	381,46	387,20	393,03	398,94
(-) Deduções	0,00	0,00	-30,17	-30,62	-31,08	-31,55	-32,03	-32,51	-33,00	-33,49	-34,00	-34,51
RECEITA LÍQUIDA	0,00	0,00	318,61	323,40	328,26	333,20	338,21	343,30	348,47	353,71	359,03	364,43
(-) Custos e Despesas	-71,63	-71,63	-170,95	-171,42	-171,90	-172,38	-172,88	-173,38	-173,89	-174,40	-174,93	-175,46
(-) Custos Administrativos Variáveis	0,00	0,00	-3,84	-3,89	-3,95	-4,01	-4,07	-4,13	-4,20	-4,26	-4,32	-4,39
LAJIDA	-71,63	-71,63	143,82	148,09	152,41	156,81	161,26	165,79	170,38	175,05	179,78	184,58
(-) Depreciação	0,00	0,00	48,71	48,71	48,71	48,71	48,71	47,22	47,22	47,22	47,22	47,22
LAJIR	-71,63	-71,63	192,54	196,80	201,13	205,52	209,98	213,01	217,60	222,26	226,99	231,80
(-) IR e CSLL	0,00	0,00	-65,46	-66,91	-68,38	-69,88	-71,39	-72,42	-73,98	-75,57	-77,18	-78,81
LUCRO LÍQUIDO	-71,63	-71,63	127,07	129,89	132,74	135,64	138,59	140,58	143,62	146,69	149,82	152,99
(+) Depreciação	0,00	0,00	-48,71	-48,71	-48,71	-48,71	-48,71	-47,22	-47,22	-47,22	-47,22	-47,22
(-) Investimento	-85,33	-625,79	-711,12	0,00	0,00	0,00	0,00	142,97	0,00	0,00	214,46	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-156,96	-697,41	-632,76	81,17	84,03	86,93	89,87	236,34	96,40	99,48	317,06	105,77
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-156,96	-854,38	-1487,14	-1405,96	-1321,93	-1235,00	-1145,13	-908,79	-812,39	-712,92	-395,86	-290,09
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
RECEITA TOTAL	400,54	402,16	403,77	405,40	407,03	408,67	410,31	411,96	413,62	415,28		
Receita Tarifária	400,54	402,16	403,77	405,40	407,03	408,67	410,31	411,96	413,62	415,28		
(-) Deduções	-34,65	-34,79	-34,93	-35,07	-35,21	-35,35	-35,49	-35,63	-35,78	-35,92		
RECEITA LÍQUIDA	365,90	367,37	368,85	370,33	371,82	373,32	374,82	376,33	377,84	379,36		
(-) Custos e Despesas	-175,60	-175,75	-175,90	-176,04	-176,19	-176,34	-176,48	-176,63	-176,78	-176,93		
(-) Custos Administrativos Variáveis	-4,41	-4,42	-4,44	-4,46	-4,48	-4,50	-4,51	-4,53	-4,55	-4,57		
LAJIDA	185,89	187,20	188,51	189,83	191,16	192,49	193,82	195,16	196,51	197,86		
(-) Depreciação	47,22	47,22	47,22	47,22	47,22	41,83	41,83	41,83	41,83	41,83		
LAJIR	233,10	234,41	235,73	237,05	238,37	234,32	235,65	236,99	238,34	239,69		
(-) IR e CSLL	-79,25	-79,70	-80,15	-80,60	-81,05	-79,67	-80,12	-80,58	-81,04	-81,49		

LUCRO LÍQUIDO	153,85	154,71	155,58	156,45	157,33	154,65	155,53	156,41	157,30	158,20
(+) Depreciação	-47,22	-47,22	-47,22	-47,22	-47,22	-41,83	-41,83	-41,83	-41,83	-41,83
(-) Investimento	0,00	285,94	0,00	0,00	71,49	0,00	0,00	171,57	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	106,63	393,44	108,36	109,23	181,59	112,82	113,70	286,15	115,47	116,37
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-183,45	209,98	318,35	427,58	609,18	722,00	835,70	1121,85	1237,32	1353,69
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RECEITA TOTAL	416,95	418,63	420,32	422,01	423,70	425,41	427,12	428,84	430,56	432,30
Receita Tarifária	416,95	418,63	420,32	422,01	423,70	425,41	427,12	428,84	430,56	432,30
(-) Deduções	-36,07	-36,21	-36,36	-36,50	-36,65	-36,80	-36,95	-37,09	-37,24	-37,39
RECEITA LÍQUIDA	380,89	382,42	383,96	385,50	387,05	388,61	390,17	391,74	393,32	394,90
(-) Custos e Despesas	-177,08	-177,23	-177,38	-177,54	-177,69	-177,84	-178,00	-178,15	-178,31	-178,46
(-) Custos Administrativos Variáveis	-4,59	-4,60	-4,62	-4,64	-4,66	-4,68	-4,70	-4,72	-4,74	-4,76
LAJIDA	199,22	200,58	201,95	203,32	204,70	206,09	207,48	208,88	210,28	211,68
(-) Depreciação	27,53	27,53	27,53	27,53	27,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LAJIR	226,75	228,11	229,48	230,86	232,24	206,09	207,48	208,88	210,28	211,68
(-) IR e CSLL	-77,10	-77,56	-78,02	-78,49	-78,96	-70,07	-70,54	-71,02	-71,49	-71,97
LUCRO LÍQUIDO	149,66	150,56	151,46	152,37	153,28	136,02	136,94	137,86	138,78	139,71
(+) Depreciação	-27,53	-27,53	-27,53	-27,53	-27,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Investimento	0,00	0,00	0,00	285,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	122,12	123,02	123,93	410,78	125,74	136,02	136,94	137,86	138,78	139,71
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	1475,81	1598,84	1722,76	2133,54	2259,28	2395,30	2532,24	2670,09	2808,88	2948,59

MONOTRILHO - DEMANDA DE 18 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO												
ANO	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA TOTAL	0,00	0,00	348,77	354,02	359,35	364,75	370,24	375,81	381,46	387,20	393,03	398,94
Receita Tarifária	0,00	0,00	348,77	354,02	359,35	364,75	370,24	375,81	381,46	387,20	393,03	398,94
(-) Deduções	0,00	0,00	-30,17	-30,62	-31,08	-31,55	-32,03	-32,51	-33,00	-33,49	-34,00	-34,51
RECEITA LÍQUIDA	0,00	0,00	318,61	323,40	328,26	333,20	338,21	343,30	348,47	353,71	359,03	364,43
(-) Custos e Despesas	-215,31	-215,31	-325,59	-326,06	-326,54	-327,02	-327,52	-328,02	-328,53	-329,04	-329,57	-330,10
(-) Custos Administrativos Variáveis	0,00	0,00	-3,84	-3,89	-3,95	-4,01	-4,07	-4,13	-4,20	-4,26	-4,32	-4,39
LAJIDA	-215,31	-215,31	-10,82	-6,55	-2,23	2,17	6,62	11,15	15,74	20,41	25,14	29,94
(-) Depreciação	0,00	0,00	121,09	121,09	121,09	121,09	121,09	119,59	119,59	119,59	119,59	119,59
LAJIR	-215,31	-215,31	110,27	114,54	118,86	123,26	127,71	130,74	135,34	140,00	144,73	149,53
(-) IR e CSLL	0,00	0,00	-37,49	-38,94	-40,41	-41,91	-43,42	-44,45	-46,01	-47,60	-49,21	-50,84
LUCRO LÍQUIDO	-215,31	-215,31	72,78	75,59	78,45	81,35	84,29	86,29	89,32	92,40	95,52	98,69
(+) Depreciação	0,00	0,00	-121,09	-121,09	-121,09	-121,09	-121,09	-119,59	-119,59	-119,59	-119,59	-119,59
(-) Investimento	-239,00	-1752,65	-1991,65	0,00	0,00	0,00	0,00	722,09	0,00	0,00	1083,14	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-454,31	-1967,96	-2039,96	-45,50	-42,64	-39,74	-36,80	688,79	-30,27	-27,19	1059,07	-20,90
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-454,31	-2422,26	-4462,22	-4507,72	-4550,36	-4590,10	-4626,90	-3938,11	-3968,38	-3995,58	-2936,51	-2957,41
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
RECEITA TOTAL	400,54	402,16	403,77	405,40	407,03	408,67	410,31	411,96	413,62	415,28		
Receita Tarifária	400,54	402,16	403,77	405,40	407,03	408,67	410,31	411,96	413,62	415,28		
(-) Deduções	-34,65	-34,79	-34,93	-35,07	-35,21	-35,35	-35,49	-35,63	-35,78	-35,92		
RECEITA LÍQUIDA	365,90	367,37	368,85	370,33	371,82	373,32	374,82	376,33	377,84	379,36		
(-) Custos e Despesas	-330,25	-330,39	-330,54	-330,68	-330,83	-330,98	-331,12	-331,27	-331,42	-331,57		
(-) Custos Administrativos Variáveis	-4,41	-4,42	-4,44	-4,46	-4,48	-4,50	-4,51	-4,53	-4,55	-4,57		
LAJIDA	31,25	32,56	33,87	35,19	36,51	37,85	39,18	40,52	41,87	43,22		
(-) Depreciação	119,59	119,59	119,59	119,59	119,59	99,67	99,67	99,67	99,67	99,67		
LAJIR	150,84	152,15	153,46	154,78	156,11	137,52	138,85	140,20	141,54	142,89		
(-) IR e CSLL	-51,29	-51,73	-52,18	-52,63	-53,08	-46,76	-47,21	-47,67	-48,12	-48,58		

LUCRO LÍQUIDO	99,55	100,42	101,29	102,16	103,03	90,76	91,64	92,53	93,42	94,31
(+) Depreciação	-119,59	-119,59	-119,59	-119,59	-119,59	-99,67	-99,67	-99,67	-99,67	-99,67
(-) Investimento	0,00	1444,18	0,00	0,00	361,05	0,00	0,00	866,51	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	-20,04	1425,01	-18,31	-17,44	344,48	-8,91	-8,03	859,37	-6,26	-5,36
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-2977,45	-1552,44	-1570,75	-1588,18	-1243,70	-1252,61	-1260,64	-401,27	-407,53	-412,89
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RECEITA TOTAL	416,95	418,63	420,32	422,01	423,70	425,41	427,12	428,84	430,56	432,30
Receita Tarifária	416,95	418,63	420,32	422,01	423,70	425,41	427,12	428,84	430,56	432,30
(-) Deduções	-36,07	-36,21	-36,36	-36,50	-36,65	-36,80	-36,95	-37,09	-37,24	-37,39
RECEITA LÍQUIDA	380,89	382,42	383,96	385,50	387,05	388,61	390,17	391,74	393,32	394,90
(-) Custos e Despesas	-331,72	-331,87	-332,02	-332,18	-332,33	-332,48	-332,64	-332,79	-332,95	-333,10
(-) Custos Administrativos Variáveis	-4,59	-4,60	-4,62	-4,64	-4,66	-4,68	-4,70	-4,72	-4,74	-4,76
LAJIDA	44,58	45,94	47,31	48,68	50,06	51,45	52,84	54,23	55,64	57,04
(-) Depreciação	27,46	27,46	27,46	27,46	27,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LAJIR	72,04	73,41	74,77	76,15	77,53	51,45	52,84	54,23	55,64	57,04
(-) IR e CSLL	-24,49	-24,96	-25,42	-25,89	-26,36	-17,49	-17,97	-18,44	-18,92	-19,39
LUCRO LÍQUIDO	47,55	48,45	49,35	50,26	51,17	33,96	34,87	35,79	36,72	37,65
(+) Depreciação	-27,46	-27,46	-27,46	-27,46	-27,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(-) Investimento	0,00	0,00	0,00	1444,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>(+) Investimentos de Recursos Públicos</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUXO DE CAIXA LIVRE	20,08	20,98	21,89	1466,98	23,70	33,96	34,87	35,79	36,72	37,65
FLUXO DE CAIXA ACUMULADO	-392,81	-371,82	-349,94	1117,04	1140,74	1174,70	1209,57	1245,37	1282,09	1319,74

II – Emissões de poluentes e consumo energético do VLT, Monotrilho e MagLev para os cenários aplicados

VLT - DEMANDA DE 12 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	54,07	54,88	55,71	56,55	57,40	58,26	59,14	60,03	60,93	61,85	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	216.294	219.548	222.851	226.203	229.606	233.060	236.567	240.125	243.738	247.405	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	12.000	12.181	12.364	12.550	12.739	12.930	13.125	13.322	13.523	13.726	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	53,89	54,70	55,52	56,35	57,20	58,06	58,94	59,82	60,72	61,64	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	728,19	739,15	750,26	761,55	773,01	784,64	796,44	808,42	820,58	832,93	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	62,10	62,35	62,60	62,85	63,10	63,36	63,61	63,87	64,13	64,38	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	248.400	249.399	250.403	251.410	252.421	253.437	254.456	255.480	256.508	257.540	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	13.781	13.837	13.892	13.948	14.004	14.061	14.117	14.174	14.231	14.288	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	61,88	62,13	62,38	62,63	62,89	63,14	63,39	63,65	63,90	64,16	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	836,28	839,64	843,02	846,41	849,82	853,24	856,67	860,12	863,58	867,05	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	64,64	64,90	65,16	65,43	65,69	65,95	66,22	66,49	66,75	67,02	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	258.576	259.616	260.661	261.709	262.762	263.819	264.881	265.946	267.016	268.090	249.264,27
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	14.346	14.404	14.461	14.520	14.578	14.637	14.696	14.755	14.814	14.874	13.829,18
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	64,42	64,68	64,94	65,20	65,46	65,73	65,99	66,26	66,52	66,79	1.863,00
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	870,54	874,04	877,56	881,09	884,63	888,19	891,76	895,35	898,95	902,57	25.175,69

MAGLEV - DEMANDA DE 12 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	54,07	54,88	55,71	56,55	57,40	58,26	59,14	60,03	60,93	61,85	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	216.294	219.548	222.851	226.203	229.606	233.060	236.567	240.125	243.738	247.405	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	12.000	12.181	12.364	12.550	12.739	12.930	13.125	13.322	13.523	13.726	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	5,62	5,71	5,79	5,88	5,97	6,06	6,15	6,24	6,34	6,43	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	54,07	54,89	55,71	56,55	57,40	58,27	59,14	60,03	60,93	61,85	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	62,10	62,35	62,60	62,85	63,10	63,36	63,61	63,87	64,13	64,38	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	248.400	249.399	250.403	251.410	252.421	253.437	254.456	255.480	256.508	257.540	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	13.781	13.837	13.892	13.948	14.004	14.061	14.117	14.174	14.231	14.288	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	6,46	6,48	6,51	6,54	6,56	6,59	6,62	6,64	6,67	6,70	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	62,10	62,35	62,60	62,85	63,11	63,36	63,61	63,87	64,13	64,38	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	64,64	64,90	65,16	65,43	65,69	65,95	66,22	66,49	66,75	67,02	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	258.576	259.616	260.661	261.709	262.762	263.819	264.881	265.946	267.016	268.090	249.264,27
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	14.346	14.404	14.461	14.520	14.578	14.637	14.696	14.755	14.814	14.874	13.829,18
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	6,72	6,75	6,78	6,80	6,83	6,86	6,89	6,91	6,94	6,97	194,43
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	64,64	64,90	65,17	65,43	65,69	65,95	66,22	66,49	66,75	67,02	1.869,48

MONOTRILHO - DEMANDA DE 12 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	54,07	54,88	55,71	56,55	57,40	58,26	59,14	60,03	60,93	61,85	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	216.294	219.548	222.851	226.203	229.606	233.060	236.567	240.125	243.738	247.405	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	12.000	12.181	12.364	12.550	12.739	12.930	13.125	13.322	13.523	13.726	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	159,90	162,30	164,74	167,22	169,74	172,29	174,88	177,52	180,19	182,90	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	2.160,78	2.193,29	2.226,28	2.259,77	2.293,77	2.328,28	2.363,30	2.398,86	2.434,94	2.471,57	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	62,10	62,35	62,60	62,85	63,10	63,36	63,61	63,87	64,13	64,38	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	248.400	249.399	250.403	251.410	252.421	253.437	254.456	255.480	256.508	257.540	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	13.781	13.837	13.892	13.948	14.004	14.061	14.117	14.174	14.231	14.288	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	183,63	184,37	185,11	185,86	186,61	187,36	188,11	188,87	189,63	190,39	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	2.481,52	2.491,50	2.501,52	2.511,59	2.521,69	2.531,84	2.542,02	2.552,25	2.562,52	2.572,83	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	64,64	64,90	65,16	65,43	65,69	65,95	66,22	66,49	66,75	67,02	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	258.576	259.616	260.661	261.709	262.762	263.819	264.881	265.946	267.016	268.090	249.264,27
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	14.346	14.404	14.461	14.520	14.578	14.637	14.696	14.755	14.814	14.874	13.829,18
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	191,16	191,92	192,70	193,47	194,25	195,03	195,82	196,60	197,39	198,19	5.528,14
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	2.583,18	2.593,57	2.604,00	2.614,48	2.625,00	2.635,56	2.646,16	2.656,81	2.667,49	2.678,23	74.704,58

VLT - DEMANDA DE 15 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	67,59	68,61	69,64	70,69	71,75	72,83	73,93	75,04	76,17	77,31	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	270.368	274.435	278.564	282.754	287.008	291.326	295.708	300.157	304.672	309.256	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	15.000	15.226	15.455	15.687	15.923	16.163	16.406	16.653	16.903	17.158	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	67,36	68,37	69,40	70,44	71,50	72,58	73,67	74,78	75,90	77,05	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	910,24	923,93	937,83	951,94	966,26	980,80	995,55	1.010,53	1.025,73	1.041,16	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	77,62	77,94	78,25	78,56	7,88	79,20	79,52	79,84	80,16	80,48	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	310.500	311.749	313.003	314.262	315.527	316.796	318.071	319.350	320.635	321.925	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	17.227	17.296	17.365	17.435	17.505	17.576	17.647	17.718	17.789	17.860	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	77,36	77,67	77,98	78,29	78,61	78,92	79,24	79,56	79,88	80,20	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	1.045,35	1.049,55	1.053,78	1.058,02	1.062,27	1.066,55	1.070,84	1.075,15	1.079,47	1.083,81	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	80,80	81,13	81,46	81,78	82,11	82,44	82,77	83,11	83,44	83,78	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	323.220	324.520	325.826	327.137	328.453	329.774	331.101	332.433	333.770	335.113	311.580,34
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	17.932	18.004	18.077	18.150	18.223	18.296	18.369	18.443	18.518	18.592	17.286,48
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	80,52	80,85	81,17	81,50	81,83	82,16	82,49	82,82	83,15	83,49	2.328,75
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	1.088,17	1.092,55	1.096,95	1.101,36	1.105,79	1.110,24	1.114,71	1.119,19	1.123,69	1.128,21	31.469,61

MAGLEV - DEMANDA DE 15 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	67,59	68,61	69,64	70,69	71,75	72,83	73,93	75,04	76,17	77,31	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	270.368	274.435	278.564	282.754	287.008	291.326	295.708	300.157	304.672	309.256	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	15.000	15.226	15.455	15.687	15.923	16.163	16.406	16.653	16.903	17.158	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	7,03	7,14	7,24	7,35	7,46	7,57	7,69	7,80	7,92	8,04	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	67,59	68,61	69,64	70,69	71,75	72,83	73,93	75,04	76,17	77,31	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	77,62	77,94	78,25	78,56	7,88	79,20	79,52	79,84	80,16	80,48	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	310.500	311.749	313.003	314.262	315.527	316.796	318.071	319.350	320.635	321.925	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	17.227	17.296	17.365	17.435	17.505	17.576	17.647	17.718	17.789	17.860	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	8,07	8,11	8,14	8,17	8,20	8,24	8,27	8,30	8,34	8,37	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	77,62	77,94	78,25	78,57	78,88	79,20	79,52	79,84	80,16	80,48	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	80,80	81,13	81,46	81,78	82,11	82,44	82,77	83,11	83,44	83,78	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	323.220	324.520	325.826	327.137	328.453	329.774	331.101	332.433	333.770	335.113	311.580,34
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	17.932	18.004	18.077	18.150	18.223	18.296	18.369	18.443	18.518	18.592	17.286,48
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	8,40	8,44	8,47	8,51	8,54	8,57	8,61	8,64	8,68	8,71	243,03
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	80,80	81,13	81,46	81,78	82,11	82,44	82,78	83,11	83,44	83,78	2.336,85

MONOTRILHO - DEMANDA DE 15 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	67,59	68,61	69,64	70,69	71,75	72,83	73,93	75,04	76,17	77,31	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	270.368	274.435	278.564	282.754	287.008	291.326	295.708	300.157	304.672	309.256	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	15.000	15.226	15.455	15.687	15.923	16.163	16.406	16.653	16.903	17.158	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	199,87	202,88	205,93	209,03	212,17	215,37	218,61	221,89	225,23	228,62	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	2.700,98	2.741,61	2.782,85	2.824,72	2.867,21	2.910,35	2.954,13	2.998,57	3.043,68	3.089,47	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	77,62	77,94	78,25	78,56	7,88	79,20	79,52	79,84	80,16	80,48	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	310.500	311.749	313.003	314.262	315.527	316.796	318.071	319.350	320.635	321.925	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	17.227	17.296	17.365	17.435	17.505	17.576	17.647	17.718	17.789	17.860	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	229,54	230,46	231,39	232,32	233,26	234,19	235,14	236,08	237,03	237,99	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	3.101,90	3.114,38	3.126,90	3.139,48	3.152,11	3.164,80	3.177,53	3.190,31	3.203,15	3.216,03	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	80,80	81,13	81,46	81,78	82,11	82,44	82,77	83,11	83,44	83,78	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	323.220	324.520	325.826	327.137	328.453	329.774	331.101	332.433	333.770	335.113	311.580,34
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	17.932	18.004	18.077	18.150	18.223	18.296	18.369	18.443	18.518	18.592	17.286,48
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	238,94	239,91	240,87	241,84	242,81	243,79	244,77	245,75	246,74	247,74	6.910,17
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	3.228,97	3.241,96	3.255,00	3.268,10	3.281,25	3.294,45	3.307,70	3.321,01	3.334,37	3.347,78	93.380,72

VLT - DEMANDA DE 18 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	81,11	82,33	83,57	84,83	86,10	87,40	88,71	90,05	91,40	92,78	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	324.441	329.322	334.276	339.305	344.409	349.591	354.850	360.188	365.607	371.107	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	18.000	18.271	18.546	18.825	19.108	19.395	19.687	19.983	20.284	20.589	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	80,83	82,05	83,28	84,53	85,80	87,09	88,40	89,73	91,08	92,46	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	1.092,29	1.108,72	1.125,40	1.142,33	1.159,51	1.176,96	1.194,66	1.212,63	1.230,88	1.249,39	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	93,15	93,52	93,90	94,28	94,66	95,04	95,42	95,80	96,19	96,58	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	372.600	374.099	375.604	377.115	378.632	380.155	381.685	383.220	384.762	386.310	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	20.672	20.755	20.838	20.922	21.007	21.091	21.176	21.261	21.347	21.432	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	92,83	93,20	93,58	93,95	94,33	94,71	95,09	95,47	95,86	96,24	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	1.254,42	1.259,47	1.264,53	1.269,62	1.274,73	1.279,86	1.285,00	1.290,17	1.295,36	1.300,58	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	96,96	97,36	97,75	98,14	98,53	98,93	99,33	99,73	100,13	100,53	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	387.864	389.424	390.991	392.564	394.143	395.729	397.321	398.919	400.524	402.136	373.896,41
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	21.519	21.605	21.692	21.779	21.867	21.955	22.043	22.132	22.221	22.310	20.743,77
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	96,63	97,02	97,41	97,80	98,19	98,59	98,99	99,38	99,78	100,19	2.794,50
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	1.305,81	1.311,06	1.316,34	1.321,63	1.326,95	1.332,29	1.337,65	1.343,03	1.348,43	1.353,86	37.763,54

MAGLEV - DEMANDA DE 18 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	81,11	82,33	83,57	84,83	86,10	87,40	88,71	90,05	91,40	92,78	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	324.441	329.322	334.276	339.305	344.409	349.591	354.850	360.188	365.607	371.107	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	18.000	18.271	18.546	18.825	19.108	19.395	19.687	19.983	20.284	20.589	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	8,44	8,56	8,69	8,82	8,95	9,09	9,23	9,36	9,51	9,65	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	81,11	82,33	83,57	84,83	86,10	87,40	88,71	90,05	91,40	92,78	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	93,15	93,52	93,90	94,28	94,66	95,04	95,42	95,80	96,19	96,58	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	372.600	374.099	375.604	377.115	378.632	380.155	381.685	383.220	384.762	386.310	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	20.672	20.755	20.838	20.922	21.007	21.091	21.176	21.261	21.347	21.432	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	9,69	9,73	9,77	9,80	9,84	9,88	9,92	9,96	10,00	10,04	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	93,15	93,52	93,90	94,28	94,66	95,04	95,42	95,81	96,19	96,58	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	96,96	97,36	97,75	98,14	98,53	98,93	99,33	99,73	100,13	100,53	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	387.864	389.424	390.991	392.564	394.143	395.729	397.321	398.919	400.524	402.136	373.896,41
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	21.519	21.605	21.692	21.779	21.867	21.955	22.043	22.132	22.221	22.310	20.743,77
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	10,08	10,13	10,17	10,21	10,25	10,29	10,33	10,37	10,41	10,46	291,64
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	96,97	97,36	97,75	98,14	98,54	98,93	99,33	99,73	100,13	100,53	2.804,22

MONOTRILHO - DEMANDA DE 18 MIL PASSAGEIROS/HORA/SENTIDO											
ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DEMANDA ANUAL (milhões)	81,11	82,33	83,57	84,83	86,10	87,40	88,71	90,05	91,40	92,78	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	324.441	329.322	334.276	339.305	344.409	349.591	354.850	360.188	365.607	371.107	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	18.000	18.271	18.546	18.825	19.108	19.395	19.687	19.983	20.284	20.589	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	239,85	243,45	247,12	250,83	254,61	258,44	262,33	266,27	270,28	274,34	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	3.241,17	3.289,93	3.339,42	3.389,66	3.440,65	3.492,41	3.544,95	3.598,28	3.652,41	3.707,36	
ANO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
DEMANDA ANUAL (milhões)	93,15	93,52	93,90	94,28	94,66	95,04	95,42	95,80	96,19	96,58	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	372.600	374.099	375.604	377.115	378.632	380.155	381.685	383.220	384.762	386.310	
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	20.672	20.755	20.838	20.922	21.007	21.091	21.176	21.261	21.347	21.432	
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	275,45	276,56	277,67	278,79	279,91	281,03	282,16	283,30	284,44	285,58	
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	3.722,28	3.737,25	3.752,29	3.767,38	3.782,54	3.797,75	3.813,03	3.828,37	3.843,77	3.859,24	
ANO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL
DEMANDA ANUAL (milhões)	96,96	97,36	97,75	98,14	98,53	98,93	99,33	99,73	100,13	100,53	
DEMANDA MÉDIA DIÁRIA	387.864	389.424	390.991	392.564	394.143	395.729	397.321	398.919	400.524	402.136	373.896,41
CARREGAMENTO PICO/HORA.SENTIDO	21.519	21.605	21.692	21.779	21.867	21.955	22.043	22.132	22.221	22.310	20.743,77
EMISSÃO DE CO2 ANUAL (ton.CO2)	286,73	287,89	289,04	290,21	291,37	292,55	293,72	294,91	296,09	297,28	8.292,21
CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (MWh)	3.874,76	3.890,35	3.906,00	3.921,72	3.937,49	3.953,34	3.969,24	3.985,21	4.001,24	4.017,34	112.056,87