



# Proposta de Reconversão de linhas Ferroviárias para Linhas de Levitação Magnética Caso de Estudo Brasil

**NUNO MANUEL VEIGA MONTEIRO**

Junho de 2015



# Proposta de Reconversão de linhas Ferroviárias para Linhas de Levitação Magnética – Caso de Estudo Brasil

---

Nuno Manuel Veiga Monteiro n.º1120956

Junho 2015

Proposta de Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Civil – Ramo Infraestruturas







## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VI
ÍNDICE DE IMAGENS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XVI
GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS	XVII
TERMINOLOGIA	XX
INTRODUÇÃO	1
REFERÊNCIAS HISTÓRICAS	5
SISTEMAS DE CONTACTO RODA-CARRIL	27
SISTEMAS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA	59
TECNOLOGIAS MAGLEV (EMS/EDS/INDUTRACK)	69
NOVO SISTEMA PROPOSTO (EMS – PRO DYNAMIC)	97
CONCLUSÕES	129
BIBLIOGRAFIA	132

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a conclusão desta dissertação a todos aqueles que de alguma forma colaboraram e me apoiaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Ao Eng.º Ângelo Jacob, pela orientação e revisão deste trabalho, pelo incentivo, pelas sugestões e tempo dispensado, pela sua capacidade de instruir, pelo conhecimento transmitido que foi determinante na realização do trabalho.

Ao Eng.º Ricardo Jorge, um grande abraço e profundo agradecimento, pela amizade, pelo apoio e pelo companheirismo durante a realização deste trabalho académico.

Ao Eng.º João Silva pela amizade, dicas e sugestões, pelo conhecimento e apoio.

A equipa Nuno Ferreira Construção e Restauros, a Gisela Marques, Mónica Lopes, Joana Silva, José Mendes e o Joel Moreira, pelo apoio e compreensão.

Ao Nuno Ferreira e Sandra Ferreira, pela oportunidade que me deram, pelo apoio, pelo conhecimento e pela amizade.

A Sónia Abreu pelas palavras de apoio, pelo tempo dispensado e pela amizade.

Ao Fernando Cardoso pela sabedoria, inteligência, partilha de conhecimento e pela amizade.

Aos adarkpalce que sempre me apoiaram de forma incondicional, obrigado; Bruno, Ricardo e Sérgio.

A Ana Pimenta pela companhia, pela sinceridade, pelas suas sugestões e críticas, pelo apoio e amizade.

A minha Filha Magda Monteiro, pelo apoio e compreensão sem ti não seria possível.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, pela força, por acreditarem, pelos conhecimentos.



## **RESUMO**

Trabalho realizado para a disciplina de Dissertação, Projeto ou Estágio do Instituto Superior Técnico de Engenharia do Porto, no ano letivo de 2014/2015, com a proposta de Dissertação no âmbito da transição das convencionais vias de ferrovia para as vias de levitação magnética, como parte dos requisitos à obtenção dos ECTS necessários à classificação final. Propõe-se nesta dissertação a aplicação de um sistema de levitação magnética que resulta da evolução dos sistemas existentes. A proposta exposta é uma melhoria que consiste numa possibilidade teórica de o trilho conseguir através do magnetismo, aplicar uma rotação ao veículo necessária em curva e ajustar essa rotação à velocidade a que se desloca. Para que este sistema funcione sugere-se a introdução de mais um campo magnético no trilho, que tem como função rodar o veículo em curva e substituir a sobrelevação ou escala do convencional trilho. Sugere-se que este sistema seja aplicado no território brasileiro em três fases distintas. Ligando numa primeira fase as três maiores cidades, seguido do litoral e por fim o interior do Brasil. A aplicação deste sistema no Brasil pode apresentar ser a solução ideal, em termos de velocidade e conforto, contudo é um sistema que necessita de estudos mais aprofundados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Levitação, Maglev, Comboio, Alta Velocidade, Eletromagnetismo

## **ABSTRACT**

This work was developed within the discipline of DIPRE, from the Instituto Superior de Engenharia do Porto “ISEP”, in the academic year of 2014/2015, with the proposal of the master's degree dissertation, that aims to carry out the transition of the conventional rail system to a maglev system, as part of the requirements for obtaining the ECTS required for the final classification. It is proposed in this master's degree dissertation, an application of magnetic levitation system that results from the evolution of existing systems. It's exposed an improvement which is a theoretical possibility of the track through a new magnetic field is able to apply necessary rotation to the vehicle on a curve, and adjust its rotation according to the speed that train moves. To make this system work its suggest the introduction of a magnetic field in the rail, whose function is to rotate the vehicle in curves and to replace the conventional rail super elevation of the conventional track.

This system is strongly advised for the line being developed in Brazil. Through chapter 6 we propose that this system may be applied in three distinct phases, through the largest cities, connecting the coast with the inner states of Brazil. The solution proposed is the ideal solution in terms of speed and comfort, though further studies are required.

**KEYWORDS:** Levitation, Maglev, Train, High-Speed Railway, Electromagnetism



## ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	DESCRIÇÃO .....	1
1.2.	OBJETIVOS.....	1
1.3.	METODOLOGIA.....	2
1.4.	ESTRUTURA .....	3
2.	REFERÊNCIAS HISTÓRICAS .....	5
2.1.	BREVES NOTAS.....	5
2.2.	LINHAS CONVENCIONAIS.....	8
2.2.1.	BITOLA .....	9
2.2.2.	CASO DO BRASIL .....	12
2.3.	LINHAS URBANAS .....	17
2.4.	LINHAS DE ALTA VELOCIDADE.....	21
2.5.	LINHAS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA .....	25
3.	SISTEMAS DE CONTACTO RODA-CARRIL.....	27
3.1.	CONTEXTO HISTÓRICO DO SISTEMA RODA-CARRIL .....	27
3.2.	ÁREA DE CONTACTO DO SISTEMA RODA-CARRIL .....	28
3.3.	CONSTITUINTES DO SISTEMA DE CONTACTO RODA-CARRIL .....	38
3.3.1.	BOGIES.....	38
3.3.2.	SISTEMAS DE PENDULAÇÃO .....	42
3.3.3.	A RODA.....	43
3.3.4.	O CARRIL.....	46
3.3.5.	BARRAS LONGAS SOLDADAS (BLS) .....	48
3.3.6.	TRAVESSAS .....	49
3.3.7.	FIXAÇÕES DOS CARRIS .....	52
3.3.8.	BALASTRO E SUB-BALASTRO .....	55

4.	SISTEMAS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA .....	59
4.1.	MAGNETISMO .....	59
4.2.	LEVITAÇÃO MAGNÉTICA .....	60
4.3.	APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA .....	63
4.4.	VANTAGENS DO SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA.....	65
4.5.	PROJETOS PROPOSTOS COM A TECNOLOGIA MAGLEV .....	67
4.5.1.	ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA.....	67
4.5.1.1.	CALIFÓRNIA-NEVADA MAGLEV PROJECT.....	67
4.5.2.	REINO UNIDO .....	68
5.	TECNOLOGIAS MAGLEV (EMS/EDS/INDUTRACK).....	69
5.1.	SISTEMA EMS.....	69
5.2.	SISTEMA EDS .....	73
5.2.1.	OS SUPERCONDUTORES.....	77
5.3.	SISTEMA INDUCTRACK.....	82
5.4.	COMPARATIVO ENTRE AS DIFERENTES TECNOLOGIAS EMS, EDS, INDUCTRACK.....	86
5.5.	EFEITOS SECUNDÁRIOS NOS PASSAGEIROS.....	93
6.	NOVO SISTEMA PROPOSTO (EMS – PRO DYNAMIC).....	97
6.1.	ENQUADRAMENTO .....	97
6.2.	SISTEMAS PROPOSTOS .....	102
6.2.1.	SISTEMA 1 .....	102
6.2.1.1.	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TRILHO E DO VEÍCULO .....	104
6.2.1.2.	TRAÇADO EM CURVA .....	107
6.2.2.	SISTEMA 2 .....	114
6.2.2.1.	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TRILHO E DO VEÍCULO .....	115
6.2.2.2.	TRAÇADO EM CURVA .....	118
6.3.	PROPOSTA DE CONVERSÃO DOS CAMINHOS-DE-FERRO – CASO DE ESTUDO BRASIL	120

6.4.	ANÁLISE DOS TRAÇADOS – CASO PRÁTICO DO BRASIL.....	124
7.	CONCLUSÕES.....	129
7.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	129
7.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	131
8.	BIBLIOGRAFIA .....	132

## ÍNDICE DE IMAGENS

Imagem 1 – <i>Catch Me Who Can</i> na <i>Euston Square</i> em Londres [3].....	6
Imagem 2 – Réplica da locomotiva de Trevithick [4] .....	6
Imagem 3 - George Stephenson.....	7
Imagem 4 - <i>Locomotion n<sup>o</sup>1 “The Rocket”</i> [1] .....	8
Imagem 5 – Bitola .....	10
Imagem 6 – Mapa representativo das diferentes bitolas existentes na Europa[6].....	11
Imagem 7 - Locomotiva “ Baroneza”[8] .....	12
Imagem 8 – Mapa das linhas de caminho de ferro existentes em 1895 [10][9] .....	16
Imagem 9 - A primeira linha ferroviária do metropolitano de Londres, <i>London Underground</i> , entre <i>Panddington</i> e <i>Farringdon (Underground 1863)</i> .....	18
Imagem 10 – Elétrico do Porto.....	19
Imagem 11 – Comboio da JP <i>Shinkansen S-0</i> .....	22
Imagem 12- Comboio da JR <i>Shinkansen E5</i> .....	23
Imagem 13 - ROMAG Maglev [14] .....	26
Imagem 14 – Conicidade da roda e tombo do carril.....	28
Imagem 15 – Área de contacto roda-carril [17] .....	29
Imagem 16 - Esquema das posições de contacto roda-carril [18]: a) perfil cónico da roda; b) Tombo do carril; c) zona de contacto entre a roda e a cabeça do carril, d) Verdugo ou flange.....	30
Imagem 17 – Atrito no sistema roda-carril [17] .....	30
Imagem 18 - Contacto ideal no sistema de contacto roda-carril [19] .....	32
Imagem 19 – Sistema de injeção de areia [19] .....	33

Imagem 20 - Raios de rodagem ( $r_1$ e $r_2$ ) correspondente ao eixo e às suas rodas cónicas [20].....	34
Imagem 21 – Graus de liberdade do sistema roda-carril .....	35
Imagem 22 – Algumas soluções para resolver o problema dos deslocamentos verticais [19] .....	36
Imagem 23 – Bogie das séries 350 da Talgo [21] .....	36
Imagem 24 – Bogie em planta das séries 350 da Talgo [21] .....	37
Imagem 25 – Tipo de guiamento dos bogies [22] .....	38
Imagem 26 – Número de eixos [22] [23] .....	39
Imagem 27 – Bogie com 3 eixos [22] .....	40
Imagem 28 – Bogie articulado [24] .....	41
Imagem 29 – Bogie convencional [24] .....	41
Imagem 30 – Níveis de suspensão do bogie [23][22].....	42
Imagem 31 – Tipos de pendulação [22].....	43
Imagem 32 – Tela de rodas monobloco [19] .....	44
Imagem 33 – Tela de rodas com aro [19] .....	44
Imagem 34 – Tela de roda com aro contendo uma camada de borracha [19] .....	44
Imagem 35 – Perfis comuns das rodas: a) usual em transporte de passageiros e mercadorias (Rússia); b) para linhas de alta velocidade (Rússia); c) usual em transportes industriais (Rússia); d) usual em transporte de mercadorias e passageiros na Europa; e); f) para linhas de alta velocidade japonesas [19].....	45
Imagem 36 – Comparativo entre o carril UIC 54 e o UIC 60 [26] .....	46
Imagem 37 – Carril com gola [27].....	48
Imagem 38 – Juntas nos carris com as respetivas junções [25].....	49
Imagem 39 – Linha ferroviária com travessas de madeira.....	50

Imagem 40 – Linha ferroviária com travessas metálicas em Y [28].....	50
Imagem 41 – Travessas de betão armado monobloco [28] .....	51
Imagem 42 – Travessas de betão bibloco [28].....	52
Imagem 43 – Travessa de madeira com chapin [29] .....	53
Imagem 44 – Travessa em betão com fixação PRX [28] .....	53
Imagem 45 – Corte transversal de uma via ferroviária balastrada [30].....	56
Imagem 46 - Corte transversal de um via ferroviário com o balastro contaminado com solo [30] .....	56
Imagem 47 – Imagem da patente de Emile Bachelet [35] .....	60
Imagem 48 – Construção da infraestrutura do Transrapid em Shanghai [37] .....	61
Imagem 49 – Sistema Maglev urbano Linimo [38].....	62
Imagem 50 – Lançamento de aeronaves da NASA [32] .....	64
Imagem 51 – Esquema de movimentação de um elevador de levitação magnética [39] .....	65
Imagem 52 – Traçado do projeto Califórnia-Nevada [44] .....	68
Imagem 53 – Linha de Londres-Glasgow [45].....	68
Imagem 54 – Tecnologia EMS utilizada no Transrapid.....	69
Imagem 55 – Princípio da Levitação EMS [40] .....	70
Imagem 56- Sistema EMS utilizado no Transrapid [48] .....	71
Imagem 57 – Esquema de um motor linear derivado de um motor rotativo [49] .....	72
Imagem 58 – Secções do motor Linear na via [51].....	73
Imagem 59 – Esquema do bogie do MXL01 [52] .....	74
Imagem 60 – Tecnologia EDS usada no JR-Maglev MLX01 Sistema Japonês.....	74
Imagem 61 – Exemplo da bobine em “8”[53][49].....	75
Imagem 62 – Esquema do trilho utilizado no JR-Maglev MLX01 [53][49][55].....	76

Imagem 63 – Esquema de funcionamento do Sistema EDS e como se processa a mudança de polaridade[56] .....	76
Imagem 64 - Efeito Meissner [57] .....	77
Imagem 65 – SCM “ <i>Super Conducting Magnet</i> ” existente na lateral do veículo [49] .....	79
Imagem 66 – Elementos constituintes do SCM[49] .....	79
Imagem 67 – Linha de teste de Yamanashi [60].....	80
Imagem 68 – Bobinas do veículo MLX01 e do respectivo trilho[49].....	81
Imagem 69 – Guiamento do veículo MXL01 ao longo do trilho [61] .....	82
Imagem 70 – Esquema do campo magnético formado pelo Halbach Array (Arranjo Halbach) [63].....	83
Imagem 71 – Veículo experimental Inductrack [64] .....	84
Imagem 72 – Esquema representativo de um veículo com o sistema Inductrack [63] .....	85
Imagem 73 – Comparativo entre os Sistemas de levitação Magnética [66] .....	86
Imagem 74 – Comparativo de distância entre o SCMAGLEV e o Transrapid. [67] .....	90
Imagem 75 - Performance de velocidade e aceleração [67] .....	92
Imagem 76 – Veículo experimental Inductrack da General Atomics [68] .....	93
Imagem 77 – Comparação entre campos magnéticos em $\mu$ Tesla[70].....	95
Imagem 78 – Esquema de rotação do veículo induzida por um campo magnético.....	98
Imagem 79 – Esquema longitudinal do trilho e o campo magnético induzido, para gerar a rotação.....	99
Imagem 80 – Sistema 1 alternativo de levitação magnética proposto.....	100
Imagem 81 – Sistema 2 alternativo de levitação magnética .....	100
Imagem 82 – Sistema 1 e sistema 2 .....	101
Imagem 83 – Sistema 1 proposto.....	103
Imagem 84 – Comparação entre o sistema 1 proposto e o sistema Transrapid .....	104

Imagem 85 - Trilho a usar no sistema 1 proposto .....	104
Imagem 86 - Secção transversal do trilho do sistema 1 proposto.....	105
Imagem 87 - Perspectiva transversal do veículo do sistema 1.....	106
Imagem 88 - Perspectiva longitudinal do veículo do sistema 1.....	107
Imagem 89 - Rotação do veículo no sistema 1 proposto .....	107
Imagem 90 - Esquema das forças atuantes no veículo.....	109
Imagem 91 - Aceleração compensada para uma velocidade de 450 km/h com 12° de inclinação e diversos raios em curva .....	111
Imagem 92 - Inclinações possíveis para as velocidades operacionais considerando um raio constante de 4400m .....	112
Imagem 93 - Secção transversal do veículo em curva .....	112
Imagem 94 - Vista 3D do veículo em curva 4400 m.....	113
Imagem 95 - Sistema 2 proposto .....	114
Imagem 96 - Comparação entre o sistema 2 proposto e o sistema SCMaglev .....	115
Imagem 97 - Trilho a usar no sistema 2 proposto.....	115
Imagem 98 - Secção transversal do trilho do sistema 2 proposto.....	116
Imagem 99 - Perspectiva transversal do veículo do sistema 2 .....	117
Imagem 100 - Perspectiva longitudinal do veículo do sistema 2.....	117
Imagem 101 - Rotação do veículo no sistema 2 proposto .....	118
Imagem 102 - Corte transversal do veículo numa curva de 4400 m.....	119
Imagem 103 - Comparação de meios de transporte tendo em conta o fator económico...120	
Imagem 104 - Número de passageiros utilizadores do TGV desde 1985 até 2007 a utilizarem o TGV[72].....	121
Imagem 105 - Evolução das linhas de TGV em km no território francês[72].....	121

Imagem 106 – Utilizadores de linhas de alta velocidade AVE versus Aviação na ligação Madrid – Barcelona [72].....	122
Imagem 107 – Estudo realizado na Austrália em 1995 para linhas de alta velocidade de caminho de ferro[73].....	123
Imagem 108 - Estudo realizado na Austrália em 2011 para linhas de alta velocidade na ferrovia[73].....	123
Imagem 109 – Traçado das fases propostas .....	125
Imagem 110 – Estações do traçado da primeira fase.....	127
Imagem 111 - Perfil de velocidade do Transrapid de Xangai [51] .....	128

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Algumas bitolas em uso no mundo .....	11
Tabela 2- linhas de caminho de ferro existentes no Brasil até 1884 [7].....	13
Tabela 3 – Eventos de interesse entre 1922e 1954[7] .....	13
Tabela 4 – as diferentes concessionárias que precederam à RFFSA .....	14
Tabela 5 – Evolução tecnológica das linhas de alta velocidade no mundo [13] .....	24
Tabela 6 - Alguns coeficientes de atrito existentes [18] .....	32
Tabela 7 – Coeficientes de atrito que dependem das condições do carril [18] .....	33
Tabela 8 – Relação dos incidentes estudados [19] .....	37
Tabela 9 – Tabela das propriedades do carril UIC 54 e do carril UIC 60.....	47
Tabela 10 – Exemplo de fixações [28] .....	54
Tabela 11 – Comparativo de características entre o sistema EDS e o sistema EMS [56] ..	91
Tabela 12 – Comparativo técnico entre Sistema EMS, EDS e Inductrack.....	92
Tabela 16 – Distância e duração prevista das viagens entre as estações propostas.....	126
Tabela 17 – Duração e distância das viagens entre Rio de Janeiro; São Paulo e Brasília	126

## Glossário de termos técnicos

**Alta velocidade** - Comboios que circulam a mais de 220 Km/h.

**Aparelhos de via** - Agulhas, secção especial de via, permitem mudança de via.

**Bitola** - Distância medida entre o lado interior dos carris.

**Bitola internacional** - Bitola uniformizada universal de 1.435 mm.

**Bogie** - Estrutura mecânica constituída por 2 ou 3 eixos e por um sistema de amortecimento que liga a caixa ao carril.

**Caminhos de ferro** - Ferrovias, circulação sobre carris.

**Catenárias** - Condutores de eletricidade colocados superiormente ao eixo da via, destinados a fornecer energia de tração.

**Carril** - Barra de aço sobre a qual circulam veículos ferroviários.

**Comboios pendulares** - Comboios com suspensão ativa que permite circular em maiores velocidades em curvas.

**Composição** - Conjunto de veículos do comboio.

**Conicidade** - Diferença que corresponde entre os diâmetros dos círculos de rolamento das rodas para um determinado deslocamento transversal do rodado.

**Contexto operacional** - Condições de operacionalidade a ter em conta em projetos ou opções de aquisição.

**Cróssimas** - Componente interior do aparelho de via.

**Draisine** - Veículo ferroviário ligeiro polivalente de manutenção.

**Electrificação** - Conversão duma via-férrea para tração eléctrica.

**Escala** - Diferença entre alturas dos carris em curva.

**Espaço canal** - Espaço de horário entre comboios.

**Fila alta** - Carril localizado do lado de fora numa curva.

**Fila baixa** - Carril localizado do lado de dentro numa curva.

**Flange** - Verdugo, flange da roda, rebordo.

**Gabarit** - Cércea de carga nos caminhos de ferro que delimita a altura e largura máxima de carregamento.

**George Stephenson** - Engenheiro dos caminhos de ferro que estabeleceu algumas soluções técnicas no século XIX e que ainda hoje prevalecem.

**Lacete** - Ação lateral exercida sobre a via pelos rodados do comboio e materializada, para efeitos de cálculo, por uma força atuando em direção transversal ao eixo da via e ao nível da cabeça do carril.

**Lanças móveis** - Partes móveis do aparelho de mudança de via.

**Locomotiva** - Veículo destinado a puxar ou empurrar composições ferroviárias.

**Mesa de rolamento** - Superfície superior da cabeça do carril onde circulam as rodas.

**Mitigação** - Atenuação do efeito das alterações climáticas.

**Obras de arte** - Pontes e túneis.

**Pantógrafo** - Dispositivo colocado no tejadilho dos comboios parados ou em andamento que se destina a captar a energia disponível da catenária.

**Peso aderente** - Peso total descarregado pelos eixos motores.

**Samuel Earnshaw** - Cientista e homem do clero.

**Shinkansen** - Comboio de alta velocidade japonês.

**Terceiro carril** - Carril apenas destinado a fornecer energia de tração ao comboio, em alternativa às catenárias.

**Tirafundos** - Aportuguesamento do termo francês "tirefond". Parafuso especial para madeira, destinado a fixar o carril às travessas e também fixar as cunhas ou os cochins, entre outros.

**Tombo do carril** - Ligeira inclinação do eixo vertical do carril para o interior da via, a fim de garantir uma perfeita adaptação da face superior da cabeça (mesa de rolamento) ao aro dos rodados dos veículos, compensando a elasticidade da alma que, sob o efeito das cargas, se deforma. Em Portugal, esta inclinação é de 1:20 nas vias renovadas e de 1:15 nas vias clássicas não renovadas.

**Traçado** - Desenho de implantação da via-férrea na envolvente.

**Travessa** - Chulipa ou prancha grossa em que assentam os carris do caminho de ferro.

**Tribologia** - Ciência dos atritos que estuda a interação de superfícies em movimento, relativo a assuntos e práticas relacionadas.

**Vagonetas** - Pequenos vagões tremonha usados em minas.

**Verdugo** - Flange, rebordo da roda que efetua o guiamento do comboio.

## **Terminologia**

ATM - Azienda Transporti Milanesispa

AVE - Alta Velocidade Espanhola

BR – British Railways

CP - Comboios de Portugal

FRA- Federal Railroad Administration

DB – Deutsche Bahn

ITV - Instrução Técnica de Via (REFER)

MIT- Massachusetts Institute of Technology

ML - Metropolitano de Lisboa

RAVE - Rede de Alta Velocidade Portuguesa

REFER - Organismo gestor das infraestruturas de caminho de ferro em Portugal

SEV - Secção Especial de Via

SNCF - Société Nationale des Chemins de fer Français

TGD - SEV de tangente dupla

TGS - SEV de tangente simples

TGV - Comboio de Alta Velocidade

UIC - União Internacional dos Caminhos de Ferro

UITP - União Internacional dos Transportes Públicos

RFBSA - Rede Ferroviária Federal S.A - Brasil

HSR – High Speed Rail

## **1. Introdução**

### **1.1. Descrição**

A levitação magnética representa a primeira grande revolução avançada de propulsão desde da criação do motor de combustão interna, este sistema oferece a possibilidade de viajar mais rápido, de forma mais económica e mais segura. O mundo está atualmente em mudança, surgem já os primeiros veículos elétricos, e com estes veículos surgem também novas formas de abordar os transportes, não só para os rodoviários, mas também os ferroviários. A ferrovia é um sistema conhecido e tem evoluído consideravelmente, mas possui limitações e desvantagens tais como a falta de atrito intrínseco do sistema de contacto roda-carril. O sistema de levitação magnética tem potencial para transformar e dar ao transporte ferroviário uma nova dinâmica evoluindo noutra dimensão as linhas de alta velocidade, encurtando as distâncias e sendo o sistema capaz de competir com o transporte aéreo.

### **1.2. Objetivos**

A primeira linha de levitação comercial magnética foi implementada há pouco tempo em Xangai com o sistema Alemão do Transrapid, o governo Japonês planeia ter a sua linha de levitação magnética operacional em 2027, aproximadamente. Além destes projetos já em curso existem também planos para diversos países. O âmbito deste trabalho consiste numa abordagem hipotética dos sistemas de levitação magnética, em que esta pode ser traduzida pela possibilidade teórica do veículo rodar sobre si próprio em curva, não havendo assim a

necessidade de aplicar um escala ao trilho em curva. Apresenta-se neste trabalho dois sistemas distintos, que garantem uma maior produtividade e têm o objetivo de tornar mais rápida e célere a aplicação dos trilhos em curva. A aplicação em curva é igual a aplicação do sistema em linha reta. A única diferença é que em curva passa a existir um novo campo magnético que induz a rotação do veículo. A rotação é realizada pelo trilho que faz rodar o veículo em curva no ângulo em função da velocidade que o veículo se desloca, assim consegue-se uma melhor relação entre velocidade, rotação e conforto dos passageiros. Pretende-se aplicar este novo sistema ao território Brasileiro em 3 fases distintas, onde numa primeira fase se vão ligar Rio Janeiro, São Paulo e Brasília, considerando outras cidades ao longo do trajeto, num total de 11 estações e com uma extensão de cerca de 1500 km. Seguem-se as outras duas fases, uma segunda que ligará o litoral brasileiro e uma terceira que ligará o litoral ao interior.

### **1.3. Metodologia**

O presente trabalho focou-se na aquisição de conhecimentos com base na pesquisa e a descrição dos mesmos no âmbito da ferrovia desde a criação da primeira locomotiva até aos nossos dias, tendo em vista todos os tipos de linhas existentes, as suas variações, os seus elementos e as suas características que são inerentes às linhas de caminho de ferro. Nesta metodologia estão incluídas as linhas de levitação magnética, a sua história e o desenvolvimento deste sistema desde a sua descoberta até à sua aplicação nas linhas ferroviárias. Para se conseguir alcançar os objetivos pretendidos foi necessário uma triagem exaustiva das fontes bibliográficas existentes devido à escassez de informação relativo a alguns sistemas de levitação magnética que ainda se encontram em fase de

desenvolvimento. Os modelos 3D dos sistemas apresentados nesta dissertação foram concebidos no software Revit da Autodesk. Neste Software foram criados os trilhos para os dois sistemas a propor, para tal, partiu-se de um modelo existente que se adaptou para o sistema a apresentar. Foram realizados diversos esboços no software e ajustes para estabelecer uma boa relação trilho veículo e a sua rotação ideal. Também foram realizados cálculos para o conforto dos passageiros, utilizando o Microsoft Excel, tendo em vista a velocidade operacional dos dois sistemas, os raios mínimos em curva e a compatibilidade dos sistemas e suas carruagens em curva. Na aplicação dos sistemas no caso de estudo Brasil, verificou-se quais eram as cidades com maior número de habitantes, de forma garantir uma estação nas cidades com maior densidade populacional. A duração das viagens e a velocidade operacional dos sistemas a propor basearam-se nos resultados já existentes da linha do Transrapid existente em Xangai.

#### **1.4. Estrutura**

O trabalho encontra-se estruturalmente dividido em oito capítulos. O primeiro capítulo a introdução aborda a descrição, os objectivos, a metodologia assim como a estrutura do trabalho. No segundo capítulo é representada a história das linhas de caminho de ferro desde a sua criação até aos nossos dias, fazendo referência aos sistemas de levitação magnética. O terceiro capítulo é caracterizado pelo sistema de contacto roda carril, onde são expostas as fragilidades deste sistema, assim como os seus elementos constituintes como a roda, o carril, os bogies, as barras, as travessas, as fixações dos carris, o balastro e o sub-balastro. No quarto capítulo expõe-se o magnetismo desde a sua descoberta e as suas diversas aplicações são também referidos neste capítulo projetos onde estão planeados

a aplicação da tecnologia Maglev no Reino Unido e nos Estados Unidos da América. No quinto capítulo são descritas as diferentes tecnologias Maglev existentes atualmente no mundo, nomeadamente o Transrapid como sistema EMS alemão, SCMaglev Japonês como o sistema EDS e o sistema Inductrack dos Estados Unidos da América, as suas características e as devidas comparações entre cada um sistema. No capítulo seis descreve-se os dois sistemas de levitação magnética propostos, que consistem na capacidade de os veículos rodarem sobre si próprios, sendo assim desnecessária a existência de escala no trilho. Neste capítulo descreve-se também as características do trilho e do veículo, assim como a verificação do traçado em curva, a inclinação máxima possível para cada sistema e o raio mínimo em curva a implementar de forma a garantir o conforto dos passageiros devido à força centrífuga. No capítulo sete são referidos os casos de sucesso que as linhas de alta velocidade ferroviárias têm obtido no território francês e espanhol. São também descritos os traçados a implementar no território brasileiro, divididos em 3 fases distintas. Neste presente trabalho refere-se especificamente à primeira fase que é caracterizada pela ligação entre o Rio de Janeiro, passando pela cidade de São Paulo até à cidade de Brasília, fazendo paragens em outras cidades perfazendo um total de 11 estações tendo uma extensão de 1513 km aproximadamente. No capítulo oito estão presentes as conclusões que vêm reforçar a ideia do que foi desenvolvido ao longo deste trabalho, comprovando a eficácia dos sistemas de levitação magnética face aos sistemas de alta velocidade ferroviários existentes e podendo em alguns percursos ser ainda mais eficazes do que a própria aviação, além disso está presente nas conclusões os possíveis desenvolvimentos dos sistemas apresentados neste trabalho.

## **2. Referências históricas**

### **2.1. Breves notas**

Os primeiros trilhos a serem criados eram rudimentares e remontam ao início do século XVIII, onde as primeiras carruagens eram puxadas por cavalos. Com a revolução industrial, o desenvolvimento dos caminhos de ferro sofreu uma transformação profunda. Pode afirmar-se que o aparecimento da máquina a vapor esteve na génese da ferrovia existente no mundo atual, permitindo, assim, que o trilho rudimentar puxado a cavalos evoluísse. Contribuiu também para um crescimento exponencial em todo o planeta, primeiro no Reino Unido depois em alguns países da Europa Central, seguindo-se os Estados Unidos da América e Canadá, sendo depois usado por outros países como a forma mais utilizada de transporte terrestre de pessoas e mercadorias.

Hoje em dia existem sistemas ferroviários que conseguem atingir velocidades superiores a 400 km/h, sendo sistemas que evoluíram a partir da convencional linha ferroviária e tendo sofrido algumas adaptações consideráveis para conseguir viajar a altas velocidades.

Os caminhos de ferro foram também um dos grandes catalisadores das diversas disciplinas da Engenharia Civil, pois devido à existência de obstáculos naturais geológicos e outros, obrigou ao desenvolvimento de pontes, túneis e outras infraestruturas. Ajudou também ao crescimento das cidades e ao seu desenvolvimento já que se encontravam ligadas por um meio de transporte mais eficiente.

Como já se afirmou, os caminhos de ferro sofreram uma grande evolução desde a sua criação até aos dias atuais. A primeira máquina a vapor deu origem à revolução industrial devido à patente do James Watt e com ela assistiu-se ao aumento demográfico das cidades industrializadas. A primeira locomotiva a vapor foi inventada pelo engenheiro de minas

britânico Richard Trevithick que a apresentou ao público na *Euston Square* em Londres em 1808 numa pista circular visível na imagem 1. Cobrava ao público por uma volta na carruagem puxada pela sua locomotiva a vapor chamada *Catch Me Who Can*, mas o carril partiu com o peso da locomotiva. [1] [2]

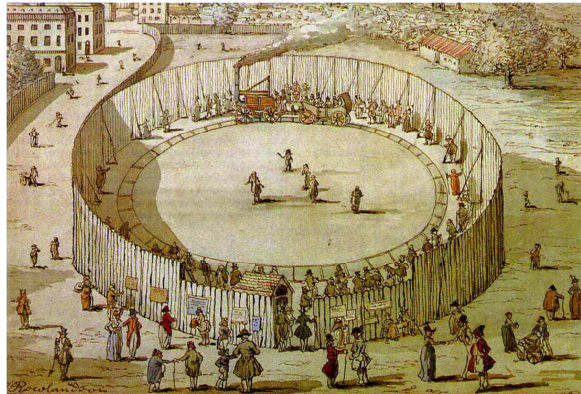


Imagem 1 – *Catch Me Who Can* na *Euston Square* em Londres [3]

Na imagem 2 demonstra-se uma réplica da locomotiva do Richard Trevithick, que foi construída pela, “THE TREVITHICK 200 CHARiTY,” em 2008 por um grupo de pessoas em Inglaterra, e já esteve em exposições em vários países.



Imagem 2 – Réplica da locomotiva de Trevithick [4]

Em 1814, George Stephenson era o mecânico chefe de uma mina de carvão onde construiu a sua primeira locomotiva a vapor chamada *Blucher* que puxava carruagens de transporte de carvão para fora da mina. Nos anos seguintes, ele construiu locomotivas para outras minas. Em 1822, foi contratado como engenheiro pela *Stockton & Darlington Railway*, a primeira empresa de caminhos de ferro a ser criada e que construiu as primeiras linhas ferroviárias, que transportava mercadorias e pessoas, com horários regulares.



Imagem 3 - George Stephenson

George Stephenson construiu também a *Locomotion n<sup>o</sup>1*, também conhecida por *The Rocket*. Foi a primeira locomotiva com caldeira tubular e com um sistema próprio de transporte de passageiros denominado de *experiment*. A *Locomotion n<sup>o</sup>1* era composta por uma caldeira cilíndrica, 4 rodas e pesava cerca de 10 toneladas. Conseguia transportar ou puxar cargas com um peso compreendido entre 55 e 75 toneladas a uma velocidade de 5 mph (aproximadamente 8 km/h), e a uma velocidade máxima de 10 mph (aproximadamente 16 Km/h). Na imagem seguinte mostra-se a uma fotografia da *Locomotion n.º 1*. [2]

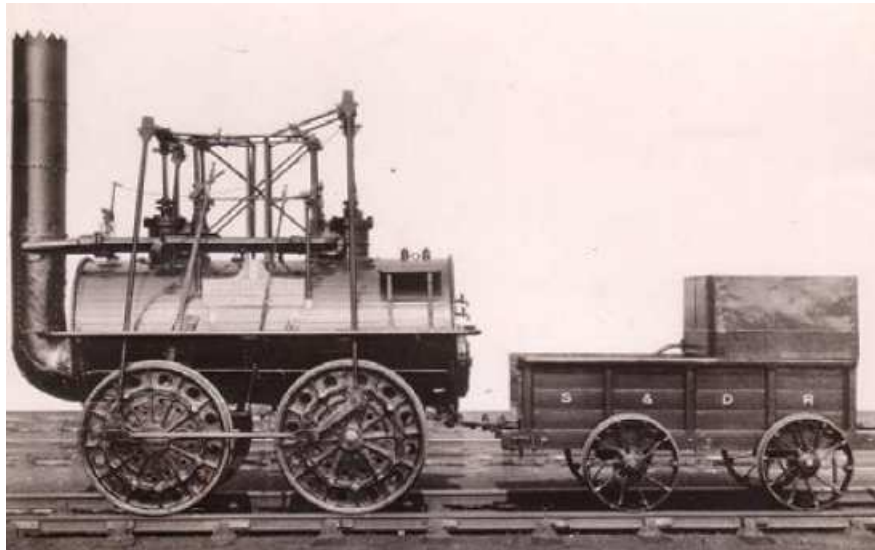


Imagem 4 - Locomotion n<sup>o</sup>1 “The Rocket” [1]

Estava assim criado um novo meio de transportes como uma taxa de crescimento excepcional que se alastrou por todo o mundo.

## 2.2. Linhas convencionais

Após a criação das primeiras linhas de caminhos de ferro de passageiros e mercadorias na Inglaterra pelas empresas *Stockton Darlington Railway* em 1825 e a *Liverpool-Manchester Railway* em 1825, seguiu-se a Bélgica que criou uma linha de caminhos de ferro entre Mechelen e Bruxelas. Salienta-se que este país, em pouco tempo, foi rápido ao criar uma ligação ferroviária com a Alemanha. A primeira linha de caminhos de ferro na Holanda surgiu muito depois em 1839 e foi vista como um meio de transporte rival ao transporte fluvial interior existente.[5]

Assim nasce uma nova tendência nos transportes que rapidamente cresce por todo o planeta. Países como o Canadá e os Estados Unidos da América são agora ligados pelas

vias férreas, permitindo o seu desenvolvimento económico, político e social a uma escala nunca antes vista. Mais tarde, países como a Rússia e a China são ligados por comboios tendo ainda atualmente uma função muito importante na área dos transportes.

As primeiras empresas de caminhos de ferro criadas eram as maiores empregadoras, constituindo portanto umas das primeiras empresas a desenvolver de forma organizada o planeamento, o controlo e a monitorização.

A locomotiva a vapor sofreu diversas alterações no sentido de aumentar a sua eficiência, conseguindo sempre velocidades maiores encurtando o tempo das viagens. O desenvolvimento das linhas de caminhos de ferro levou a que fossem criadas também um conjunto de normas que visam o bom funcionamento, a segurança e a manutenção das mesmas.

### **2.2.1. Bitola**

Com a diversificação de sistemas de caminhos de ferro, passou a existir um conjunto de regras variadas, pois cada país ou cada companhia ferroviária possuía a sua tecnologia e a sua forma de construir as linhas ferroviárias. Além disso, como se vivia na Europa um forte nacionalismo e existia o receio de invasões pelas forças militares de países vizinhos, como já tinha acontecido com as invasões napoleónicas, essa diversificação de regras é mais visível quando se refere à bitola<sup>1</sup>. Na imagem 5 pode-se verificar uma representação da bitola.

---

<sup>1</sup> A bitola é a distância medida pelo interior entre as cabeças dos carris em mm.

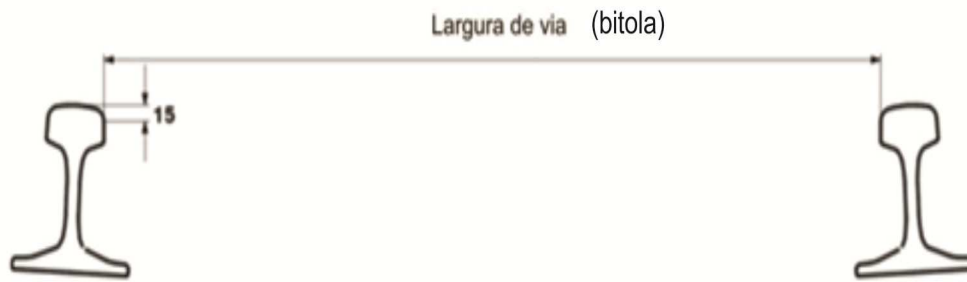


Imagem 5 – Bitola

A bitola utilizada na primeira linha de caminho de ferro media 1435 mm (4 pés e 8 ½ polegadas), e foi adotada por George Stephenson na linha principal entre *Liverpool* e *Manchester*. Países como a França, Alemanha e os Estados Unidos adotaram esta medida de bitola. Contudo, no Reino Unido existiam inicialmente 3 tipos de bitolas diferentes. A bitola proposta por Isambard Kingdom Brunel, engenheiro da ferrovia do ocidente, era de 2140mm e a bitola da ferrovia dos municípios orientais de 1524mm. Tendo-se verificado uma falta de compatibilidade, em 1845 o Reino Unido da Inglaterra recomendou o uso da bitola de 1435mm como modelo.

Países como Portugal e Espanha adotaram a bitola ibérica com 1668 mm. Esta bitola foi criada como o intuito de impedir uma possível invasão francesa, dificultando assim a progressão de tropas dentro do território Ibérico utilizando o meio ferroviário. Atualmente, a existência da bitola ibérica constitui um obstáculo na ligação ferroviária entre a Península Ibérica e o resto da Europa. Na imagem 6 representa-se algumas das bitolas existentes na Europa.

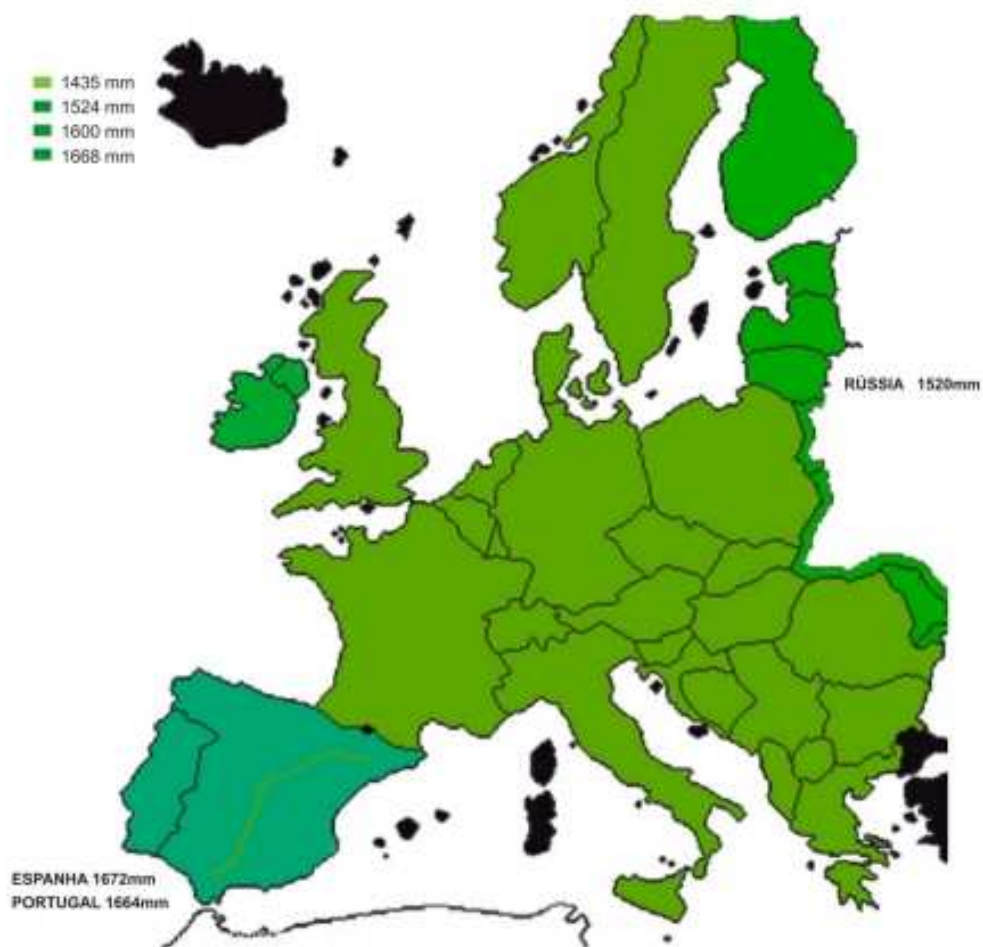


Imagem 6 – Mapa representativo das diferentes bitolas existentes na Europa[6]

Na tabela 1 demonstram-se algumas bitolas usadas no mundo, as suas respectivas larguras em mm e se são bitolas largas ou estreitas. Apenas estão apresentadas as mais relevantes.

Tabela 1 - Algumas bitolas em uso no mundo

Bitolas		LARGURA (mm)	PAÍSES
Bitola Larga	UIC (Bitola Europeia)	1435	mais comuns
	Bitola Ibérica	1668	Portugal e Espanha
	Bitola Russa	1520	Rússia
	Bitola Irlandesa	1600	Irlanda
	Bitola Indiana	1676	Índia
Bitola Estreita	Bitola Escocesa	1372	Escócia
	Bitola Métrica	1000	Vários Países (inclusive Portugal)

## 2.2.2. Caso do Brasil

Como uma parte deste estudo incide no território brasileiro refere-se algum contexto histórico. No Brasil a primeira linha de caminho de ferro foi inaugurada no dia 30 de abril de 1854 por D. Pedro II, esta linha possuía 14,5 km e uma bitola de 1680 mm e foi apelidada de “ A Estrada de Ferro Mauá”, operada pela a empresa ” Imperial Companhia de Navegação a Vapor e Estrada de Ferro de Petrópolis”. A primeira locomotiva ao serviço desta companhia chamava-se “Baroneza” que está representada na imagem 7.[7]



Imagem 7 - Locomotiva “ Baroneza”[8]

A segunda linha de caminhos de ferro a ser inaugurado foi a do Recife-São Francisco, no dia 8 de fevereiro de 1858. Seguiu-se a Companhia de Estrada de Ferro de D. Pedro II, que foi inaugurada em 29 de Março de 1858 com um extensão de 47,21 km, este linha foi uma das mais relevantes obras de engenharia ferroviária do país. A linha de caminhos de ferro que ligou o Rio de Janeiro a São Paulo foi concluída em 8 de Julho de 1877. Estas

linhas foram resultado de uma política de incentivos implementada pelo Governo Imperial que originaram algumas consequências negativas que ainda hoje existem tais como a diversidade de bitolas, traçados sinuosos e linhas de caminho de ferro localizadas de forma pouco racional. Na tabela 2 demonstram-se algumas das linhas que se sucederam por ordem cronológica até 1884.[7]

Tabela 2- linhas de caminho de ferro existentes no Brasil até 1884 [7]

Linhas de caminho de ferro	Data de Inauguração
Recife ao São Francisco	08/02/1858
D. Pedro II	29/03/1858
Bahia ao São Francisco	28/06/1860
Santos a Jundiaí	16/02/1867
Companhia Paulista	11/08/1872
Companhia Mogiana	03/05/1875
Companhia Sorocabana	04/09/1884
Central da Bahia	10/07/1875
Santo Amaro	02/02/1876
Paranaguá a Curitiba	19/12/1883
Porto Alegre a Novo Hamburgo	14/04/1884
Dona Tereza Cristina	04/09/1884

Em 1922 existiam no Brasil cerca de 29.000km de linhas de caminho de ferro e referem-se agora algumas datas com maior importância na tabela 3 entre 1922 e 1954[7]

Tabela 3 – Eventos de interesse entre 1922e 1954[7]

Acontecimentos de interesse	Ano
Introdução da tração elétrica, para substituir, em determinados, troços a tração a vapor	1930
Início da substituição da tração a vapor pela tração a diesel e elétrica. Este processo interrompido durante a Segunda Guerra Mundial, foi intensificado em 1950.	1939
Em 1942 foi criada a Companhia Vale do Rio Doce. Esta ferrovia foi então modernizada com o objetivo de suportar o tráfego pesado dos comboios que transportavam minério de ferro entre as jazidas de Itabira, em Minas Gerais, e o Porto de Vitória, no Espírito Santo.	1942

Algumas linhas foram desativadas ao longo dos anos e em 1950 o Governo Federal unificou as linhas de caminho de ferro e assim foi criada em 16 de Março de 1957 a Rede Ferroviária Federal S.A- RFFSA. Em 1969 as ferrovias que faziam parte constituinte da RFFSA estavam agrupadas em quatro sistemas regionais, Sistema Regional Nordeste com sede no Recife, Sistema Regional Centro com sede no Rio de Janeiro, Sistema Regional Centro-Sul com sede em São Paulo e o Sistema Regional Sul com sede em Porto Alegre. A RFFSA sofreu um processo de desestatização baseado na Lei n.º 8.987/95 – leis das concessões, em que vários troços de linhas de caminho de ferro foram leiloadas a diferentes concessionárias como se verificar na tabela 4. Algumas linhas foram desativadas ao longo dos anos[7]

Tabela 4 – as diferentes concessionárias que precederam à RFFSA

Malhas Regionais	Data do Leilão	Concessionárias	Início da Operação	Extensão (Km)
Oeste	05.03.1996	Ferrovias Novoeste S.A.	01.07.1996	1.621
Centro-Leste	14.06.1996	Ferrovias Centro-Atlântica S.A.	01.09.1996	7.08
Sudeste	20.09.1996	MRS Logística S.A.	01.12.1996	1.674
Tereza Cristina	22.11.1996	Ferrovias Tereza Cristina S.A.	01.02.1997	164
Nordeste	18.07.1997	Cia. Ferroviária do Nordeste	01.01.1998	4.534
Sul	13.12.1998	Ferrovias Sul-Atlântico S.A. – at	01.03.1997	6.586
Paulista	10.11.1998	Ferrovias Bandeirantes S.A.	01.01.1999	4.236
Total				25.895

Em Portugal, os caminhos de ferro tiveram um início tardio quando comparado com outros países. A primeira viagem de comboio foi realizada no dia 28 de outubro de 1856 entre Lisboa e o Carregado. Esta ligação foi realizada pela Companhia Central e Peninsular dos Caminhos de Ferro em Portugal que trabalhava na linha desde 1853.

Contudo, o Estado rescinde com a Companhia Central e Peninsular dos Caminhos-de-Ferro pois esta apresentava uma série de dificuldades económicas. [9]

Só em 1860 é que foi fundada a Companhia Real dos Caminho-de-Ferro Portugueses por D. José de Salamanca, tendo esta dado um avanço significativo no processo construtivo das linhas de caminhos de ferro em Portugal, D. José de Salamanca era empreiteiro e já tinha trabalhado em Itália e Espanha. Conseguiu realizar a transição da bitola de 1440 mm para a bitola de 1670 mm, na linha entre Lisboa e Asseca (cerca de 68 km de extensão) sem que houvesse interrupção do serviço ferroviário.[9]

A linha do norte chega a Vila Nova de Gaia a 7 de Julho 1864. No mesmo ano, as ações da Companhia Real dos Caminho-de-Ferro Portugueses passam a ser cotadas na bolsa de Paris. Em 1867, é autorizada a construção das linhas do norte, considerando uma linha até Braga, outra até à fronteira e uma outra ao longo do rio Douro. Só a 20 de maio de 1875 é que circulou o primeiro comboio entre Porto e Braga. A 3 de agosto de 1882 é inaugurada a linha da Beira Alta.[9] No mapa seguinte demonstra-se as linhas ferroviárias existentes no território Português em 1895.

A 14 de julho de 1899 são criados os caminhos de ferro do Estado como entidade administrativa. No início do novo século, o comboio já chegava a Silves, Faro, Setúbal, Marvão, Elvas, Sintra, Cascais, Coimbra, Figueira da Foz e Alfarelos, pela via Oeste, ao Rossio, Guarda, Valença, Barca d'Alva e Porto S. Bento provisoriamente.

Em 11 de Maio de 1927 é realizado o ato de tomada de posse pela CP das Linhas do Estado. Em 1939 dá-se o início da adaptação das locomotivas a vapor à queima de óleos, devido aos problemas de aquisição do carvão.

As primeiras locomotivas diesel-elétricas chegam a Portugal em 1948 e em 1953 é realizada a viagem inaugural do comboio “foguetes” entre Lisboa e Porto. A inauguração da

eletrificação da linha Lisboa-Porto acontece em 1966, e em 1977 é o fim da tração a vapor para a via larga.

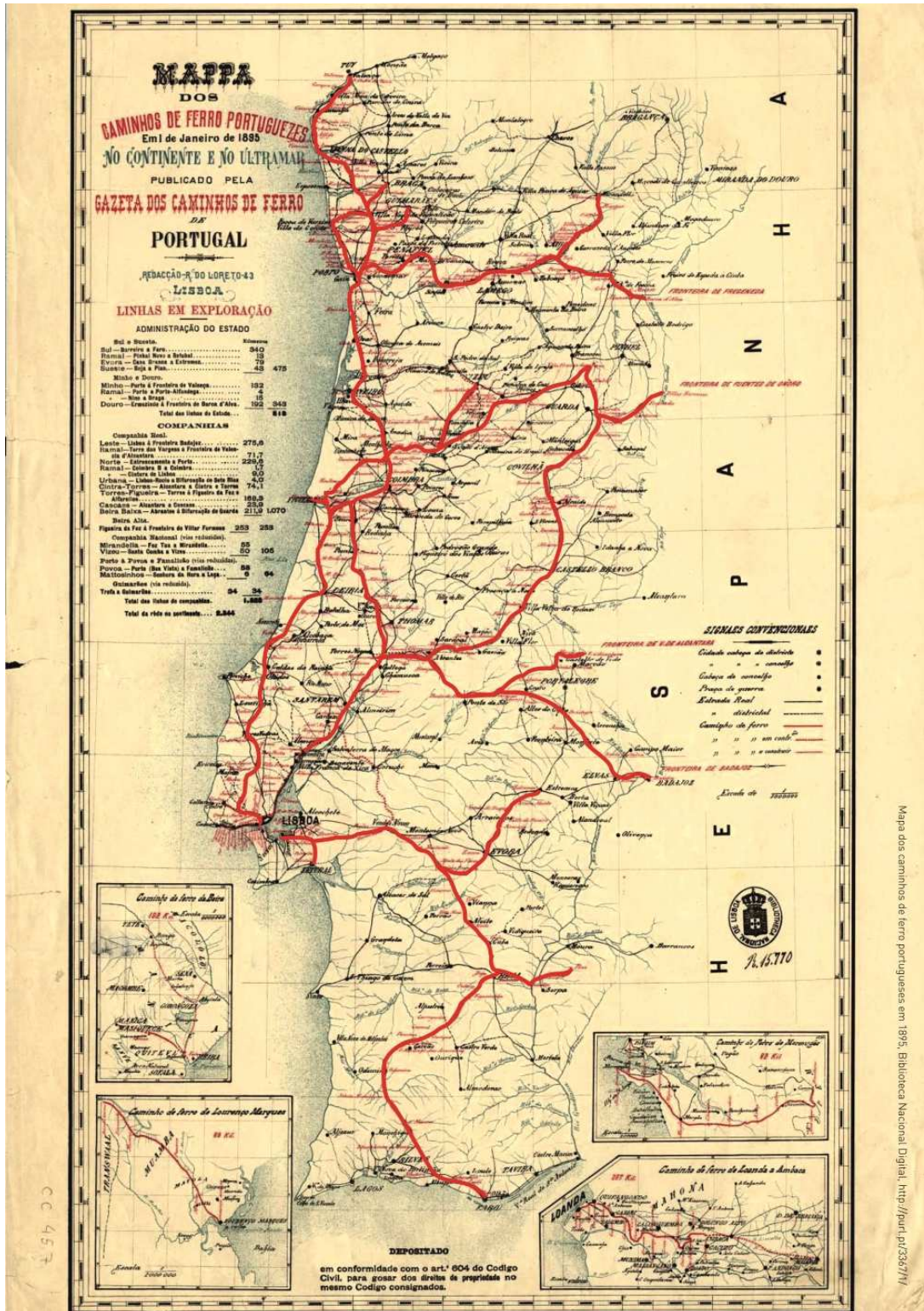


Imagem 8 – Mapa das linhas de caminho de ferro existentes em 1895 [10][9]

Em 1987, dá-se o início do serviço alfa entre Lisboa e Porto e em 1999 realiza-se a viagem inaugural do alfa-pendular entre Porto e Lisboa.

As bitolas usadas em Portugal são a bitola ibérica com 1668 mm e a bitola métrica com 1000 mm. Em algumas linhas é utilizado o sistema de bi-bitola, onde estão presentes os dois sistemas de bitolas, o métrico e o ibérico. Este sistema tem vantagens pois não é necessário realizar transbordos.

Com a invenção do motor de combustão interna e do motor a diesel bem como do motor elétrico surgiram novas locomotivas e automotoras mais eficazes e mais amigas do ambiente e notavelmente mais velozes, com um grau de segurança bastante elevado. A linha ferroviária teve de se adaptar às novas tecnologias e às novas solicitações que as locomotivas mais recentes com as suas velocidades mais elevadas assim exigiam. Além da evolução nas linhas de caminho de ferro entre cidades, as linhas urbanas também tiveram uma grande evolução. [11][9]

### **2.3. Linhas urbanas**

Em Janeiro de 1863, foi aberta ao público a primeira linha ferroviária de metropolitano de Londres, *London Underground*, entre *Panddington* e *Farringdon*. Esta linha usou locomotivas a vapor para puxar as carruagens. Foi um sucesso pois teve cerca de 38000 passageiros só no dia da abertura. Este sistema de linhas ferroviárias destacava-se dos outros, pois o desenvolvimento da linha foi efetuado por baixo de terra em túneis para descongestionar as ruas de Londres, contrariamente ao desenvolvimento das linhas de caminho de ferro convencionais que era feito à superfície como se pode verificar na imagem 9.



Imagem 9 - A primeira linha ferroviária do metropolitano de Londres, *London Underground*, entre *Panddington* e *Farringdon* (*Underground 1863*)

Mais uma vez, a construção deste sistema subterrâneo levou também ao desenvolvimento de outras áreas da engenharia, pois a sua construção na época apresentava novos desafios, com variáveis desconhecidas que tiveram que ser ultrapassadas.

A construção desta obra levou muita gente a acreditar que os túneis não suportariam o peso da cidade e os jornais da altura publicavam essa ideia. Inicialmente, o método utilizado na construção dos primeiros túneis do metropolitano de Londres foi o método *cut-and-cover*, seguindo-se depois o método de escavação de túneis circulares a profundidades consideráveis. As primeiras viagens correram bem, mas devido ao uso das locomotivas a vapor, este sistema apresentava falhas pela acumulação do fumo deixado pelas locomotivas, provocando desconforto e mal-estar nos passageiros, especialmente naqueles que tinham problemas de saúde como por exemplo asma e outros similares.

Salienta-se que nesta altura Londres estava no apogeu da era industrial; toda a cidade à superfície começava a sofrer do mal do *smog*. Só em 1890 com a eletrificação da linha do metropolitano de Londres é que este sistema de linhas de caminho de ferro conseguiu provar o seu potencial como meio de transporte urbano. Este sistema foi adotado um pouco mais tarde por outras cidades como Nova Iorque e Paris entre outras. Com este sucesso, este sistema diversifica-se pelo mundo e ramifica-se por baixo das cidades, por vezes estendendo-se para além dos limites das cidades, ligando as periferias, municípios e regiões vizinhas.

O elétrico foi desenvolvido pela primeira vez em Berlim em 1879, com o objetivo de substituir o sistema de linhas ferroviárias urbanas existentes com tração animal por tração elétrica. O primeiro elétrico a surgir em Portugal foi na cidade do Porto em 1895 com uma bitola de 1435 mm, depois na cidade de Lisboa em 1901 com uma bitola de 900 mm, seguindo-se as cidades de Sintra em 1904 com uma bitola de 1000 mm, Coimbra em 1911 e Braga em 1914.

Antes da existência da rede elétrica para o elétrico, este meio de transporte contava com a tração animal. Só em 1895 é que se consegue a tração elétrica da linha desde o Carmo até à Arrábida, com eletricidade fornecida por uma estação de geração na Arrábida. A imagem 10 mostra um elétrico na cidade do Porto atualmente.



Imagem 10 – Elétrico do Porto

O metropolitano de Lisboa foi inaugurado em 29 de Dezembro de 1959 e foi o primeiro sistema do género a ser inaugurado no território nacional. A ideia de construir o metro de Lisboa não é nova foi em 1888 que surgiu pela primeira vez a intenção de construir um sistema de caminhos de ferro subterrâneo semelhante ao de Londres. Com o fim da segunda guerra mundial, Portugal com a ajuda do Plano Marshall teve um estímulo para dar início à construção do metro. Os trabalhos tiveram início em 7 de Agosto de 1955. A rede inaugurada era composta pela linha Y da qual faziam parte 2 troços diferenciados, Sete Rios (atualmente Jardim Zoológico) e Rotunda (atualmente Marques de Pombal). Hoje em dia, o metro de Lisboa é constituído por 4 linhas autónomas com um total de 55 estações, compreendendo uma extensão total de 43,2 km.[12]

O Metro do Porto é um sistema de transporte público da área metropolitana do Porto. Foi inaugurado em 7 de Dezembro de 2002, tendo iniciado a sua circulação nesse ano em regime experimental. Era composto por 18 estações e tinha uma extensão de 11.8 km. O Metro do Porto é caracterizado por uma rede ferroviária eletrificada subterrânea no centro da cidade e à superfície na periferia da cidade. A primeira linha, designada por linha A, ligava a estação da Trindade ao Senhor de Matosinhos.

Atualmente o Metro do Porto tem 6 linhas, diluídas por sete concelhos: Porto, Matosinhos, Maia, Póvoa de Varzim, Vila do Conde, Vila Nova de Gaia e Gondomar. Possui um total de 81 estações e 67 km de extensão.

No metro do Porto, a linha desenvolve-se maioritariamente à superfície em que o *tram-train* ou a composição é alimentada através do pantógrafo que capta a corrente elétrica dos cabos aéreos eletrificados. O metro de Lisboa é alimentado por terceiro carril como quase todos os sistemas de metro, não sendo necessário cabos aéreos suspensos.

## 2.4. Linhas de alta velocidade

As linhas de alta velocidade tiveram o seu desenvolvimento mais significativo nos anos 50 após a Segunda Guerra Mundial. A 4 de outubro de 1964 foi inaugurada a primeira linha comercial de passageiros pela empresa *Japan Railway Shinkansen*. O sistema implementado foi capaz de atingir a velocidade máxima de 210Km/h e trouxe um retorno do investimento em 7 anos, tendo esse comboio ficado conhecido como comboio bala. Após a abertura desta primeira linha da empresa *JR Shinkansen*, construíram diversas outras linhas em todo o Japão com um comprimento total de 2 139 km de extensão. As dificuldades foram acrescidas pois o Japão é um país montanhoso e as linhas ferroviárias têm curvas de grande raio. O primeiro raio mínimo das linhas de alta velocidade era de 2 500 m, o que se verificou ser demasiado pequeno tendo sido depois aumentado para um raio mínimo de 4 500 m. Contudo, para as velocidades na ordem dos 300 km/h, mais uma vez estes raios eram demasiado baixos. Considerou-se então um raio mínimo de 7 000 m e preferivelmente um raio mínimo de 10 000 m. A secção em túnel inicial era de 62 m<sup>2</sup> e para os novos comboios bala a secção mínima atual é de 100 m<sup>2</sup>. Num período de 30 anos, o Japão desenvolveu diversos comboios como o S-0, S-10, S300, E- 1, E -2, entre outros, mas nenhum deles conseguia ultrapassar a velocidade máxima de 270 km/h. Assim sendo, estes comboios foram classificados como comboios de alta velocidade de primeira geração. A imagem 11 mostra o comboio S-0 da *JR Shinkansen*.



Imagem 11 – Comboio da JP *Shinkansen S-0*

Mais tarde, foram feitos um conjunto de testes para conseguir atingir velocidades superiores a 270 km/h. Por fim, com os testes realizados, conseguiram atingir em 1998 velocidades superiores a 300 km/h com o modelo S-500, significando que a tecnologia de alta velocidade ferroviária japonesa entrou na segunda geração.

No início do novo século, a *JR Shinkansen* começou a desenvolver a terceira geração de linhas de alta velocidade ferroviárias, com o propósito de aumentar a velocidade de funcionamento para 350 km/h. Após vários anos de estudo, verificou-se que a velocidade devia ser diminuída para 320 km/h. E assim conceberam o E5 num programa chamado Fastech360 capaz de atingir velocidades de 320 km/h como se pode verificar na imagem 12. [13]



Imagem 12- Comboio da *JR Shinkansen E5*

O segundo país que desenvolveu com sucesso a ferroviária de alta velocidade foi a França. Construiu a primeira linha de Paris a Lyon, usando a tecnologia TGV- PSE, em 1981, 17 anos depois do Japão. Em 1989 e 1994, completou o TGV-A e o TGV- N. De acordo com a classificação, esses comboios conseguiam atingir velocidades superiores a 280 km/h e a 300 km/h, pertencendo à tecnologia de primeira geração. Os comboios de segunda geração apareceram 20 anos mais tarde, na linha de TGV-Mediterranée, de Valence a Marselha, com uma infraestrutura atualizada. Em 2007, a nova linha de alta velocidade TGV- EST de Paris a Estrasburgo ficou concluída. Ambas as linhas conseguiam proporcionar melhores condições para a circulação do comboio e a máxima velocidade de operação do TGV-Mediterranée e TGV- EST, conseguindo assim aumentar até 320 km/h, com a França alcançando a velocidade de 300 km/h, a mais elevada dos comboios da primeira geração. O TGV francês possuía também a mais alta velocidade de operação da segunda geração, 320 km/h, sendo esta o recorde em todo mundo até 2008. Na terceira geração de

alta velocidade, a França percebeu que o sistema de poder centralizado que eles usaram para a primeira geração e para a segunda geração não era adequado para velocidades superiores a 350 km/h. Por isso, eles adotaram a tecnologia existente no Japão, com o sistema de energia distribuída, projetando o seu comboio de terceira geração, o AGV360. Este foi testado pela primeira vez na pista de alta velocidade italiana, com o objetivo de atingir a velocidade de 360 km/h, mas não conseguiu ultrapassar os 300 km/h. [13]

Foi feito um teste com o comboio TGV e verificou-se que era o comboio mais rápido do mundo, atingindo uma velocidade de 574,8 km/h a 3 de abril de 2007. Após este feito, o balastro da via ferroviária teve de ser todo repostado. Apesar do TGV ter atingido essa velocidade, a velocidade operacional máxima do TGV é de 320 km/h, mas não em todos os troços. A tabela 5 representa as 3 gerações de linhas de alta velocidade, os países e as tecnologias em uso.

Tabela 5 – Evolução tecnológica das linhas de alta velocidade no mundo [13]

Geração	Japão	França	Alemanha	China
1G	S-0 210Km/h (1964)	TGV-PSE 280Km/h (1981)	ICE-1 250Km/h (1991)	CRH1 200Km/h
	S-100 270Km/h (1975)			CRH2 200Km/h
	E-2 275Km/h (1997)	Tgv-A 300Km/h 1989	ICE-2 280Km/h (1996)	CRH5 200Km/h
2G		TGV-Mediterrance	ICE-3 300Km/h	CRH2 300Km/h
	S-500 300Km/h (1998)	320Km/h (2001)	(2002)	CRH3 300km/h (2008)
		TGV-EST 320Km/h (2007)	ICE350E (2006)	
3G	Fastech360 (2011)	AGV360 (2008)	350Km/h em testes	CRH380-A (2010)
	320 Km/h	360Km/h em testes		CRH380-B 350-380 Km/h

Contudo as velocidades operacionais destes sistemas rondam os 300 km/h por uma questão de manutenção de balastro e degaste dos carris. Além disso já existe um sistema que pode ser considerado um sistema de quarta geração que atinge velocidades operacionais de 430 km/h, este sistema recorre à levitação magnética para se movimentar

e levitar sobre os trilhos, e está em utilização comercial em Xangai na China, que se trata de um conceito de engenharia bastante diferente.

## 2.5. Linhas de levitação magnética

A levitação magnética ou Maglev usa forças magnéticas para levantar, orientar e impulsionar veículos, utilizando tanto forças atrativas como repulsivas. No início do século XX, Emile Bachelet concebeu uma suspensão magnética que utilizava forças de repulsão geradas por alternância de corrente. Este conceito de Bachelet era impraticável para a época porque a quantidade de energia dos condutores convencionais era insuficiente. Só na década de 60, quando os ímãs supercondutores surgiram é que se tornou possível desenvolver esta tecnologia. No início de 1920, o trabalho de Hermann Kemper na Alemanha foi pioneiro desenvolvendo um Maglev que usava a atração, designado *attractive-mode magleve*. Kemper explorou este conceito durante a década de 30 e nos anos 40 estabeleceu um projeto básico para pôr em prática o seu sistema de Maglev, tendo publicado um artigo em 1953.

Em 1963, os cientistas James R. Powell e Gordan T. Danby patentearam o primeiro sistema Maglev que usava a supercondutividade, sistema que teve como base o trabalho de Emile Bachelet, conseguindo ultrapassar as limitações energéticas que estavam subjacentes a esta tecnologia. Em 1966, apresentaram o seu conceito de Maglev utilizando supercondutores no veículo e bobines existentes nas laterais dos trilhos. Esta tecnologia foi depois seguida pelo sistema usado no Maglev Japonês.

Outro trabalho importante usando tecnologia Maglev foi realizado nos Estados Unidos da América no início dos anos 70, e refere-se ao desenvolvimento da ROMAG (*people-mover*

*demonstration vehicle*) pela Rohr Corporation como se pode ver na imagem 13. Este sistema era conduzido normalmente por eletroímãs que geram forças atrativas entre o veículo e o material ferromagnético no carril, sistema designado por sistema de suspensão magnética (EMS). Ao contrário do EDS, o EMS é estaticamente instável. É um sistema de controlo que faz variar as correntes nos eletroímãs para manter as folgas entre o veículo e o carril.



Imagem 13 - ROMAG Maglev [14]

Em 1975, os estudos do Maglev foram abandonados nos Estados Unidos da América devido à redução dos fundos governamentais para os transportes. Hoje em dia, o sistema do ROMAG é utilizado pelo Transrapid na Alemanha.

Nos anos 70, os Alemães e os Japoneses começaram a desenvolver as suas versões da tecnologia Maglev. Os Japoneses, apoiados pela *Japanese National Railway* (JNR),

expandiram o desenvolvimento da sua tecnologia Maglev. Em 1972, tinham já o seu modelo construído, tendo, em 1974, a sua pista de larga escala a funcionar.

Em 1970, na Alemanha já existiam alguns veículos protótipos a operar debaixo da alçada do governo alemão, sendo estes as primeiras versões do Transrapid atual. [15][16]

Em 2003, é finalmente inaugurado em Shanghai a primeira linha comercial com o sistema Maglev Transrapid com 30,5 km de extensão, que faz trajeto em 7 minutos e 22 segundos.

### **3. Sistemas de contacto roda-carril**

#### **3.1. Contexto histórico do sistema roda-carril**

Os primeiros sistemas de caminho de ferro apareceram nas minas de carvão, onde os vagões circulavam sobre carris de madeira, sendo estes puxados por animais. Com o aparecimento da máquina a vapor, os carris de madeira foram substituídos pelos carris de aço laminado. O sistema inicial de contacto roda-carril era diferente do sistema atual. No primeiro sistema roda-carril, as rodas eram cilíndricas, possuíam dois verdugos ou flanges de cada lado envolvendo o carril e as rodas estavam ligadas a um eixo que permitia um movimento independente de cada roda. [2]

O contacto roda-carril é um sistema inerente das linhas de caminho de ferro, representando os chamados órgãos de rolamento. Desde o início da sua criação que este sistema teve problemas técnicos tais como: quebra de eixos, rodas e carris, problemas com o alinhamento do traçado da via, variações na bitola devido às amplitudes térmicas, entre muitos outros. Por estes motivos, a forma geométrica do carril, da roda e assim como a configuração que estas se encontram ligadas através de um eixo sofreram evoluções

significativas. Atualmente, a roda passou a ter um perfil cónico e as rodas passaram a estar ligadas rigidamente ao eixo, não podendo rodar independentemente. Com este tipo de perfil cónico da roda munido de um verdugo ou flange e com o tombo do carril, o sistema passou a possuir um maior centro de guiagem e centragem. Como a roda é cónica significa que em linha reta é exercida uma força sobre o seu eixo, corrigindo assim desvios laterais devido ao efeito de lacete. Também garante um melhor ajuste em curvas e um menor desgaste. O verdugo existente na roda ou flange previne os descarrilamentos no caso de existência de deslocamentos verticais excessivos. Contudo, quando há contacto do verdugo com o carril este provoca um maior desgaste, sendo esta uma situação de evitar. O tombo do carril é a pequena inclinação que o carril que serve para acolher a forma cónica da roda. Na imagem 14 demonstra-se a conicidade entre a roda e carril.

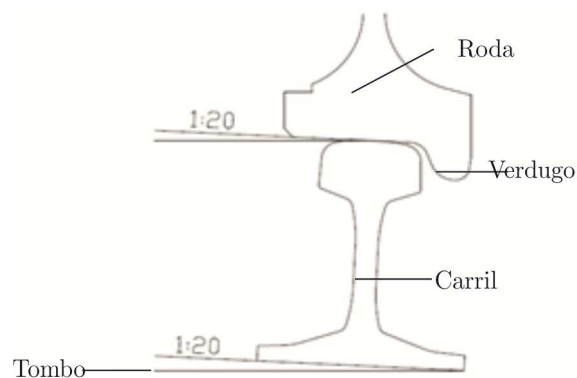


Imagem 14 – Conicidade da roda e tombo do carril

### 3.2. Área de contacto do sistema roda-carril

O sistema de contacto roda-carril é um sistema complexo e em certa medida imperfeito, principalmente por ser um local de concentração de grandes tensões. Este sistema é idêntico ao de um rolamento, só que sem qualquer tipo de proteção das intempéries, das

poeiras e das pedras do próprio balastro. Na imagem 15 representa-se um esquema da área de contacto entre a roda e o carril.

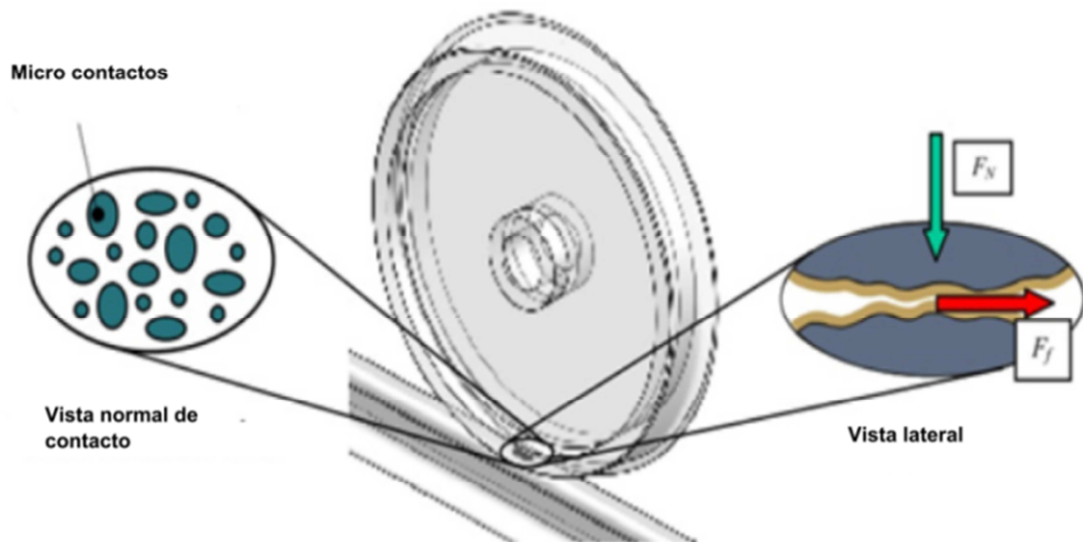


Imagem 15 – Área de contacto roda-carril [17]

As temáticas de Resistência dos Materiais e a Tribologia estudam este fenómeno com mais detalhe. Quanto à resistência dos materiais é importante conhecer as deformações, as tensões que existem na área de aplicação das forças, com o propósito de dimensionar corretamente os elementos do sistema e as suas ligações, prevenindo a fadiga e outros danos que possam pôr em causa a segurança do sistema. A tribologia estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação entre as superfícies em movimento, neste caso entre o contacto roda-carril. O estudo destas disciplinas no sistema roda-carril pertence maioritariamente à engenharia mecânica. Na imagem 16 verifica-se as diferentes áreas de contacto da roda em relação ao carril.

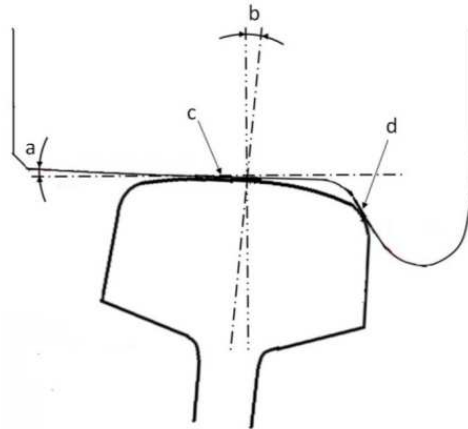


Imagem 16 - Esquema das posições de contacto roda-carril [18]: a) perfil cónico da roda; b) Tombo do carril; c) zona de contacto entre a roda e a cabeça do carril, d) Verdugo ou flange

A área de contacto entre a roda e o carril tem de ser suficientemente forte para resistir às forças verticais das cargas, quer estáticas quando o veículo se encontra parado, quer dinâmicas quando o veículo se encontra em movimento. As forças tangenciais devem ser baixas de forma a garantirem o movimento do veículo com as suas cargas pesadas, mas ao mesmo tempo devem providenciar a melhor relação possível entre coeficiente de atrito e as frenagens, e a tração e o guiamento. A falta de atrito é uma das desvantagens deste sistema, sendo o fenómeno muito estudado pois é necessário uma relação satisfatória entre uma boa aderência e o mínimo desgaste do sistema roda-carril. Na imagem 17 apresenta-se o conceito de atrito da roda com o carril com a roda em movimento, que representa a frenagem de um veículo e com a roda bloqueada, que representa o arranque do veículo.

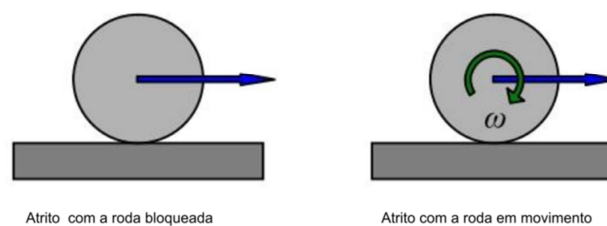


Imagem 17 – Atrito no sistema roda-carril [17]

Já no final do século XVI, Leonardo da Vinci iniciou o estudo sistemático do atrito. O atrito é definido como a força de resistência com a componente horizontal entre as superfícies de contacto de dois corpos, quando um destes corpos tende a mover-se sobre o outro devido a uma força externa. O atrito é geralmente representado por um coeficiente de atrito adimensional que é definido pelo rácio da força de atrito ( $Fa$ ) e da força normal ( $Fn$ ) que existe no contacto de duas superfícies, como se pode ver na expressão 3.1. [18]:

$$\mu = \frac{Fa}{Fn} \quad (3.1)$$

Em que:

$\mu$  = *coeficiente de atrito*

$Fa$  = *força de atrito*

$Fn$  = *força normal*

O atrito entre a roda-carril é de extrema importância devido à adesão, ao desgaste, ao ruído e à fadiga. O controlo do atrito é necessário para garantir um bom funcionamento do sistema de contacto roda-carril. Este controlo é necessário para garantir um baixo atrito no contacto do verdugo com o carril, garantir um atrito intermédio entre a roda e a mesa de rolamento do carril, especialmente com cargas elevadas, e garantir um bom atrito no caso do contacto entre a roda e a mesa de rolamento dos comboios devido à tração. O atrito ideal de contacto no sistema de contacto roda-carril será o representado na imagem 18. O coeficiente de atrito também varia com as condições que existem no carril: se este está com sujidade, se está molhado, oleoso ou ainda com folhas. A adesão da roda ao carril tem um comportamento muito diferente conforme se pode verificar na imagem 18 e nas tabelas 6 e 7.

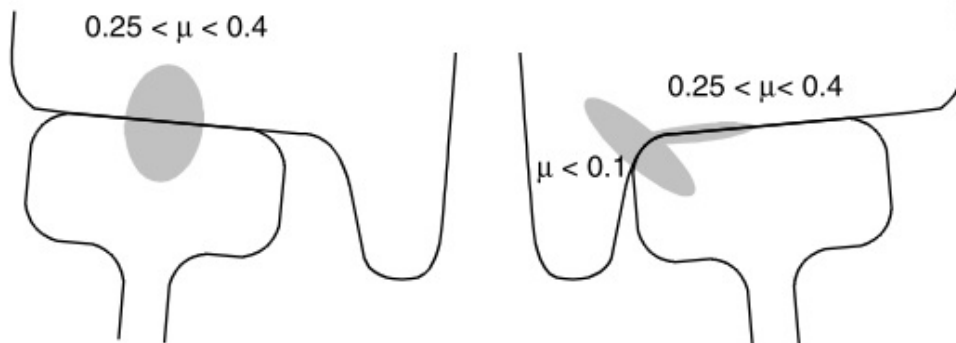


Imagem 18 - Contacto ideal no sistema de contacto roda-carril [19]

A imagem acima demonstra o valor do coeficiente de atrito existente nas diferentes zonas de contacto entre a roda e o carril. Na tabela 3 verifica-se os diferentes coeficientes de atrito existentes em alguns países.

Tabela 6 - Alguns coeficientes de atrito existentes [18]

	Coeficiente de atrito para a frenagem	Coeficiente de atrito para a tração
Tranportes públicos de Estocolmo	Aproximadamente 0,15	0,18
Reino Unido	0,09	0,2
Holanda	0,07	0,17

Na tabela seguinte verifica-se o valor de coeficiente de atrito para diferentes condições do carril, que diferem consoante o estado de limpeza do carril ou consoante as condições climatéricas.

Tabela 7 – Coeficientes de atrito que dependem das condições do carril [18]

Condições no carril	Coeficiente de atrito	Condições no carril	Coeficiente de atrito
Seco e limpo	0,25-0,3	Humido	0,09-0,15
Seco e com areia	0,25-0,33	Com neve	0,10
Molhado e limpo	0,18-0,20	Com neve e areia	0,15
Molhado e com areia	0,22-0,25	Com folhas molhadas	0,07
Oleoso	0,15-0,18	(n.a)	(n.a)

Para aumentar a tração entre o sistema roda-carril, foram desenvolvidas diversas tecnologias. Essas tecnologias tinham em vista, especialmente, o aumento da tração em traçados da via com inclinações longitudinais consideráveis que podiam dificultar consideravelmente a tração. Uma das tecnologias usadas é a injeção de areia através de um compressor de ar, aumentando assim a tração como se pode ver na imagem 19. Além deste sistema de injeção de areia, existem outros sistemas que misturam limalhas de ferro em conjunto com a areia para aumentar a tração.

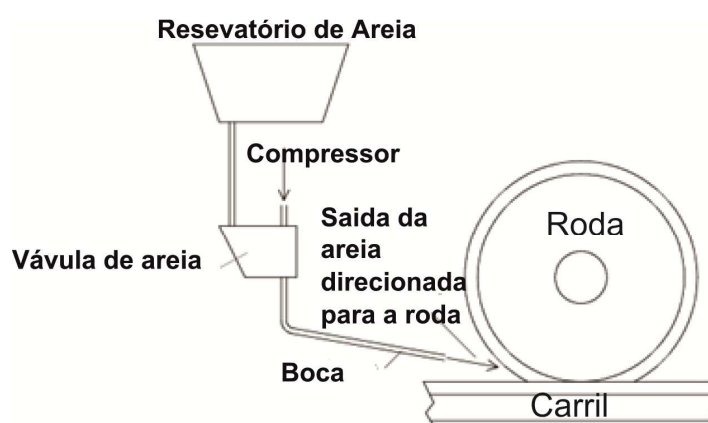


Imagem 19 – Sistema de injeção de areia [19]

Devido às rodas possuírem um perfil cônico, o raio de rodagem pode ser diferente da roda esquerda para a roda direita na medida em que o veículo se desloca na via, conforme representado na imagem 20.

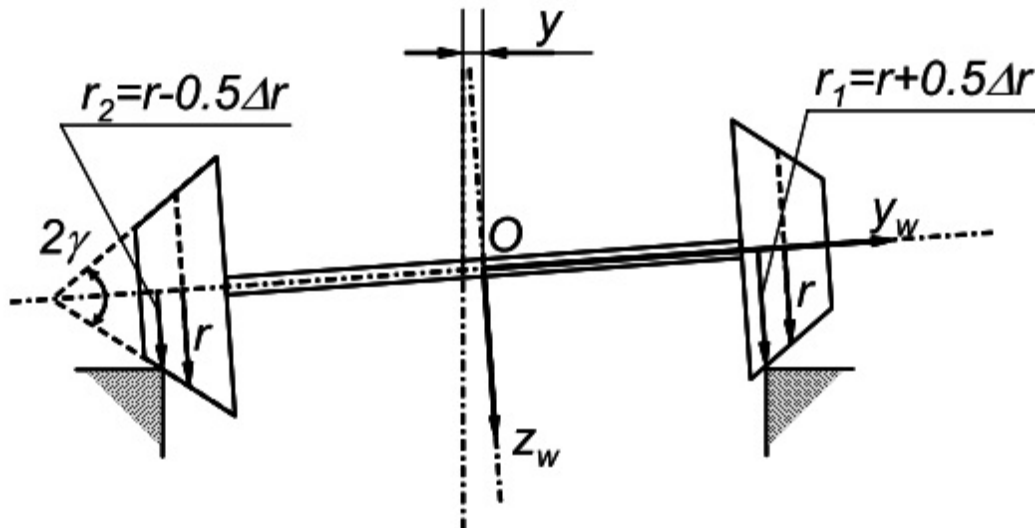


Imagem 20 - Raios de rodagem ( $r_1$  e  $r_2$ ) correspondente ao eixo e às suas rodas cónicas [20]

Quando o eixo está na posição central em relação ao carril, o raio de rodagem é igual na roda esquerda e na roda direita. Quando o eixo não está na sua posição central, a distância entre os raios de rodagem das duas rodas pode ser medida em função do deslocamento lateral  $y$  em relação à sua posição central, como se pode verificar na imagem 20 de acordo com a expressão 3.2 [20]

$$\Delta r(y) = r_1(y) - r_2(y) \quad (3.2)$$

Em que:

$\Delta r$  = variação do raio de rodagem das rodas cónicas

$r_1$  e  $r_2$  = raio de rodagem das rodas e o deslocamento cónico em  $y$

Este fenómeno é mais visível nos traçados que possuem curvas com raios apertados. Estas são as situações onde se verifica um maior deslocamento lateral e, por consequência, uma maior diferença entre os raios de rodagem da roda esquerda e da roda direita.

Além deste efeito da diferença do raio de rodagem, existe um outro efeito que está intrinsecamente relacionado com a falta de um diferencial como aquele que existe nos veículos automóveis como se pode verificar na imagem 21.

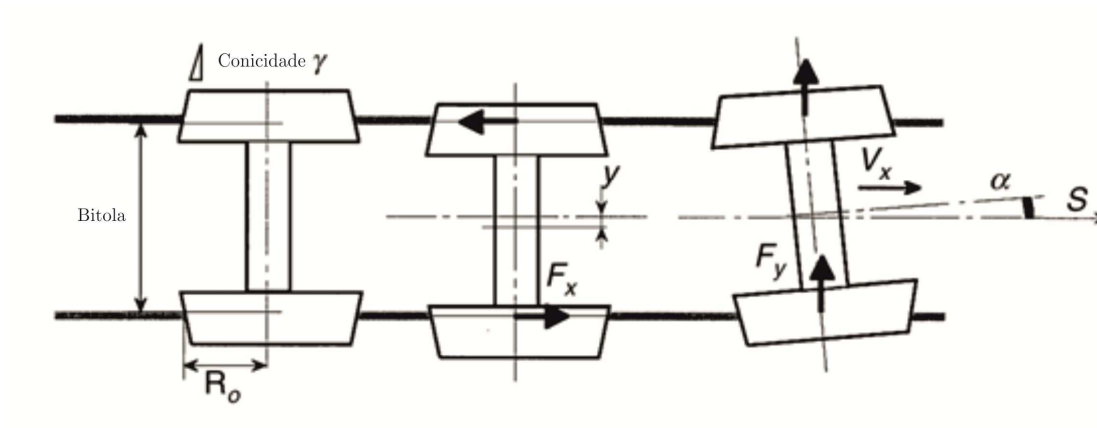


Imagem 21 – Graus de liberdade do sistema roda-carril

A falta de um diferencial aliado à conicidade do perfil das rodas do sistema roda-carril leva a que exista um deslocamento lateral das rodas e inevitavelmente uma rotação do eixo. Assim sendo, o sistema possui 2 graus de liberdade em  $y$ , devido aos deslocamentos verticais e à rotação do eixo  $\alpha$ , como se pode verificar na imagem 20. O deslocamento vertical e a rotação do ângulo deve ser baixo; normalmente o deslocamento no limite entre o carril e os verdugos é de  $\pm 8$  mm.

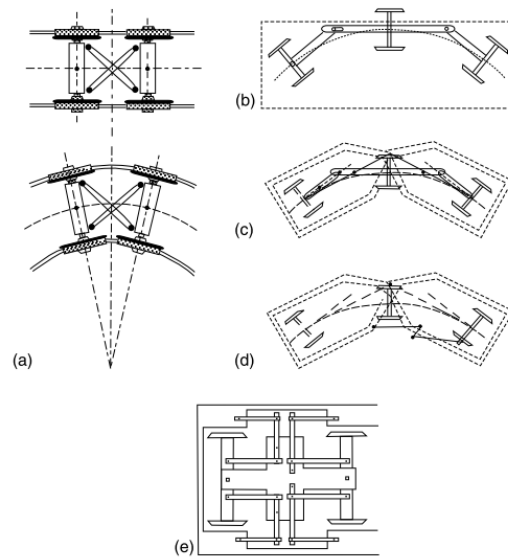


Imagem 22 – Algumas soluções para resolver o problema dos deslocamentos verticais [19]

Para minimizar o efeito do deslocamento vertical, principalmente em curvas, e os seus efeitos quer de desgaste quer de vibrações excessivas que produzem ruídos, os engenheiros conceberam veículos mais flexíveis em planta, com intuito de melhorar a performance do veículo nas curvas minimizando os deslocamentos laterais, pode-se verificar na imagem 22 um desses sistemas.



Imagem 23 – Bogie das séries 350 da Talgo [21]

Atualmente, este problema foi solucionado e a maior parte dos sistemas de alta velocidade recorre à solução de criar o veículo mais flexível em planta, como se pode ver na imagem 21,23 e 24.

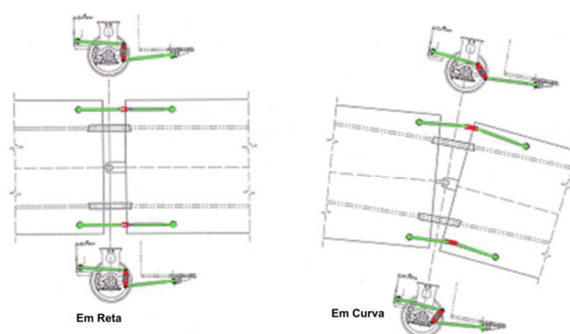


Imagem 24 – Bogie em planta das séries 350 da Talgo [21]

Nos Estados Unidos da América, iniciaram uma recolha de dados das causas dos acidentes nas linhas de caminho de ferro e, de acordo com a *Federal Railroad Administration* (FRA), as principais causas dos acidentes são: falhas nos aparelhos de mudança, componentes que falham nos Bogies, erros humanos (principalmente do maquinista) e falta de monitorização da via ferroviária. Além deste estudo, a FRA estudou também o número de descarrilamentos e as suas principais causas: em 8862 descarrilamentos que ocorreram entre 1998 e 2000, verificou-se que existe um maior número de descarrilamentos devido à falta de adesão entre a roda e o carril como se pode verificar na tabela 8. [19]

Tabela 8 – Relação dos incidentes estudados [19]

Ano	Total de incidencias	Falta de adesão	Bitola alargada	Alinhamento da via	Efeito de Lacete	mesa de rolamento e verdugo	outras causas
2000	3193	673	295	46	7	13	312
1999	2924	612	234	52	6	18	302
1998	2745	511	189	54	3	6	259
Σ	8862	1796	718	152	16	37	873

As rodas têm a função de transmitir os esforços ao carril e assegurar uma boa superfície de rolamento, sem comprometer a segurança e o conforto e evitando ao máximo o desgaste. Assim sendo, estas requerem uma monitorização e manutenção afim de assegurar a estabilidade do sistema roda-carril. As rodas e os eixos são os elementos mais críticos do sistema de rodagem dos caminhos de ferro.

### 3.3. Constituintes do sistema de contacto roda-carril

#### 3.3.1. Bogies

Os bogies têm a função de transmitir e repartir uniformemente as cargas verticais aos carris através das rodas, guiar o veículo ao longo da via, aplicar a frenagem e a tração, e tornam o veículo mais flexível reduzindo as vibrações causadas pelas irregularidades, curvas e movimentos laterais da via, aumentando o conforto e conferindo mais estabilidade ao veículo. Os bogies podem ter um guiamento rígido ou um guiamento livre, consoante os graus de liberdade dos rodados existentes nos bogies como se pode verificar na imagem 25.

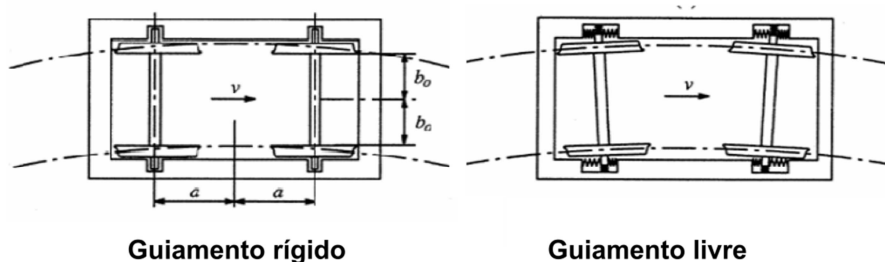


Imagem 25 – Tipo de guiamento dos bogies [22]

Os bogies com guiamento livre demonstram uma certa instabilidade em alinhamento e um excelente desempenho em curva, enquanto os bogies de guiamento rígido possuem estabilidade em alinhamento e mau comportamento em curva.[22]

Existem diferentes tipos de bogies de acordo com a sua configuração e função. Os bogies dependem do número de eixos, se têm motor ou não e dependem da sua disposição no veículo.

Os bogies com um só eixo não são muito utilizados, sendo os mais usados os bogies de dois eixos. Estes têm um melhor desempenho em relação aos bogies de um só eixo, pois conseguem absorver melhor as irregularidades da via como se demonstra na imagem 26.

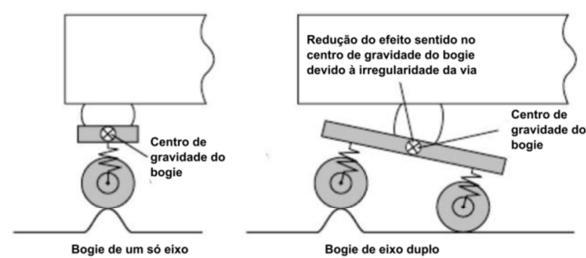


Imagem 26 – Número de eixos [22] [23]

Existem também bogies com 3 eixos como se verifica na imagem 27. São usuais em unidades motoras, sendo este conjunto benéfico na tração. Contudo, é necessário um cuidado especial no eixo intermédio devido ao guiamento em curva. Além dos bogies com 3 eixos há também bogies com mais eixos com especificidades industriais que não se aplicam às vias ferroviárias comuns.

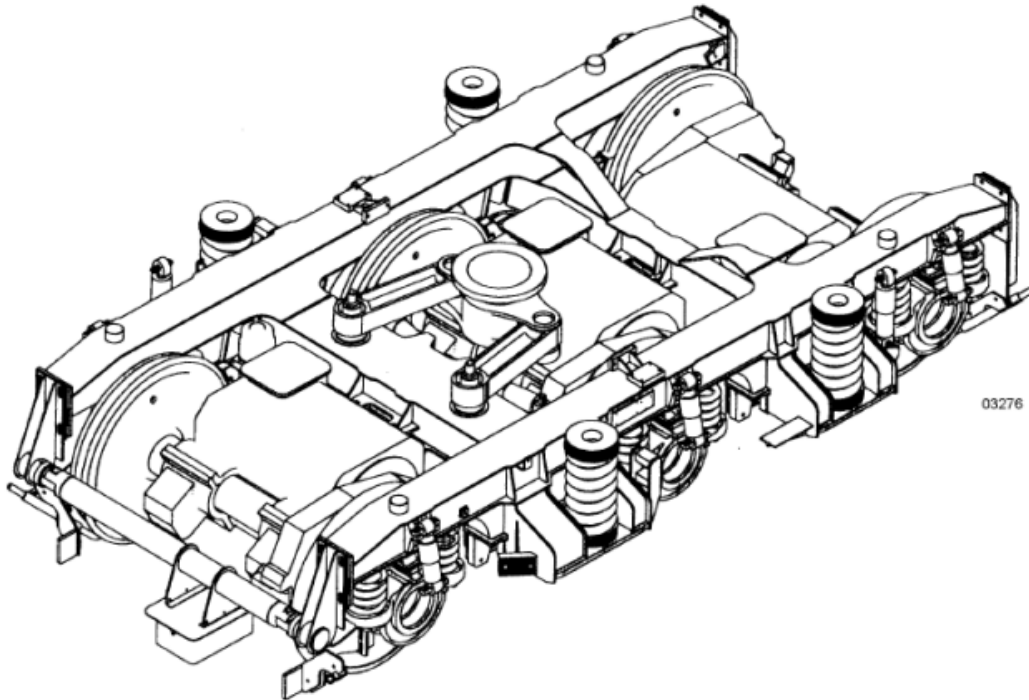


Imagem 27 – Bogie com 3 eixos [22]

Define-se bogie com motor aquele que contribui com esforço de tração, sendo o bogie livre aquele que não contribui com qualquer esforço de tração. Os bogies estão designados segundo a norma (UIC ficha 650) e baseiam-se no número de eixos motorizados ou livres e na posição de cada rodado no bogie. Os rodados livres são identificados por números, sendo o 1 para um rodado, 2 para dois rodados. Os rodados com motor são identificados por letras, sendo A correspondente a um rodado motor, B dois rodados motores e assim sucessivamente.[22]

Os veículos ou composições dispõem normalmente de 2 pares de bogies que suportam o veículo em cada extremidade. Contudo, existem sistemas que têm sido utilizados e que recorrem à colocação repartida de um bogie por veículo como se verifica na imagem 28. Os bogies que têm esta particularidade são designados por bogies articulados ou bogies Jacobs. Este sistema tem como vantagem a redução do número de eixos e dos esforços na via e, por consequência, leva à redução do ruído.



Imagem 28 – Bogie articulado [24]

Tem como desvantagem a limitação de carga máxima que o veículo pode transportar. Sendo assim, este tipo de disposição de bogie é utilizado para cargas mais baixas enquanto os bogies não articulados são usados em veículos que transportam cargas mais pesadas.[22] Na imagem 29 verifica-se um bogie convencional sendo o ideal para transporte de cargas pesadas.



Imagem 29 – Bogie convencional [24]

A suspensão dos bogies tem a função de filtrar as vibrações transmitidas pela via, distribuir uniformemente os esforços e garantir que os deslocamentos do veículo sejam os adequados, quer em curva quer em reta, conforme se demonstra na imagem 30.

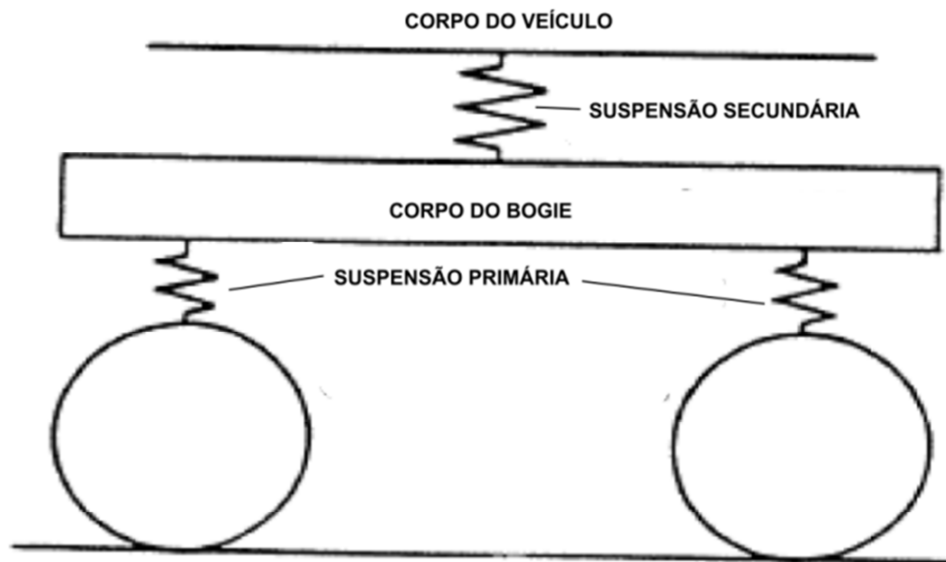


Imagem 30 – Níveis de suspensão do bogie [23][22]

Os bogies podem ter um ou dois níveis de suspensão, consoante a necessidade de conforto no veículo. O primeiro nível é designado por nível primário e opera ao nível do guiamento do veículo, o segundo nível é designado por nível secundário e opera ao nível do conforto do veículo. [22]

### 3.3.2. Sistemas de pendulação

Estes sistemas foram desenvolvidos com o intuito de melhorar o conforto dos passageiros na circulação em curva, de forma a obter uma margem maior de conforto, podendo, assim, aumentar as velocidades de circulação. O veículo em curva inclina-se para o interior devido à velocidade de circulação e este sistema tende a contrariar o efeito da força

centrífuga, aumentando o conforto. Os sistemas de pendulação existentes podem ser ativos ou passivos conforme se pode verificar na imagem 31. A pendulação passiva usa a aceleração induzida pela via no veículo. A pendulação ativa existe quando há um dispositivo que fornece energia para que o veículo se incline em curva.

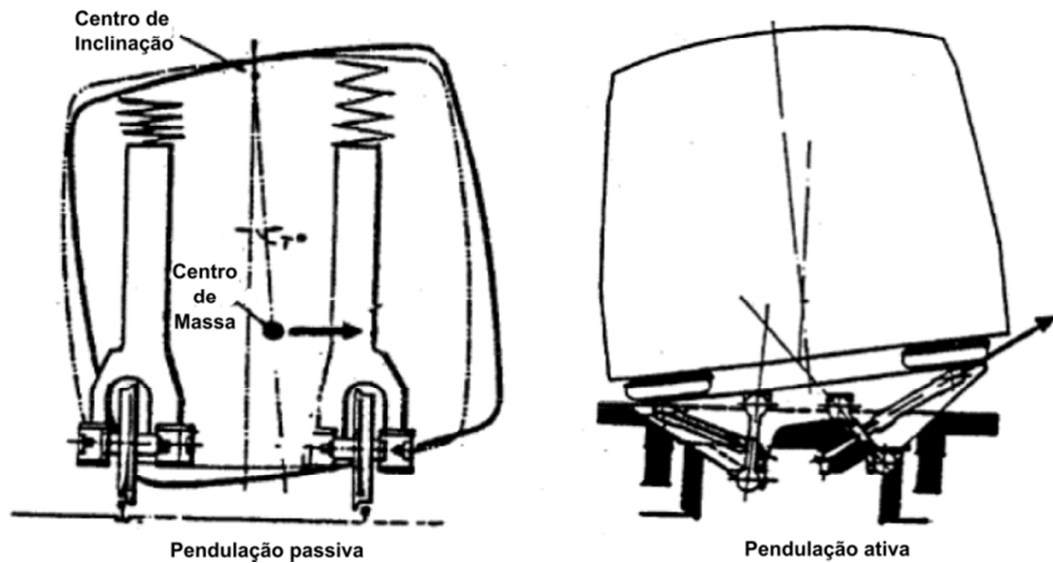


Imagem 31 – Tipos de pendulação [22]

### 3.3.3. A roda

Existem basicamente dois grupos de rodas que dependem da forma como são concebidas. As rodas podem ser de monobloco ou de roda com aro como se pode verificar nas imagens 32,33 e 34. O fabrico das rodas é realizado através de forjagem, laminação e um processo de têmpera da superfície de rolamento. A têmpera tem como objetivo aumentar a dureza e a durabilidade das rodas.

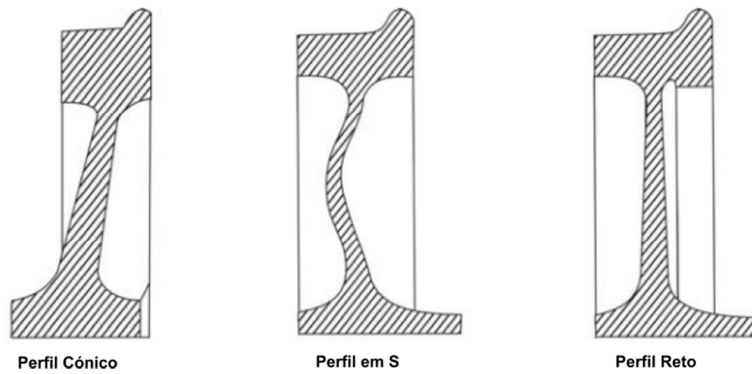


Imagem 32 – Tela de rodas monobloco [19]

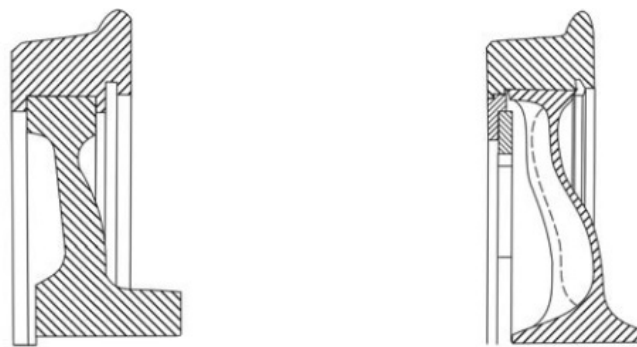


Imagem 33 – Tela de rodas com aro [19]

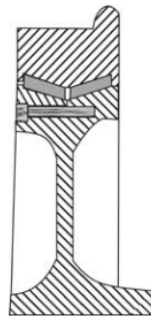


Imagem 34 – Tela de roda com aro contendo uma camada de borracha [19]

O fabrico destas rodas requer um controlo rigoroso, sendo estas submetidas a uma série de ensaios, nomeadamente detecção de impurezas do aço, determinação da dureza, profundidade da têmpera no aço e verificação por ultrassons para detetar eventuais defeitos internos do aço. Os aços usualmente utilizados nos fabricos das rodas são o R7T e

o R9T pelas fichas UIC ou então os aços ER7 e ER9 segundo as normas europeias. [22] A imagem 35 demonstra alguns dos perfis de rodas existentes.

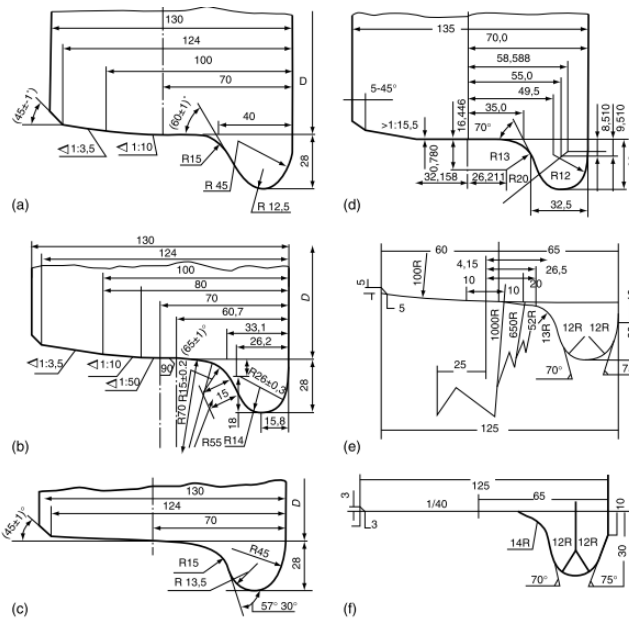


Imagem 35 – Perfis comuns das rodas: a) usual em transporte de passageiros e mercadorias (Rússia); b) para linhas de alta velocidade (Rússia); c) usual em transportes industriais (Rússia); d) usual em transporte de mercadorias e passageiros na Europa; e); f) para linhas de alta velocidade japonesas [19]

A configuração geométrica da tela da roda é variável, existindo vários formatos possíveis além dos representados nas imagens 32,33 e 34. O mesmo acontece com os perfis das rodas sendo estes adaptados ao tipo de serviço do veículo.

A secção da roda obedece a um critério que permite a otimização de forma a compensar fenómenos que ocorram durante o serviço e evitar deformações da roda devido às ações térmicas que na roda são as mais usuais devido ao efeito da frenagem e que favorecem o aparecimento de fissuras. A aplicação de camadas de borracha por vezes é usada com o objetivo de reduzir vibrações e conseqüentemente ruídos. A camada de borracha é colocada entre o aro e a tela da roda, sendo este tipo de roda mais usual nos sistemas urbanos como é o caso do metro. Deve-se salientar que o sistema ICE que utilizava este

tipo de rodas com borracha teve um acidente grave, em que a causa do acidente resultou de um defeito de fabrico deste tipo de rodas de com borracha.

### 3.3.4. O Carril

O carril tem a função de guiar o veículo devido à forma geométrica da sua cabeça e à conicidade das rodas. Além disso, deve ser capaz de resistir, atenuar e transmitir os esforços aos outros elementos da via, e atualmente transmitir sinais elétricos para o controlo da sinalização da via. Pode ter outras funções como a de transmitir corrente elétrica para a tração no caso de ter o denominado terceiro carril. O carril utilizado atualmente é o Carril de Patim ou o Carril tipo *Vignole*. Neste tipo de carril destacam-se dois perfis distintos: o UIC 54 e o UIC 60. Existe também o carril com gola usado em áreas onde existe intersecção com veículos, ficando estes ao nível da estrada. [25]

O carril tipo *Vignole* é constituído por um patim situado na base que pousa na travessa, por uma alma que é a parte intermédia do carril e pela cabeça. Na imagem 36 pode verificar-se as diferenças entre o carril UIC 54 e o UIC 60.

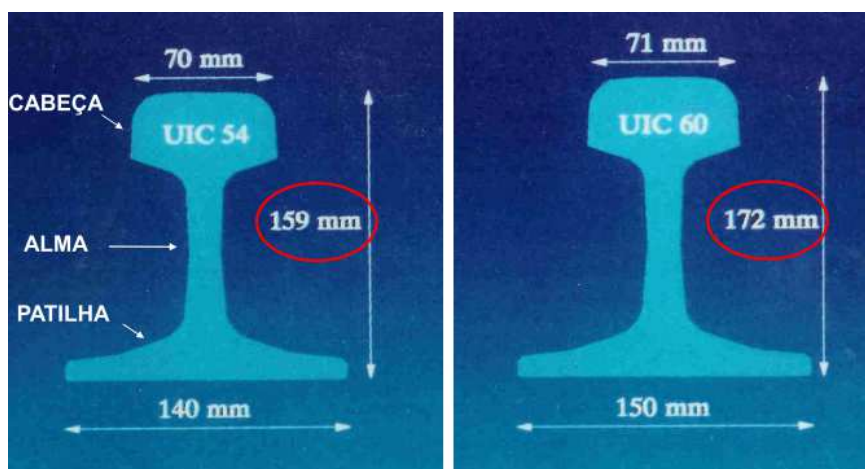


Imagem 36 – Comparativo entre o carril UIC 54 e o UIC 60 [26]

O patim tem como função assegurar que a alma permaneça na vertical e perpendicular às travessas. A alma tem a função de garantir uma altura suficiente que resista à flexão, a uma espessura mínima para que a resistência e a rigidez transversal apresentem valores credíveis. Por fim, a cabeça do carril tem a função de ser suficientemente resistente para que as rodas nas suas diversas passagens não afetem o momento de inércia da secção.

O carril UIC 54 é assim designado porque tem um peso aproximado de 54 kg/m e o UIC 60 tem um peso de cerca 60 kg/m. Os carris são produzidos por laminação do aço sendo depois cortados em troços que variam entre os 18 e os 28 metros. As ligações entre os carris são realizadas por soldadura, eliminando as juntas. Designa-se ao conjunto de carris soldados Barras Longas Soldadas, (BLS). Na tabela 9 representa-se as características dos dois tipos de carris.

Tabela 9 – Tabela das propriedades do carril UIC 54 e do carril UIC 60

Carril	Peso Kg/m	Secção cm <sup>2</sup>	Momento de Inercia Ix cm <sup>4</sup>	Momento de Inercia Iy cm <sup>4</sup>	Módulo Resistente Ix/V cm <sup>3</sup>	Módulo Resistente Iy/V cm <sup>3</sup>
UIC 54	54,43	69,34	2346	417,5	279,2	59,6
UIC 60	60,34	76,86	3055	512,9	335,5	68,4

Além destes dois tipos de carris existe também o carril de gola, que se encontra representado na imagem 37, que é utilizado quando há cruzamentos com a rodovia, possibilitando assim a circulação de automóveis.

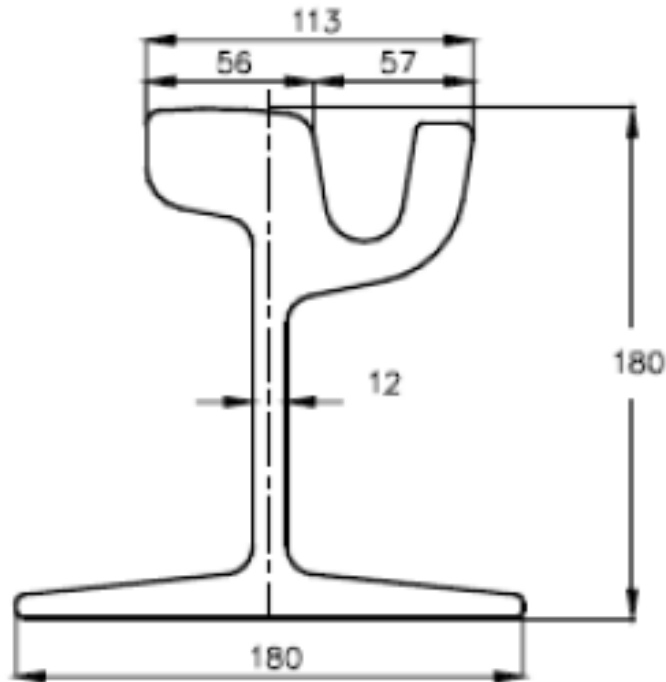


Imagem 37 – Carril com gola [27]

### 3.3.5. Barras Longas Soldadas (BLS)

Os carris são soldados com o intuito de eliminar as juntas entre os carris. Isto evita o desgaste e o efeito que existe sempre que uma roda passa de um carril para o outro, produzindo também ruído e obrigando à colocação de uma junção entre os carris. Os carris com o sistema BLS podem ter um comprimento infinito. Contudo, isto não acontece porque existem sempre condicionalismos na via, tais como: juntas de dilatação de tabuleiros de obra de arte, aparelhos de mudança de via e outros. Estas interrupções nos carris levam a que haja um dimensionamento, designado por comprimento de respiro das soldas evitando assim dilatações e folgas excessivas, como se verifica na imagem 38.



Imagem 38 – Juntas nos carris com as respetivas junções [25]

### **3.3.6. Travessas**

As travessas localizam-se ao longo da parte inferior do carril e por cima do balastro. Servem de apoio aos carris e têm como funções transmitir os esforços ao balastro, manter a estabilidade da via, manter a bitola da via e assegurar a inclinação dos carris designado por tombo, normalmente 1/20, sendo esta última função distribuída com o tipo de fixação do carril à travessa. As travessas podem ser em madeira, betão armado ou metálicas, sendo as metálicas pouco usuais em Portugal. A distância de colocação das travessas varia entre 50 cm e 70 cm e o seu comprimento transversal está compreendido entre os 2,4 m e os 2,8 m, sendo o mais usual 2,6 m, na bitola Europeia.

As travessas de madeira devem ser leves e flexíveis, impregnadas com creosoto e ter um ciclo de vida de aproximadamente 20 a 30 anos a imagem 39 demonstra este tipo de travessas. A madeira utilizada em Portugal nas travessas é usualmente pinho bravo, azové em AVS e carvalho. Normalmente, as travessas de madeira apresentam problemas de manutenção, porque as suas propriedades modificam-se com o tempo.



Imagem 39 – Linha ferroviária com travessas de madeira

As travessas metálicas podem ser de dois blocos unidos por uma cantoneira, por monobloco ou então em Y como se verifica na imagem 40. São pouco utilizadas e são recomendadas apenas para linhas com tráfego reduzido. Apresentam boas propriedades mecânicas e boa conservação.



Imagem 40 – Linha ferroviária com travessas metálicas em Y [28]

As travessas de betão armado têm uma vantagem sobre as outras porque têm um maior período de vida, aproximadamente 40 a 50 anos. Não apodrecem e não são suscetíveis ao fogo, apresentando uma maior resistência e permanência das suas propriedades ao longo

da vida. Existem sob duas formas: em betão bibloco ou em betão monobloco, como se verifica na imagem 41.



Imagem 41 – Travessas de betão armado monobloco [28]

As primeiras travessas de betão armado são em monobloco com uma geometria idêntica à geometria das travessas de madeira. As travessas de betão armado de monobloco podem ser também pré-esforçadas com pós-esforço ou pré-esforço. As travessas de bibloco apresentam problemas de corrosão na aresta central e conservação da bitola e na imagem 42 demonstra-se um exemplo deste tipo de travessas.[26]



Imagem 42 – Travessas de betão bibloco [28]

### **3.3.7. Fixações dos carris**

Este sistema garante o posicionamento correto do carril assim como uma boa fixação do carril à travessa. Absorve também parte das vibrações na passagem de um comboio. Deve também ter poder de encaixe das forças verticais e longitudinais e estas características devem manter-se estáveis durante a vida útil de uma via ferroviária.

As primeiras fixações eram realizadas com pregos que fixavam os carris às travessas de madeira, mas este sistema não funcionou e passaram a usar parafusos que dispunham de uma aba que apertava o carril contra a travessa. Eram designados de tirafundos. Contudo, este sistema também apresentava deficiências, uma vez que a madeira perde a sua elasticidade e, devido à passagem dos rodados, as travessas afundam ligeiramente, comprimindo as fibras superficiais das travessas de madeira. Este efeito, em conjunto com o efeito da frenagem dos comboios e com as variações de temperatura, leva a que os carris se movam longitudinalmente, levando a uma redução significativa das juntas, ao

alargamento de outras e até mesmo ao arrastamento das travessas, provocando variações na dimensão da bitola

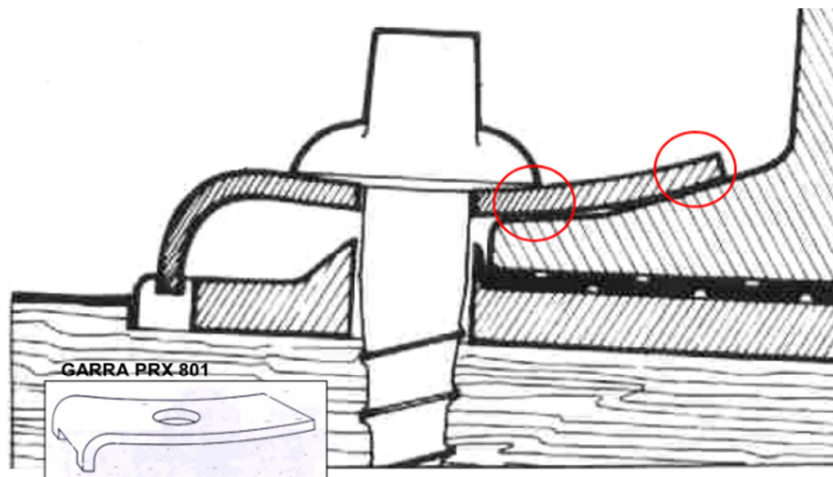


Imagem 43 – Travessa de madeira com chapim [29]

. Para solucionar este problema, passou-se a usar chapins metálicos que ligam o parafuso à travessa, como se verifica na imagem 43. Na imagem seguinte demonstra uma fixação usada em travessas de betão armado.

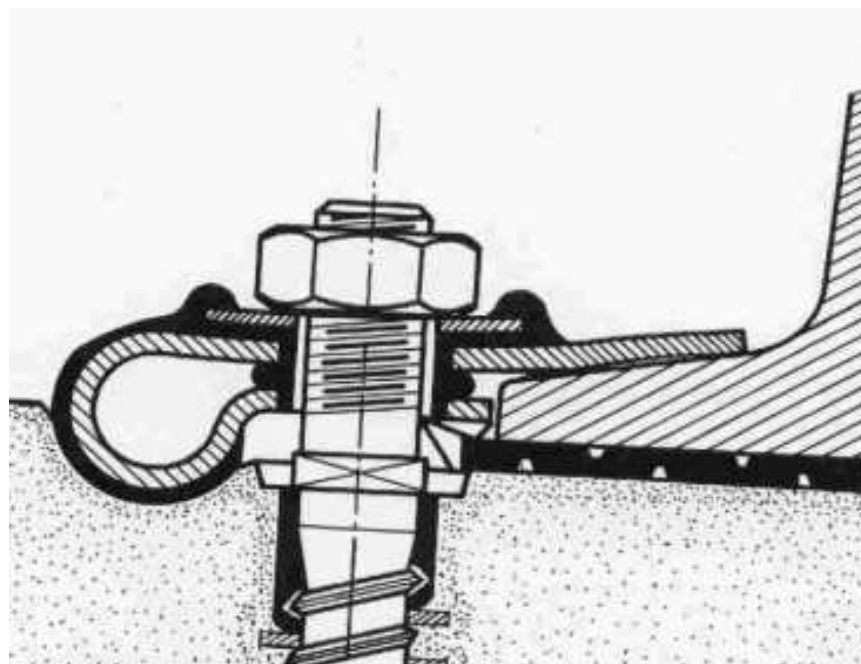




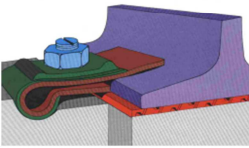
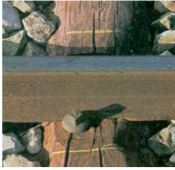


Imagem 44 – Travessa em betão com fixação PRX [28]

O tipo de fixação do carril pode ter essencialmente duas classificações possíveis que dependem especialmente do tipo de travessa que está a ser utilizada. Existem as fixações rígidas utilizadas principalmente nas travessas de madeira, e as fixações elásticas utilizadas em travessas de betão. As fixações mais usuais são as RN, Nabla, HM de Vossloh I e II e loarv 300 Vosloh. Na tabela 10 representam.se algumas das fixações existentes.

Tabela 10 – Exemplo de fixações [28]

<b>Fixações</b>	
RN	 <p>Diagrama técnico que mostra uma seção transversal de uma travessa de madeira com uma fixação RN (Rail Nut) e duas vistas laterais da fixação em si.</p>
NABLA	 <p>Fotografia de uma fixação Nabla instalada em uma travessa de madeira, mostrando o carril e o mecanismo de fixação.</p>
VOSSLOH SYSTEM 300	 <p>Fotografia de três fixações Vossloh System 300 instaladas em uma travessa de concreto, mostrando o carril e o mecanismo de fixação.</p>
PANDROL FAST CLIP	 <p>Fotografia de uma fixação Pandrol Fast Clip instalada em uma travessa de madeira, mostrando o carril e o mecanismo de fixação.</p>
PRX	 <p>Diagrama 3D colorido que mostra a fixação PRX instalada em uma travessa de concreto, com o carril e o mecanismo de fixação.</p>
Parafuso	 <p>Fotografia de uma fixação Parafuso instalada em uma travessa de madeira, mostrando o carril e o mecanismo de fixação.</p>

### **3.3.8. Balastro e sub-balastro**

O balastro é o elemento da via constituído por uma camada de material granular. Apresenta diversas funções de elevada importância que determinam o comportamento eficaz da via ferroviária.

O balastro tem como funções: distribuir as cargas verticais transmitidas pelas travessas, auxiliar a drenagem da água que cai diretamente sobre a via, garantir a flexibilidade e amortecimento devido à ação dos veículos, absorver as vibrações mecânicas e sonoras, facilitar a manutenção da geometria da via. Além destas funções, possui características benéficas tais como: reduzida sensibilidade ao gelo, inibição de crescimento de vegetação e facilidade de colocação e remoção.[26]

A relação granulométrica do material e da sua composição são de extrema importância para o correto desempenho deste elemento da via. A solução mais utilizada é a pedra britada. As partículas do balastro devem possuir angulosidade e arestas vivas e não devem apresentar uma forma nem laminar nem cúbica. A curva granulométrica deste material deve ser uniforme e não deve conter materiais com dimensões muito grandes nem muito pequenas. A dimensão varia entre os 22 e os 60 mm aproximadamente.

A migração de finos é um dos problemas que mais afeta o balastro devido à má drenagem, em que esta situação leva à contaminação do balastro.

O sub-balastro tem com funções: filtragem e separação entre o balastro e a plataforma, escoamento das águas pluviais até aos órgãos de drenagem longitudinal, mitigar as cargas de tráfego, proteger a plataforma contra o gelo, manter o nível freático numa cota equilibrada, evitando a subida deste. Na imagem 45 representa-se um corte transversal tipo de uma via ferroviária onde se pode verificar a aplicabilidade do sub-balastro

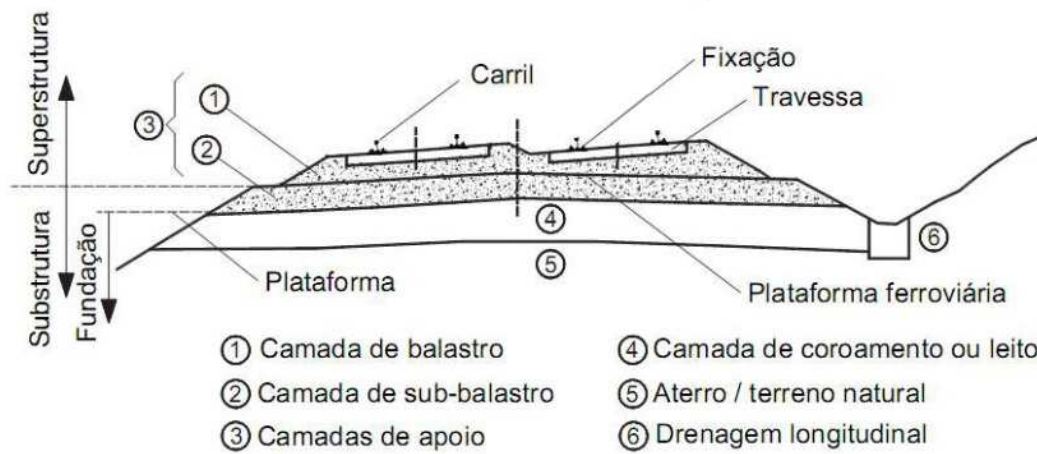


Imagem 45 – Corte transversal de uma via ferroviária balastrada [30]

Na imagem 46 verifica-se a presença de uma camada de balastro contaminado entre a camada de balastro e sub-balastro.

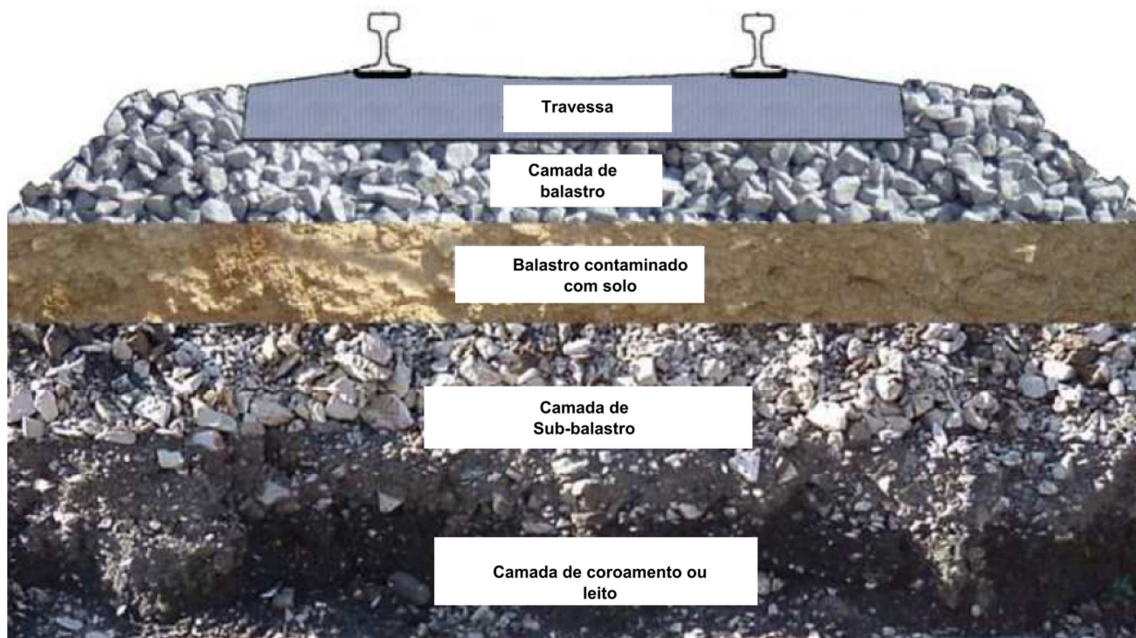


Imagem 46 - Corte transversal de um via ferroviário com o balastro contaminado com solo [30]

Existem também o sistema não balastrado de alta velocidade presente no ICE o comboio de alta velocidade alemão, em o sistema utiliza laje de betão em vez do convencional balastro.

Atualmente existe outra tecnologia já em uso comercial que pode eventualmente revolucionar as atuais linhas ferroviárias: o Maglev, nome que deriva de *Magnetic Levitation*, em português Levitação Magnética. Esta tecnologia distingue-se do sistema convencional essencialmente devido ao facto de que não há atrito entre o veículo e a via, sendo que o veículo levita sobre a via sendo impulsionado por forças eletromagnéticas. Esta nova tecnologia tem como vantagens uma maior eficiência energética, custos de manutenção consideravelmente mais baixos e um menor ruído do veículo sobre o carril.



## 4. Sistemas de Levitação Magnética

### 4.1. Magnetismo

O magnetismo sempre fascinou o homem. O primeiro a escrever sobre o magnetismo no ocidente foi Peter Peregrinus em 1269, referindo as propriedades que esta força tem de apontar sempre para o Norte. Em 1600 foi publicado o livro *De Magnete*, onde se fala do comportamento da bússola com as forças repulsivas e atrativas e da distinção entre ação magnética e ação elétrica. Já no século XIX, o professor dinamarquês Hans Christian Oersted conseguiu provar em 1820 através de experiências que a passagem de uma corrente elétrica por um fio cria um campo magnético.

André-Marie Ampère, em França, entre 1821 e 1825, mostrou e explicou o efeito de uma corrente sobre um íman e o efeito oposto, de um íman sobre uma corrente. Michael Faraday seguiu-se ao Ampère, argumentando que se uma corrente elétrica num fio provocava um campo magnético, o inverso também poderia ser conseguido. Para provar a sua teoria, enrolou espirais de fio de cobre a uma haste de ferro e dois ímanes em forma de barra, provando assim que os ímanes podiam produzir eletricidade.[31]

Em 1842, Samuel Earnshaw, cientista e também homem do clero, comprovou um importante facto acerca da levitação magnética. Demonstrou que era impossível obter a estabilidade entre duas forças de levitação magnética, pois o objeto levitado tinha deslocamentos instáveis no mínimo numa direção.[32][33].

Em meados de 1855, Jean Bernard Leon Foucault observou que era necessário mais força para fazer rodar um disco de cobre na presença de um íman em comparação com a força necessária para rodar o disco na ausência do íman. Tal situação originou a descoberta das correntes parasitas que ficaram também conhecidas como correntes de Foucault.[31]

A unidade de medida do sistema Internacional que mede a densidade do fluxo magnético é o Tesla, foi assim instituída em homenagem a Nikola Tesla na *Conférence Générale des Poids et Mesures*, Paris em 1960, Nicola Tesla foi um inventor na área da engenharia mecânica e eletrotécnica e o criador da corrente alternada que existe hoje em toda a infraestrutura elétrica.

## 4.2. Levitação Magnética

A levitação magnética define-se como o estado de suspensão de um corpo no espaço a uma certa distância da superfície. Para se atingir este estado de suspensão, recorre-se a forças magnéticas que compensam a força da gravidade. O campo magnético exerce uma força suficientemente forte para levitar e estabilizar o corpo numa determinada posição em relação à superfície.[34]

Em Março de 1912, o engenheiro e também inventor Emile Bachelet conseguiu registrar uma patente designada por “*Levitated Transmitting Apparatus*”, mostrando ao público de Nova Iorque um modelo de um comboio Maglev, como se pode verificar na imagem 47.

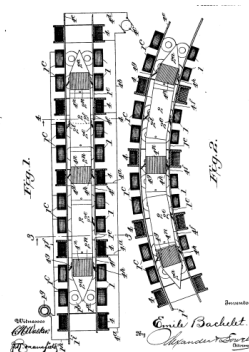


Imagem 47 – Imagem da patente de Emile Bachelet [35]

Uma das primeiras aplicações da levitação magnética foi desenvolvida por Gene Covert e pelos seus colegas do MIT que criaram o sistema “magnetic suspension and balance

system”. Este sistema foi usado no suporte de aeronaves em túneis de vento. Contudo, devido a interferências, este sistema por vezes produzia mais atrito do que repulsão. [32][33]

Em 1960, James Powell e Gordon Danby conseguiram contornar a demonstração de Samuel Earnshaw. Moveram e levitaram um íman através da introdução de um condutor elétrico, produzindo assim correntes parasitas ou correntes de Foucault, obtendo correntes repulsivas sobre o íman fazendo este mover-se. Este sistema foi a base do atual sistema de Maglev japonês em desenvolvimento pela *Japan National Railway*. [32][33]

A tecnologia Maglev foi proposta pela primeira vez por Emile Bachelet. Passado alguns anos, o alemão Werner Kemper propôs um tipo de comboio levitado magneticamente. Conseguiu a patente do comboio de levitação magnética a 14 de Agosto de 1934. [36] A evolução da sua patente resultou na criação do sistema de levitação magnética atualmente existente no Transrapid, na imagem 48 demonstra a construção da linha levitação magnética em uso comercial atualmente.



Imagem 48 – Construção da infraestrutura do Transrapid em Shanghai [37]

Outro sistema Maglev com uso comercial é o sistema HSST (*High Speed Surface Transportation*). É um sistema japonês que em 2005 iniciou o seu uso comercial chamado

Linimo. Trata-se de um sistema urbano com a velocidade máxima de 100km/h. É idêntico ao sistema utilizado no Transrapid, usando as forças atrativas para se deslocar na linha, distinguindo-se do Transrapid pela velocidade máxima que cada veículo consegue atingir e pelas diferenças que existem nos motores lineares, na imagem 49 pode-se verificar este sistema em funcionamento. [38]



Imagem 49 – Sistema Maglev urbano Linimo [38]

O desenvolvimento da tecnologia de levitação magnética no âmbito das linhas “ferroviárias” teve diferentes evoluções que conduziram a soluções distintas de levitação magnética. Conseguiu-se, assim, diferentes tipos de tecnologias de levitação magnética, existindo três tecnologias atualmente em desenvolvimento e algumas já em uso comercial como é o caso do Transrapid alemão. Os sistemas em desenvolvimento são o EDS, o EMS e o INDUCTRACK.

A designação EMS vem de *Electromagnetic Suspension*, sendo o sistema usado no Transrapid. Diz respeito às forças de atração magnética para a levitação. Este sistema recorre a eletroímãs que são controlados eletronicamente e individualmente. Este tipo de

levitação é por natureza instável e requer um sistema de controlo eficaz com grande precisão para manter o comboio Maglev suspenso.

O sistema EDS significa *Electromagnetic Suspension* e é utilizado pelos Japoneses no SCMAGLEV da JR (*Japan Railway*). Recorre à repulsão magnética que consiste na utilização de bobines supercondutoras que criam forças repulsivas impulsionando o veículo. As bobines estão localizadas no interior do comboio que criam um forte campo magnético na ligação com as barras ferromagnéticas existentes nos trilhos que levitam o veículo.

O sistema INDUCTRAK é a tecnologia mais recente de levitação magnética. Não usa ímanes supercondutores ou eletroímanes, mas ímanes permanentes à temperatura ambiente, semelhantes a ímanes comuns, mas mais potentes. Estes ímanes produzem um campo magnético oscilante e, por consequência, levitam o veículo. A principal vantagem da tecnologia Inductrack em relação às outras é que, por ser um sistema de forças repulsivas ativado por indução, ele é estável, sendo desnecessária a utilização de circuitos de controlo para alcançar a estabilidade.

### **4.3. Aplicações da tecnologia de levitação magnética**

A levitação magnética tem múltiplas aplicações além do transporte em massa terrestre “ferroviário”, pois é uma tecnologia que consegue levitar um corpo ou vários corpos com um baixo consumo energético. A aplicabilidade é diversa e com tendência a ser alargadas à medida que esta tecnologia se expande e desenvolve, tornando-se mais eficaz e chamando cada vez mais o interesse de investidores.

A utilização desta tecnologia está presente na:

- Engenharia de transportes como por exemplo no Maglev;

- Engenharia do ambiente como por exemplo nos aeros geradores;
- Engenharia aeroespacial, sendo um bom exemplo o estudo do lançamento de naves espaciais, foguetões, como se pode verificar na imagem seguinte;
- Engenharia civil e mecânica, dando o exemplo de elevadores com motores lineares, rolamentos magnéticos e indústria automóvel;
- Engenharia biomédica, com o estudo de corações artificiais que usam o sistema de levitação magnética como base.[32]



Imagem 50 – Lançamento de aeronaves da NASA [32]

Na imagem 51 pode-se verificar um esquema de um elevador de levitação magnética, este sistema poderá vir a substituir os atuais elevadores que funcionam com cabos de suspensão. Os cabos têm limitações quando usados nos novos arranha-céus e este sistema permite maior economia, baixo consumo energético e velocidades mais rápidas. Existem diversos protótipos deste sistema em testes.

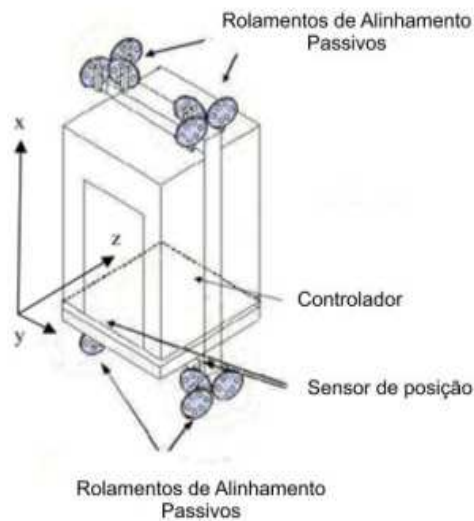


Imagem 51 – Esquema de movimentação de um elevador de levitação magnética [39]

#### 4.4. Vantagens do sistema de levitação magnética

Os comboios de levitação magnética têm várias vantagens em comparação com o convencional sistema de ferrovias por ser um sistema onde não há contacto com o carril, logo não há atrito entre materiais.

Existem já diversos estudos que comprovam que os sistemas de levitação magnética produzem menos ruído (cerca de 85% menos) quando comparados com os sistemas ferroviários de alta velocidade.

Conseguem também vencer maiores inclinações longitudinais em comparação com o sistema de linhas ferroviárias (cerca de 10 % de inclinação podendo chegar aos 12%), enquanto na ferrovia o máximo é na ordem dos 2,5%.

Atingem velocidades elevadas numa distância mais curta do que os sistemas ferroviários de alta velocidade. O Transrapid atinge 300 km/h em 5 km enquanto o ICE precisa cerca de 30 km.

O sistema de levitação magnética possui maior segurança em comparação com os sistemas ferroviários de alta velocidade, porque é sistema que é quase impossível de “descarrilar” devido a forma de agarra que o veículo possui e envolve o trilho.

As linhas de levitação magnética têm um custo operacional consideravelmente reduzido em comparação com as linhas ferroviárias cerca de 60% menos, devido ao baixo consumo energético do sistema, ao desgaste relativamente baixo. Contudo, os custos de construção são mais caros para o Transrapid em cerca de 60%, comparativamente com o ICE.[40] [41]

Os veículos do sistema ferroviário convencional transmitem o seu peso ao carril através dos eixos, sendo estas cargas pontuais. O Maglev transmite uma carga uniformemente distribuída ao “carril”, o que resulta em menores esforços. Além disso, salienta-se que o veículo Maglev é consideravelmente mais leve do que o veículo convencional ferroviário, porque não possui rodas nem motores. Pode dizer-se que para a construção de uma infraestrutura onde circule um veículo com a tecnologia Maglev, esta estrutura será mais esbelta e mais económica.

As secções em túnel necessária para o sistema Maglev são significativamente mais reduzidas em comparação com as secções que existem no sistema ferroviário, garantindo economia e rapidez na construção. A secção do sistema de levitação magnética é aproximadamente circular e do sistema de alta velocidade convencional é geralmente retangular.[42][43]

Os raios mínimos das curvas para o sistema Maglev são mais pequenos, logo traduz um traçado mais eficiente e menos área de terreno a expropriar. [42]

Assim, pode afirmar-se que apesar do sistema Maglev ser cerca de 60% mais caro na implementação, sendo este o único aspeto desfavorável desta tecnologia, todos os outros aspetos são grandes vantagens para o sistema Maglev. O consumo elétrico e a emissão de gases de estufa estão intrinsecamente ligados e este sistema garante um consumo elétrico reduzido face ao sistema ferroviário atual, garantindo também uma maior sustentabilidade energética e ambiental nesta área de transportes.

## **4.5. Projetos propostos com a tecnologia Maglev**

Existem diversos projetos com a tecnologia Maglev, embora só alguns estão com perspectivas de serem concretizados. A seguir, referem-se alguns projetos e quais as tecnologias implementadas em cada projeto descrevendo as suas características mais relevantes.

### **4.5.1. Estados Unidos da América**

#### **4.5.1.1. Califórnia-Nevada Maglev Project**

Projeto que vai ligar o estado da Califórnia ao estado do Nevada com 56 km de comprimento, na primeira fase, com 2 estações, 11 minutos de viagem, 3 veículos com 8 secções cada um, prevendo-se um custo de construção \$1,3 mil milhões de US Dólares, conforme se pode verificar na imagem 52 [44]



Imagem 52 – Traçado do projeto Califórnia-Nevada [44]

#### 4.5.2. Reino Unido

O Reino Unido não tem linhas de alta velocidade e existe um projeto que visa ligar Glasgow a Londres, resultando numa linha de aproximadamente de 800 km de extensão, como tentativa de solucionar a concessionada linha ferroviária atual.

O projeto prevê cerca de 14 estações, ligando Londres-Glasgow em 160 minutos, como se demonstra na imagem 53.[45]



Imagem 53 – Linha de Londres-Glasgow [45]

## 5. Tecnologias Maglev (EMS/EDS/Indutrack)

### 5.1. Sistema EMS

O sistema EMS significa (*Electromagnetic Suspension*) e este sistema que está presente no Transrapid e usa as forças de atração magnética para levitar e movimentar o veículo, resulta na culminação de uma árdua e concentrada investigação com mais de cinquenta anos na Alemanha, de uma tecnologia que teve origem nos Estados Unidos da América. É um sistema extremamente sofisticado e seguro de controlo integral electrónico. [46] A imagem 54 representa o sistema Transrapid já em uso comercial.



Imagem 54 – Tecnologia EMS utilizada no Transrapid

Este sistema surgiu na década de 70, em que os comboios Alemães da Transrapid usam as forças de atração entre os eletroímãs e as barras ferromagnéticas que são controlados individualmente, eletronicamente e que levitam o veículo. Estes eletroímãs encontram-se localizados no veículo e as barras ferromagnéticas dos trilhos. A imagem 55 demonstra um esquema do sistema de levitação utilizado no Transrapid.

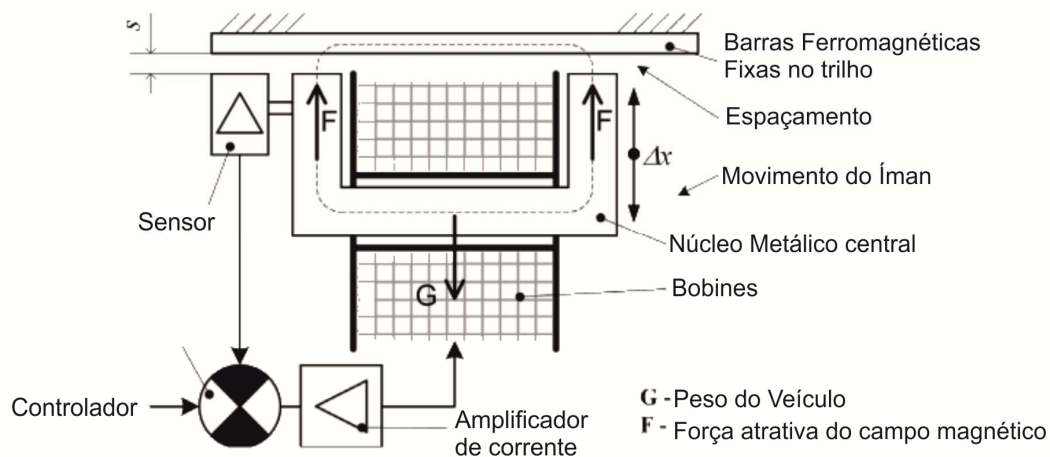


Imagem 55 – Princípio da Levitação EMS [40]

O veículo tem um suporte em forma de agarra que envolve o trilho, onde se localizam os eletroímãs e estes exercem forças de atração sobre as barras ferromagnéticas que estão situadas por baixo dos trilhos garantindo a sustentação e levitando o veículo. Lateralmente há um conjunto de eletroímãs que servem de guia lateral, que tem a função de controlar os movimentos transversais do veículo no trilho, garantindo assim que o veículo se encontra centrado na via enquanto se desloca. A distância entre as laterais do veículo e os trilhos nas laterais é de 10mm, e esta é controlada eletronicamente, enquanto a distância entre o trilho e a parte inferior do veículo distância é de 150mm, o que possibilita passar por cima de pequenos objetos ou pequenas camadas de neve. [47] Na imagem 56 verifica-se uma representação do sistema do Transrapid.



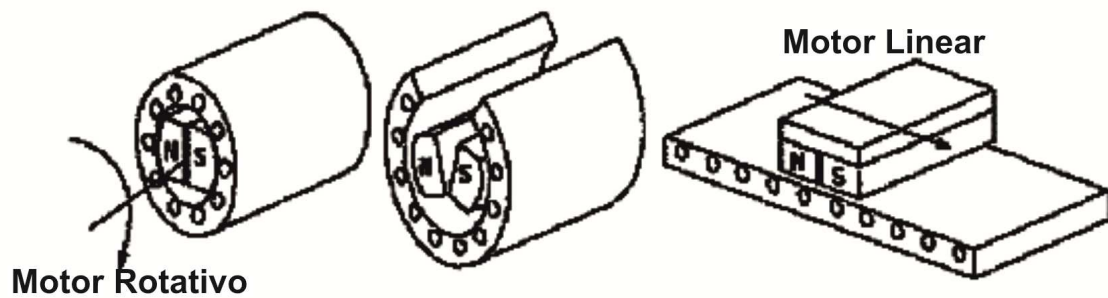


Imagem 57 – Esquema de um motor linear derivado de um motor rotativo [49]

Este motor cria assim um campo magnético, que ao interagir com os ímãs de sustentação existentes no braço de veículo criam forças de atração impulsionando o movimento do veículo. O campo magnético é conseguido através da indução de uma corrente alternada trifásica, a velocidade do veículo é controlada pela frequência dessa mesma corrente alternada do motor linear. A frenagem do veículo é conseguida através da alteração da direção do campo magnético, não havendo contato físico entre os dois lados do motor. O motor estator longo linear instalado nos trilhos está dividido por seções, sendo estas alimentadas pela corrente elétrica apenas quando o veículo se encontra na seção em questão. Para isto são necessárias subestações com potências variadas conforme o traçado da via, pois podem ser traçados que solicitem frenagens consideráveis e grandes acelerações do sistema de propulsão, situação que requer uma maior potência da rede elétrica, em comparação com os traçados da via em que a viagem é constante.[50]

Na imagem 58 está representado um esquema de como a corrente se desloca e alimenta o veículo ao longo dos trilhos. Verifica-se que existe uma subestação para cada seção de trilho e que cada seção é alimentada individualmente.

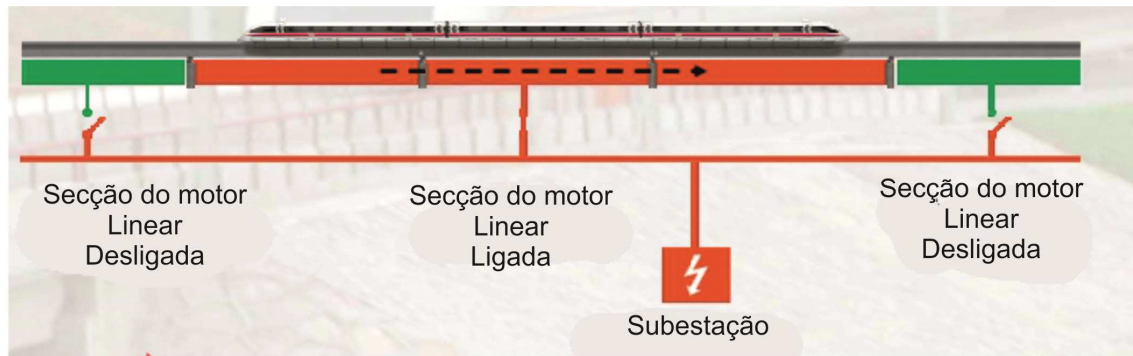


Imagem 58 – Secções do motor Linear na via [51]

Este sistema é alimentado sem o recurso as linhas áreas como o sistema de alta velocidade que usa catenárias e o respectivo pantógrafo existente no veículo. A energia é transmitida para a via e sucessivamente para o motor linear, no caso de falha de energia elétrica, o veículo possui baterias que fornecem energia durante cerca de uma hora, as baterias do veículo são recarregadas sempre que o veículo se move na via, pelos geradores lineares. [51][48][50]

Este sistema está já em uso comercial e tem-se mostrado eficaz e fiável, assim como os resultados são muito promissores quer na redução dos custos de manutenção assim como nos custos operacionais.

## 5.2. Sistema EDS

O sistema EDS (*Electrodynamic Suspension*) é usado no Maglev Japonês, recorre a repulsão magnética ao contrário do sistema EMS, este sistema usa bobines supercondutoras que originam forças magnéticas repulsivas fazendo mover o veículo. O veículo necessita de rodas, porque a baixas velocidades o veículo não consegue atingir a

levitação, em que esta só se consegue após o veículo atingir uma velocidade superior a 120 Km/h. [48] Na imagem 59 está representada um esquema do sistema EDS.

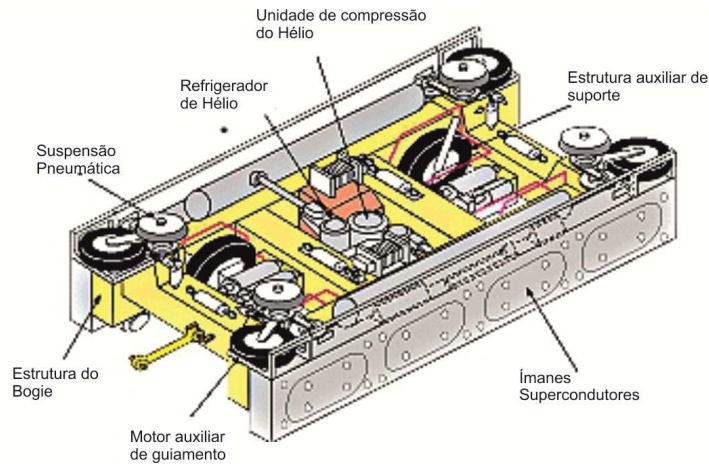


Imagem 59 – Esquema do bogie do MXL01 [52]

O EDS baseia-se nas forças repulsivas de *lorentz*, resultantes da interação das bobinas supercondutoras em movimento com as bobinas existentes trilhos em alumínio.[40] Na imagem 60 representa-se o sistema MLX01 do sistema de levitação magnética Japonês, na linha de testes de *Yamanashi*.



Imagem 60 – Tecnologia EDS usada no JR-Maglev MLX01 Sistema Japonês

A interação entre as bobines supercondutoras existentes no veículo e as bobines existentes no trilho, cria um forte campo magnético que é induzido pelas bobines supercondutoras do veículo, que faz com que as bobines existentes nos trilhos sofram uma inversão de polaridade, criando forças repulsivas que levitam o veículo. As bobines existentes nos trilhos são passivas, não são supercondutoras e possuem uma configuração em “8”, o que faz com que a corrente induzida pelas bobines existentes no veículo provoque uma força simultânea que puxa o veículo para cima e o empurra para baixo, como se pode verificar na imagem 61.

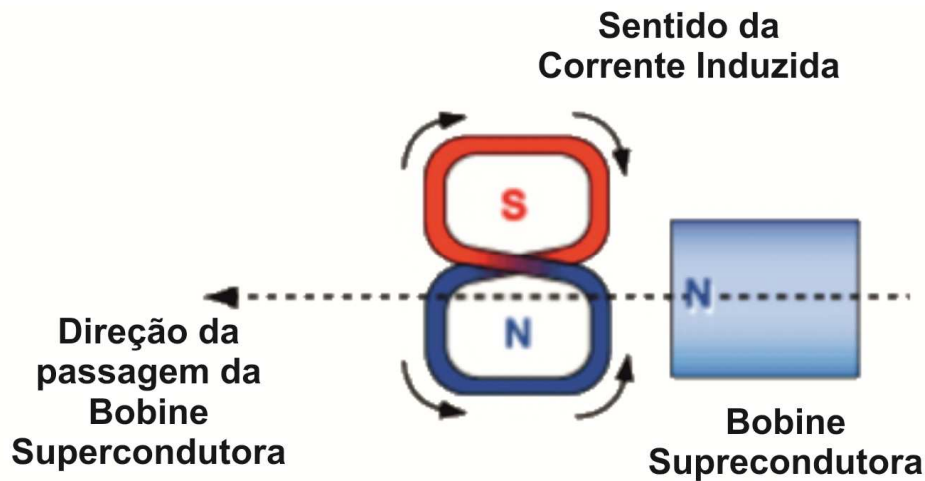


Imagem 61 – Exemplo da bobine em “8”[53][49]

O sistema EDS utilizado no JR-Maglev MLX01 utiliza nas laterais dos trilhos dois tipos de bobines que têm funções distintas. Têm a função de guiar e propulsionar o veículo no trilho e além destas bobines, o trilho apresenta um suporte para as rodas, que o MLX0 usa quando se desloca a velocidades sensivelmente inferiores a 120 Km/h como se pode verificar na imagem 62. [54][49]

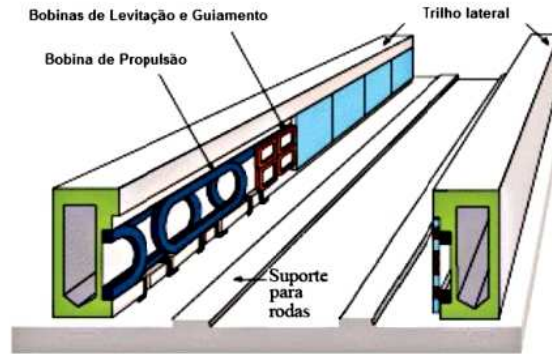


Imagem 62 – Esquema do trilho utilizado no JR-Maglev MLX01 [53][49][55]

As bobinas de propulsão localizadas nas laterais dos trilhos são alimentadas por uma subestação elétrica de corrente trifásica, criando a variação de polaridade que vai dar origem ao campo magnético que faz movimentar o veículo, quando entram em contacto com os supercondutores existentes no veículo. A movimentação do veículo é realizada pela alternância de polaridade nas bobinas laterais dos trilhos, conforme se pode verificar na imagem 63. As bobinas laterais do lado esquerdo e direito do trilho vão alternando a polaridade, provocando assim forças de atração ou forças de repulsão, nos supercondutores existentes na lateral do veículo, impelindo o movimento. [54][49]

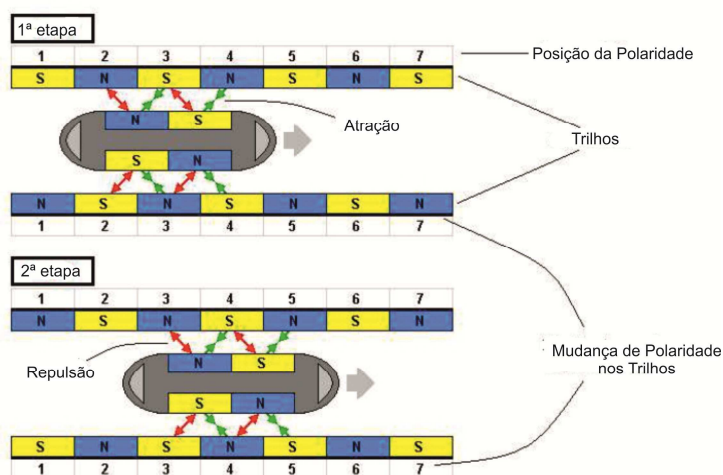


Imagem 63 – Esquema de funcionamento do Sistema EDS e como se processa a mudança de polaridade[56]

### 5.2.1. Os supercondutores

A supercondutividade ocorre em certos materiais e a muito baixas temperaturas, precisamente quando esses materiais têm uma resistência à corrente elétrica igual a zero. A este efeito chama-se *Efeito Meissner* e pode ser descrito como a expulsão de qualquer campo magnético fraco de dentro do material supercondutor para fora, conforme se verifica na imagem 64, este fenómeno ocorre quando esse material atinge a denominada temperatura crítica ( $t_c$ ) em que faz com que esse material expulse o seu campo magnético e adquira uma resistência nula. Houve desenvolvimentos significativos na investigação da supercondutividade, em que até à pouco tempo apenas se tinham descoberto materiais supercondutores em que a supercondutividade acontecia aos 25 Kelvin cerca de  $-248^\circ$  Celsius. [57][58][59]

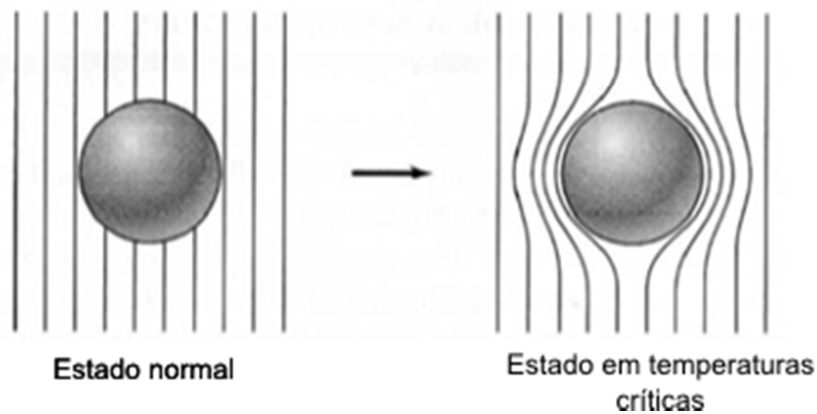


Imagem 64 - Efeito Meissner [57]

Contudo têm aparecido novos materiais com que se tornam supercondutores a temperaturas um pouco mais elevadas cerca de 138 Kelvin cerca  $-135^\circ$  Celsius. Os supercondutores podem ser divididos em 2 tipos; os condutores tipo 1 e os condutores tipo 2. [59][57][48]

Nos supercondutores do tipo 1, a supercondutividade dá-se subitamente numa determinada temperatura crítica, aplicando aqui o *efeito de Meissner*, sendo este o efeito que causa a levitação do íman, quando este é colocado sobre um supercondutor. Tal situação deve-se pelo simples facto destes materiais que expulsarem o campo magnético externo como já foi mencionado. Existem também outros materiais que expulsam o campo magnético externo, materiais como o vidro, a madeira e a água, o que faz que o campo magnético externo seja diferente do campo magnético interno, a este efeito denomina-se diamagnetismo. Este fenómeno tem origem no alinhamento orbital dos eletrões que criam pequenos “*loopings*” de correntes. Elas criam campos magnéticos e em conjunto com a aplicação de um campo magnético externo tende a alinhar-se de forma a se oporem ao campo aplicado. Os condutores normais, além de possuírem um alinhamento orbital dos eletrões, induzem também correntes de blindagem no material e conseguem cancelar parte do campo magnético no seu interior. Se se considerar um condutor ideal onde a resistência é nula, o cancelamento do campo é total, dando origem ao chamado “diamagnetismo perfeito”. Nos supercondutores do tipo 1, o cancelamento do campo magnético também é total, porém esse comportamento é distinto do diamagnetismo perfeito. [48][59][57]

Nos supercondutores tipo 2, a transição do material para supercondutores é gradual, e pressupõe um estado intermédio. Refere-se ainda, que o *efeito Meissner* não é perfeito, visto que estes materiais permitem a entrada de algum tipo de campo magnético. Além destas distinções relativamente aos supercondutores tipo 1, os supercondutores tipo 2 têm temperaturas críticas mais elevadas do que as do tipo 1. [59][53][57]

A tecnologia presente no sistema Maglev Japonês, na linha de testes de Yamanashi desenvolvido pela “*Central Japan Railway Company and Railway Technical Research Institute*”, utiliza supercondutores para levantar o veículo. O sistema utilizado designa-se por SCM “*Super Conducting Magnet*”, como se pode na imagem 65.



Imagem 65 – SCM “*Super Conducting Magnet*” existente na lateral do veículo [49]  
Na imagem 66 pode-se verificar um esquema onde se identificam alguns dos componentes do SCM “*Super Conducting Magnet*” usado no veículo.

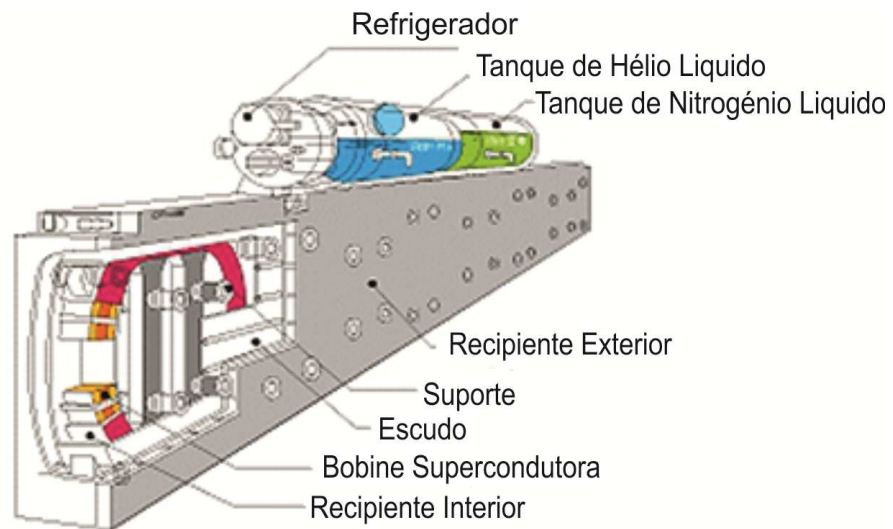


Imagem 66 – Elementos constituintes do SCM[49]

A imagem 67 mostra uma perspectiva do trilho da linha de teste de Yamanashi, como se pode verificar possui duas superfícies contínuas para permitir a circulação das rodas do veículo.



Imagem 67 – Linha de teste de Yamanashi [60]

Cada SCM existente na lateral do veículo contem 4 bobinas supercondutoras e como se pode verificar nas imagens 64 e 65 existindo dois cilindros na parte superior do SCM que têm Hélio líquido e Nitrogénio líquido, na extremidade de um dos cilindros encontra-se o refrigerador, que tem como função reliquifazer o Hélio no estado gasoso quando aquece devido à absorção do calor e as perturbações da viagem.[53]

Este sistema possui dois tipos de bobines diferentes nos trilhos como se pode verificar na imagem 68, em que tem funções distintas, as bobines mais junto ao veículo têm a função de o levantar, as bobines na parte exterior do trilho têm a função de propulsionar o veículo e ao mesmo tempo as bobine conseguem guiá-lo entre os trilhos de forma a evitar o contacto deste com as laterias do trilho, como se pode verificar nas imagem 67. [49]

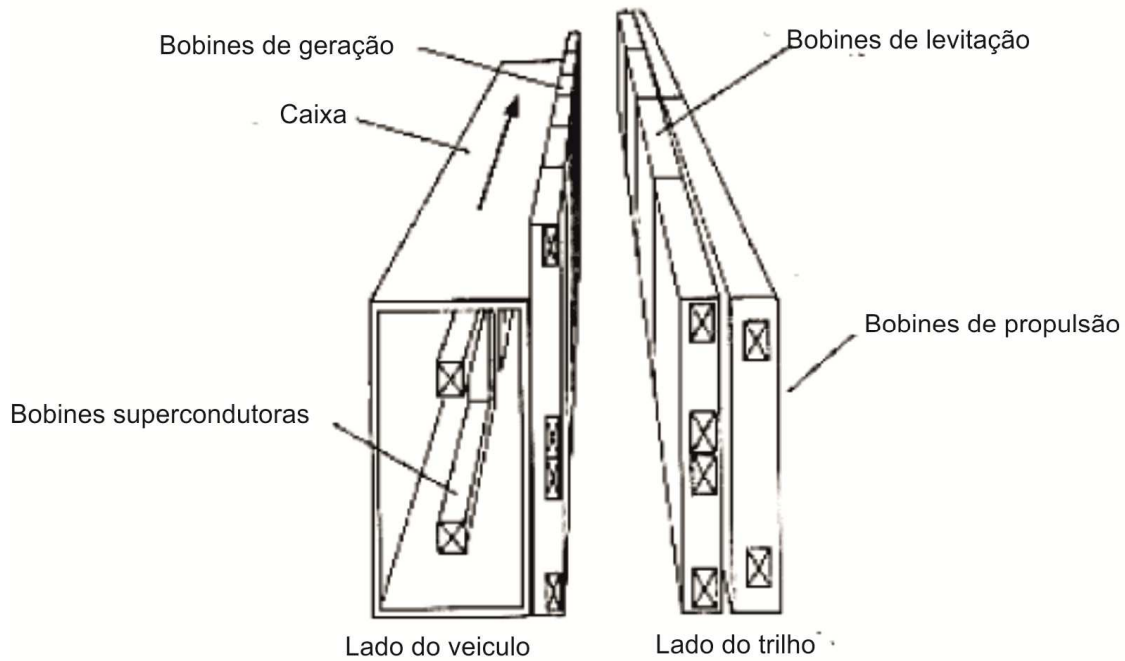


Imagem 68 – Bobines do veículo MLX01 e do respetivo trilho[49]

As bobines do sistema MXL01 existentes no trilhos da pista de teste de Yamanashi, estão dispostas lado a lado no trilho quer no lado esquerdo, quer no lado direito do trilho, como se pode verificar na imagem 67. As bobines estão assim dispostas em camadas sobrepostas para que haja uma redução de perturbações eletromagnéticas externas. Ambas as bobines de propulsão e levitação são enroladas com fios alumínio e depois moldadas com resina. As bobines de propulsão têm de ser isoladas eletricamente e têm de ser mecanicamente fortes enquanto as bobines de levitação só necessitam de ser mecanicamente fortes. Assim sendo as bobines de propulsão são moldadas com resina *epoxy*, enquanto as bobines de levitação são moldadas com resina poliéster insaturado e reforçado com fibra de vidro.[53] A imagem 69 mostra em secção transversal como funcionam as forças de atração e repulsão no trilho.

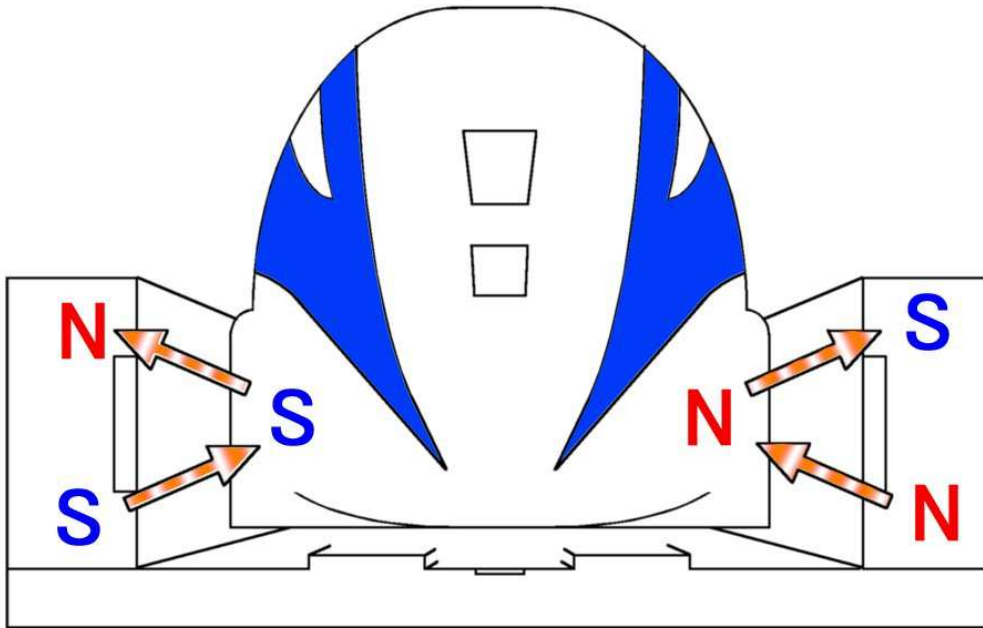


Imagem 69 – Guiamento do veículo MXL01 ao longo do trilho [61]

Este sistema está ainda em fase de testes, não havendo nenhuma linha comercial, mas já existem projetos que pretendem implementar este sistema, nomeadamente o projeto que pretende ligar Washington D.C a Nova Iorque encurtando o tempo de viagem para uma hora.[62]

### 5.3. Sistema Inductrack

O Inductrack foi desenvolvido na década de 1990 pelo Dr. Richard Post no Laboratório Nacional Lawrence Livermore, na Califórnia. O sistema utiliza ímãs convencionais em *Halbach Array*, ou seja, arranjo Halbach, sendo que para conseguir levitação, estes ímãs convencionais estão dispostos numa determinada forma criando um campo magnético muito específico conhecido como o arranjo Halbach. Estes criam assim levitação, ao

contrário dos outras tecnologias Maglev utilizados pelos Japoneses no EDS e pelos Alemães no EMS, que contam com sensores complicados e sistemas de refrigeração criogénicos, para garantir a levitação e o movimento do veículo nos trilhos. Além disso os ímanes são compostos a partir de um novo material que compreende uma liga de neodímio-ferro-boro, que gera um campo magnético mais elevado.

A peça principal da tecnologia é o Arranjo Halbach, que é o que define o sistema Inductrack e o distinguem das outras tecnologias de Maglev concorrentes. O Arranjo Halbach garante alguns benefícios que incluem o aumento da segurança e da eficiência e custo reduzido. Este sistema foi desenvolvido na década de 1980 pelo físico Klaus Halbach, que consiste num conjunto de ímanes convencionais colocados numa série de repetição e com orientações específicas que criam um forte campo magnético. A imagem 70 ilustra a forma como as linhas de campo magnético anulam o campo magnético por cima e criando ao mesmo tempo um forte campo magnético por baixo dos ímanes o Arranjo de Halbach induz uma corrente elétrica nos circuitos de levitação constituídos por fios Litz levantando assim o veículo.[63]

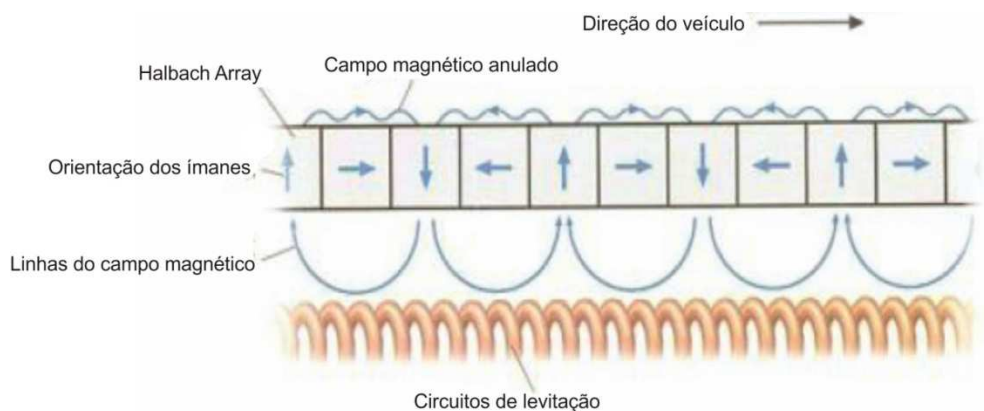


Imagem 70 – Esquema do campo magnético formado pelo Halbach Array (Arranjo Halbach) [63]

Neste sistema ainda não existe nenhum protótipo construído à escala real pois trata-se de um sistema recente, contudo as experiências realizadas com esta tecnologia revelam muitas potencialidades. Na imagem 71 pode-se verificar o veículo teste que foi construído. [63]



Imagem 71 – Veículo experimental Inductrack [64]

Este veículo com o sistema Inductrack quando for construído irá necessitar de com quatro Arranjos Halbach, por cima de uma série uma série de circuitos de levitação constituídos por fios Litz. Dois dos Arranjos Halbach estão posicionados para baixo por cima dos circuitos e têm a função de levitar o veículo, enquanto que os outros dois Arranjos Halbach estão posicionados de lado em relação aos circuitos com o objectivo de equilibrar o veículo de forma a mantê-lo entre os trilhos, como se pode verificar na imagem 72. [63]

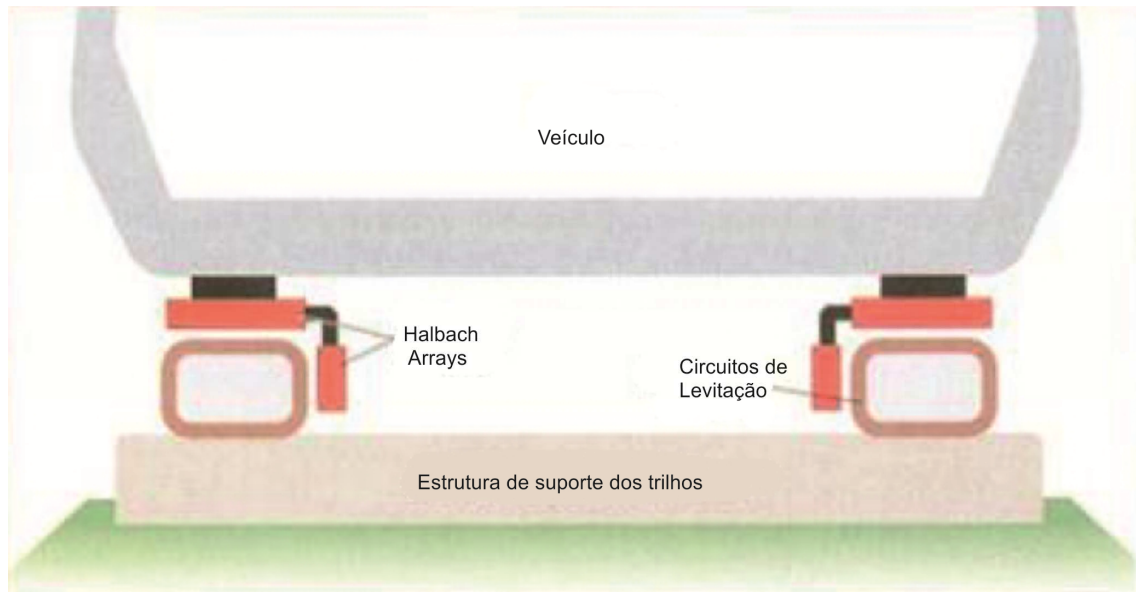


Imagem 72 – Esquema representativo de um veículo com o sistema Inductrack [63]

O sistema pode realizar o movimento através de uma série de métodos. Junto às cidades onde é fácil aceder a correntes elétricas com a potência adequada, podem ser colocadas bobinas entre os circuitos de levitação nos trilhos, de forma a estes impelirem os impulsos eletromagnéticos nos determinados intervalos que se alinham com os Arranjos Halbach impulsionando o veículo para a frente. Nos troços distantes das cidades onde a corrente elétrica pode não ter potência necessária, o comboio pode ser equipado com uma turbina a gás, que iria conduzir o comboio para a frente. [63]

Os efeitos do Arranjo Halbach foram comprovados através de testes extensivos feitos por Dr. Richard Post, o inventor do Inductrack, o qual procurou testar os seus cálculos iniciais, que sugeriam que os Arranjos Halbach poderiam levantar cargas com peso até cinquenta vezes o peso dos ímanes. Para testar essa hipótese, a equipa científica construiu um modelo à escala e lançou-o com uma velocidade de cerca de vinte e duas milhas por hora cerca de 35,4km/h. O modelo demonstrou ser estável e a força de elevação mostrou ser a verificada na teoria.[63]

## 5.4. Comparativo entre as diferentes tecnologias EMS, EDS, Inductrack

Atualmente existem três sistemas Maglev conhecidos, o sistema de suspensão eletrodinâmica (EDS), o Sistema de Suspensão eletromagnética (EMS) e Inductrack. Cada um dos três sistemas tem características diferentes e características muito específicas. Enquanto EDS e EMS usam apenas a interação dos ímanes e supercondutores e Inductrack usa bobinas nos trilhos por baixo de veículo, contudo os três sistemas de suspensão trabalham sob o mesmo princípio de levitação magnética.[65] Na imagem 73 demonstra-se os três sistemas de levitação existentes.

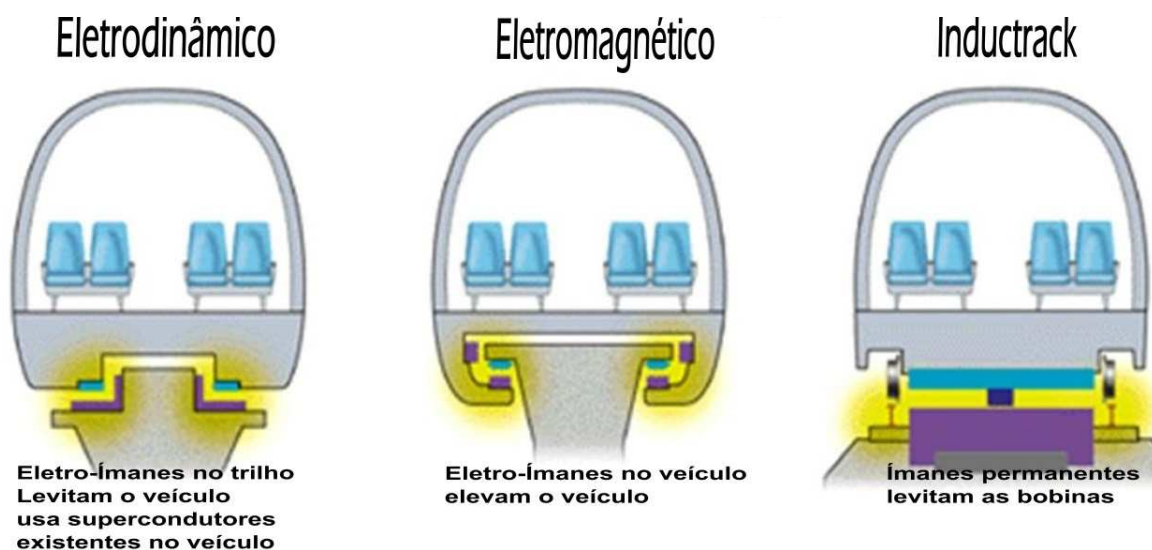


Imagem 73 – Comparativo entre os Sistemas de levitação Magnética [66]

O sistema EMS, designado também por sistema eletromagnético, usa as forças de atração magnética para levantar e movimentar o veículo, possui ímanes que levitam e impulsionam o veículo e ímanes que controlam o movimento transversal do veículo como já foi referido. A partir da imagem 73, pode-se observar que o veículo é “agarrado” ao redor do trilho em

forma de agarra. Devido a isso, o sistema EMS é um sistema muito seguro e confortável. A levitação regulada do sistema faz o veículo levitar, mesmo quando viaja em baixa velocidade, não necessitando de rodas. A intensidade do campo magnético no interior do habitáculo também é pequeno, por isso é seguro para os passageiros com pacemakers ou passageiros que transportam algum tipo de dispositivos de armazenamento magnético, tais como cartões de crédito ou discos rígidos. A sua intensidade é comparável ao campo magnético da Terra e é muito abaixo da intensidade de campo de um secador de cabelo, de uma máquina de furar elétrica ou uma máquina de costura.[65]

No caso de uma falha de energia, o veículo Maglev EMS é equipado com uma fonte de alimentação a de apoio que o torna autos suficiente durante um curto espaço de tempo, que funciona em caso de emergência para que o veículo não deixe de funcionar. O mais bem-sucedido sistema EMS é o sistema Transrapid e atualmente é usado pelo Maglev em Xangai, na China numa linha comercial. Este sistema foi e está ser usado na Alemanha em testes e desenvolvimento.[65]

A suspensão eletrodinâmica (EDS) foi desenvolvida pelos engenheiros Japoneses. O sistema EDS cria forças de repulsão entre ímanes supercondutores e os ímanes do trilho. Estas forças de repulsão, são suficientemente elevadas para superar a força da gravidade e permite levitar o veículo. A principal diferença entre EDS e EMS Maglev é que o EDS usa eletroímãs supercondutores refrigerados, o sistema EDS do Japão economiza energia, no entanto, o sistema criogénico utilizado para arrefecer as bobinas são consideravelmente dispendiosos.[65][49]

Uma das principais diferenças entre o EMS e o EDS é que o sistema EDS, necessita de rodas como meio auxiliar, até que o veículo atinja uma velocidade de cerca de 100 km/h. Passando esta velocidade, o comboio vai levitar e os pneus deixam de estar em contacto com o trilho. No entanto, os engenheiros japoneses dizem que as rodas são uma vantagem,

no caso de uma falha de energia pois permitem o veículo pousar sobre o trilho de forma segura. O sistema EDS é capaz de levitar cerca de 10 cm acima do trilho que consegue eventualmente passar por cima de neve e outros pequenos obstáculos que possam existir no trilho.[65][66]

O sistema EDS induz um campo magnético de alta intensidade, a secção de passageiros do veículo terá que ser protegida, porque pode ser perigoso para os passageiros com pacemakers e pode também provocar danos em dispositivos de armazenamento magnético de dados, tais como cartões de crédito e discos rígidos.[65]

O Inductrack pode-se dizer que é um novo tipo de EDS que usa ímanes permanentes em vez de ímanes supercondutores refrigerados. Estes tipos de ímanes permanentes não foram usados antes, porque os cientistas achavam que eles não criavam uma força gravitacional suficiente para levitar o veículo. O projeto Inductrack contorna este problema ao organizar os ímanes num Arranjo Halbach. Os ímanes como estão configurados no Arranjo de Halbach cancelam o campo magnético por cima do trilho, não havendo qualquer perigo para os passageiros devido ao campo magnético provocado pelo sistema Inductrack, sendo campo magnético sentido ligeiramente mais elevado do que o campo magnético natural da terra. O Inductrack também utiliza rodas auxiliares como o sistema EDS, porque só consegue levitar após atingir cerca de 3,21 km/h, e tal como no sistema EDS japonês aqui também pode ser visto como um sistema de segurança no caso de existir uma falha de energia.[65][63]

O Sistema EMS utilizado no Transrapid tem como vantagens:[56]

- Os campos magnéticos do sistema dentro e fora do veículo são menores do que no sistema EDS.;
- É uma tecnologia comercialmente disponível que pode atingir altas velocidades, de cerca de 500 km/h;

- Não precisava rodas auxiliares, nem de sistema de propulsão secundário;
- A configuração do veículo em forma de agarra (bloqueios) torna quase impossível o descarrilamento do veículo;
- O ruído deve-se apenas à deslocação da massa de ar provocada pela locomoção do veículo;

As desvantagens do Sistema EMS são:[56]

- A abertura existente entre o veículo e o trilho guia deve ser constantemente monitorada e corrigida por sistemas de computador para evitar colisão devido à natureza instável de atracção electromagnética.;
- Podem ocorrer problemas de vibração;

O sistema EDS utilizado pelo MXL01 tem como vantagens:[56]

- Ímanes supercondutores existentes no veículo permitem grandes velocidades cerca de 581Km/h;
- Capacidade de transportar carga pesada;
- Operações bem-sucedidas com o uso de supercondutores de alta temperatura nos seus ímanes arrefecidos com Hélio líquido:

As desvantagens do Sistema EDS são: [56]

- Os campos magnéticos intensos devido aos supercondutores existentes a bordo do veículo podem colocar em perigo os passageiros portadores de pacemakers ou até danificar dispositivos de armazenamento de dados magnéticos tais como discos rígidos e cartões de crédito;
- O veículo necessita de rodas auxiliares quando circula a baixas velocidades;
- Sistema de custo por km ainda considerado muito elevado;
- Existe um custo e uma inconveniência considerável de ter que manter refrigerado os ímanes supercondutores em 5 Kelvin cerca de -268.15° celsius;

As vantagens do Sistema Inductrack são:[56]

- Utiliza ímanes permanentes e não recorre a ímanes supercondutores;
- Não necessita de sensores para controlar a levitação;
- Não origina um forte campo magnético aos passageiros;

As desvantagens do Sistema EDS são:[56]

- É um sistema recente, não havendo nenhuma linha experimental a escala real, pelo que não se consegue aferir se será eficaz em comparação com os outros dois sistemas de levitação magnética;

A imagem 74 mostra algumas das diferenças entre o Transrapid e SCMAGLEV relativamente as distâncias do veículo ao trilho.

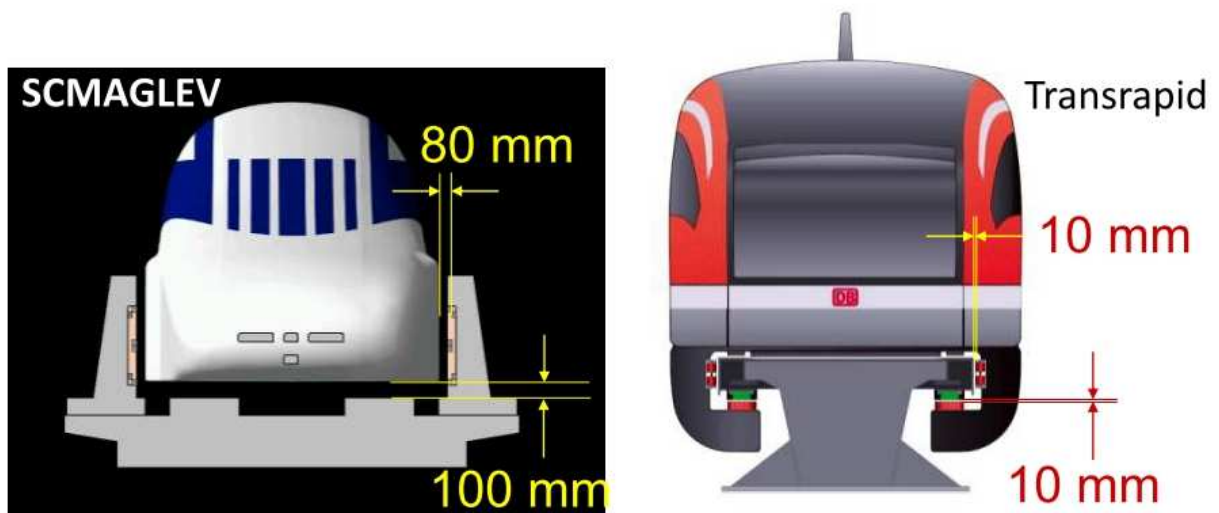


Imagem 74 – Comparativo de distância entre o SCMAGLEV e o Transrapid. [67]

Tabela 11 – Comparativo de características entre o sistema EDS e o sistema EMS [56]

(EMS)	(EDS)
Usa eletroímãs convencionais que foram desenvolvidos pela República Federal da Alemanha	Utiliza ímãs supercondutores desenvolvidos pela Railway Transportation Research Institute, Japan.
O veículo levita cerca de 1 centímetro em relação ao trilho	Levita cerca de 10 cm em relação ao trilho
Consegue levantar o veículo parado.	Só consegue levantar o veículo quando atinge a velocidade cerca de 120 km/h.
Não necessita de nenhum meio auxiliar para conseguir a levitação inicialmente	O sistema necessita de rodas auxiliares inicialmente
O espaço entre o veículo e o trilho é mais escasso, sendo é mais instável.	O espaço entre o veículo e o trilho é maior sendo mais estável
Exige sensores de detecção electromagnética distância do veículo ao trilho	Não necessita de sensores para controlar a distância do veículo ao trilho
É mais sensível a algum eventual desalinhamento do trilho	Não é sensível a algum eventual desalinhamento do trilho.
Não utiliza ímãs supercondutores.	Utiliza ímãs supercondutores
EMS é o usado no sistema Transrapid .	O sistema EDS é utilizada na linha de testes de Yamanashi

A imagem 75 mostra as diferenças que existem na velocidade máxima entre o sistema do Transrapid e do SCMAGLEV, assim como também a distância que cada sistema demora a atingir a velocidade máxima e a distância que demora a parar.

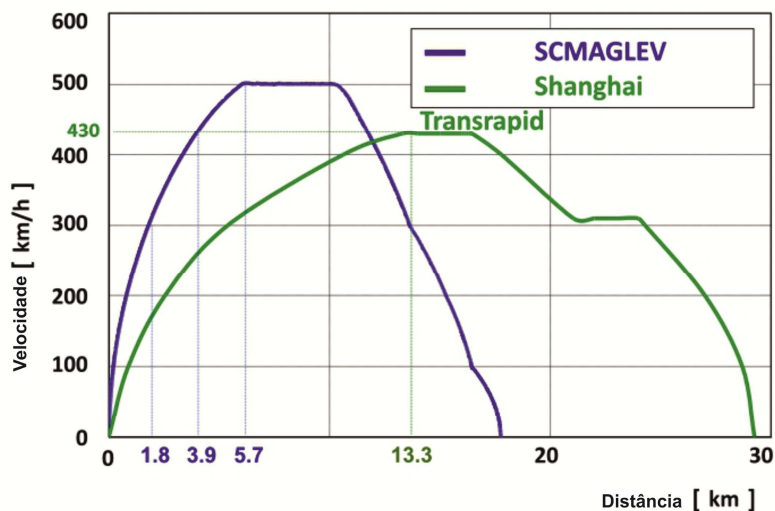


Imagem 75 - Performance de velocidade e aceleração [67]

Tabela 12 – Comparativo técnico entre Sistema EMS, EDS e Inductrack

Sistema	Transrapid (E M S)	MLX01 (E D S)	Inductrack
Levitação	E M S	E D S	E D S
Propulsão	Estator Longo (LSM)	Estator Longo (LSM)	Estator Longo (LSM)
Distância ao trilho	8~12 mm	80~150 mm	80~150 mm
Velocidade Máxima	500 Km/h	581 Km/h	500 Km/h
Serviço	longa distância - Linha comercial em Xangai	Longa distância - Linha de testes em Yamanashi	Longa distância - Linha à escala
Características	Levitação guiada por sensores	Levitação com ímanes supercondutores	Levitação com Arranjo de Halbach

Na imagem 75 e na tabela 12 estão presentes diferenças entre os sistemas EDS e o sistema EMS. Não foi realizada uma comparação com o sistema Inductrack, porque este está ainda em evolução, existindo apenas dados relativos a fases experimentais, com veículos à escala real como se pode verificar na imagem 76.



Imagem 76 – Veículo experimental Inductrack da General Atomics [68]

Das tecnologias acima referidas só existe uma que tem uma linha comercial que utiliza o sistema EMS, por este motivo pode-se referir que será a tecnologia que tem alguma vantagem sobre as outras duas. O sistema EMS além de ter uma linha de alta velocidade, tem também uma linha comercial urbana no Japão que atinge velocidades máximas de 120km/h, este último, a tecnologia presente é Japonesa e não Alemã, mas é na mesma um sistema EMS.[65]

## **5.5. Efeitos Secundários nos Passageiros**

O magnetismo está presente no planeta, aliás sem ele seria impossível existir vida na terra a Magnetosfera protegendo das tempestades solares e, assim como a Héliosfera protege o sistema solar das radiações do cosmos existentes na galáxia, a Via Láctea, a Héliosfera é o campo magnético provocado pelo Sol que envolve todos os planetas do sistema solar. Tanto a Héliosfera como a Magnetosfera produzem um campo magnético que é inofensivo para qualquer tipo de ser com vida existente no planeta Terra.

Os campos eléctricos e magnéticos são gerados por fenómenos como o campo magnético terrestre, trovoadas e o uso da eletricidade. Quando estes campos não variam no tempo, são referidos como estáticos e a sua frequência é de 0 Hertz.[69]

O campo geomagnético natural varia sobre a superfície terrestre entre 0,035 – 0,07 miliTesla, em que um miliTesla equivale a 0,001 Tesla, e é sentido por certos animais que o usam como orientação. Os campos magnéticos estáticos produzidos pelo homem são gerados onde existam correntes DC como em comboios movidos a eletricidade ou processos industriais como na produção de alumínio e soldadura a gás. Estes podem ser superiores e mil vezes que o campo magnético natural da Terra.[69]

O ICNIRP “*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*” tem-se dedicado à questão da exposição a campos magnéticos estáticos. Para a exposição ocupacional, os limites atuais pretendem evitar as sensações de vertigem e náuseas induzidos pelo movimento em campos magnéticos estáticos. Os limites recomendados para exposição ocupacional são de uma média no tempo de 200 miliTesla durante um dia de trabalho, não podendo o valor mais elevado ultrapassar os 2 Tesla. Para o público em geral, o limite para exposição contínua é de 40 miliTesla.[69]

A tecnologia presente no Transrapid com o sistema EMS tem o um campo magnético inferior ao campo magnético de uma televisão, dum secador ou de uma máquina de furar eléctrica. É apenas ligeiramente mais elevado do que o campo magnético da terra, como se

pode verificar na imagem 77, onde o Transrapid gera um campo magnético de cerca 100  $\mu$ Tesla, 1  $\mu$ Tesla equivale a  $1 \times 10^{-6}$  Teslas. [70]

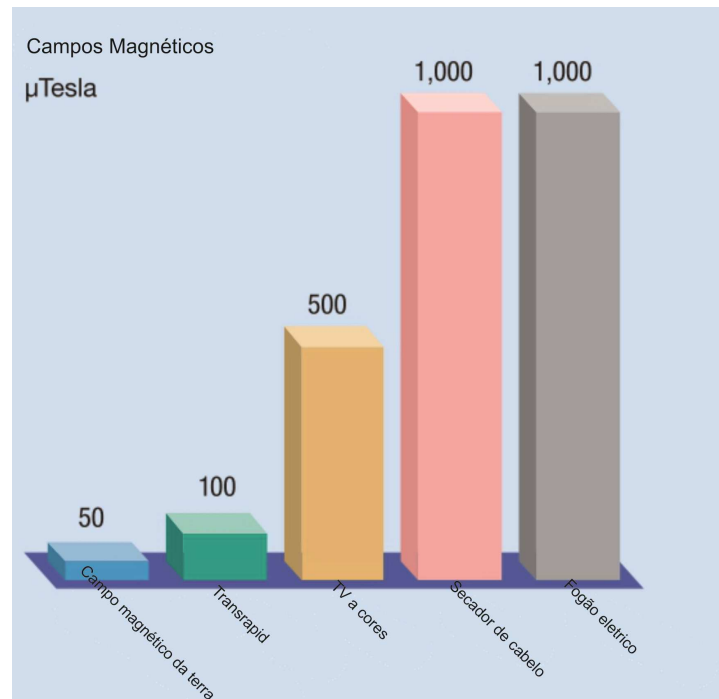


Imagem 77 – Comparação entre campos magnéticos em  $\mu$ Tesla[70]

O sistema Inductrack também possui um campo magnético relativamente baixo mas, ligeiramente superior ao campo magnético da terra, sendo assim inofensivo para os humanos porque a disposição do Arranjo de Halbach não induz um campo magnético para o veículo, mas sim para o trilho. [63]

O sistema EDS do MXL01 tem um campo magnético mais elevado do que os outros dois sistemas, visto que utiliza ímãs supercondutores, mas mesmo assim os valores do campo magnéticos deste sistema está bem abaixo do que a ICNIRP “*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*” considera como nocivo para o ser humano. [67]

Assim sendo pode-se afirmar que os sistemas de levitação magnética não apresentam qualquer risco para a saúde pública, conhecidos até à data. Além disso, os sistemas de levitação magnética trazem diretamente um maior conforto na viagem, porque não há o

efeito lacete nem a falta de atrito, trazendo indiretamente benefícios para saúde no sentido que minimizam o consumo de energia reduzindo assim a emissão de gases de efeito estufa e reduzem também a poluição sonora, porque é um sistema onde não há contacto entre o veículo e o trilho.

## **6. Novo Sistema Proposto (EMS – PRO DYNAMIC)**

### **6.1. Enquadramento**

O objetivo deste capítulo é apresentar uma evolução ao sistema EMS. Como foi referido nos capítulos anteriores, quer o sistema convencional de caminho de ferro, quer a rede de alta velocidade, apresentam limitações físicas que são intrínsecas ao sistema de contacto roda carril, entre outros referem-se aqui, a falta de atrito e os custos de manutenção. Assim sendo propõe-se a reconversão dos caminhos de ferro para um sistema de levitação magnética, e como já foi mencionado em capítulos anteriores, este sistema oferece um conjunto de vantagens quando comparado com o sistema de contacto roda carril.

O sistema a realizar como proposta é muito idêntico aos sistemas de levitação magnética existentes sobretudo, ao sistema existente no Transrapid e ao sistema do SCMaglev japonês.

Este sistema apresentado foi desenvolvido e criado pelo autor desta dissertação e pelo seu orientador Engenheiro Ângelo Jacob e é suscetível de registo de patente, pois apresenta uma nova abordagem aos atuais sistemas de levitação magnética existentes.

A proposta exposta é uma melhoria que consiste numa possibilidade teórica de o trilho conseguir através do magnetismo, aplicar uma rotação ao veículo necessária em curva e ajustar essa rotação à velocidade a que se desloca. Este sistema representa um conceito novo, uma evolução e que colocada em prática tem várias vantagens. A principal vantagem é de que o trabalho, na construção e aplicação do trilho, é uniforme não necessita de sobrelevação ou escala.

Para que este sistema funcione sugere-se a introdução de mais um campo magnético no trilho, que tem como função rodar o veículo em curva e substituir a sobrelevação ou escala

do convencional trilho que existe no Transrapid, esta rotação além das vantagens existentes no processo construtivo, apresenta também a vantagem do veículo ajustar a rotação em função da velocidade a que se desloca, garantindo o melhor conforto para os passageiros. O sistema proposto possui tal com os outros sistemas de levitação magnética, forças de guiamento lateral, forças de sustentação, forças de propulsão e forças de rotação que só serão necessárias em curva. Estas forças magnéticas estão dispostas sobre o trilho que interagem com os ímãs existentes no veículo como se pode verificar na imagem 78.

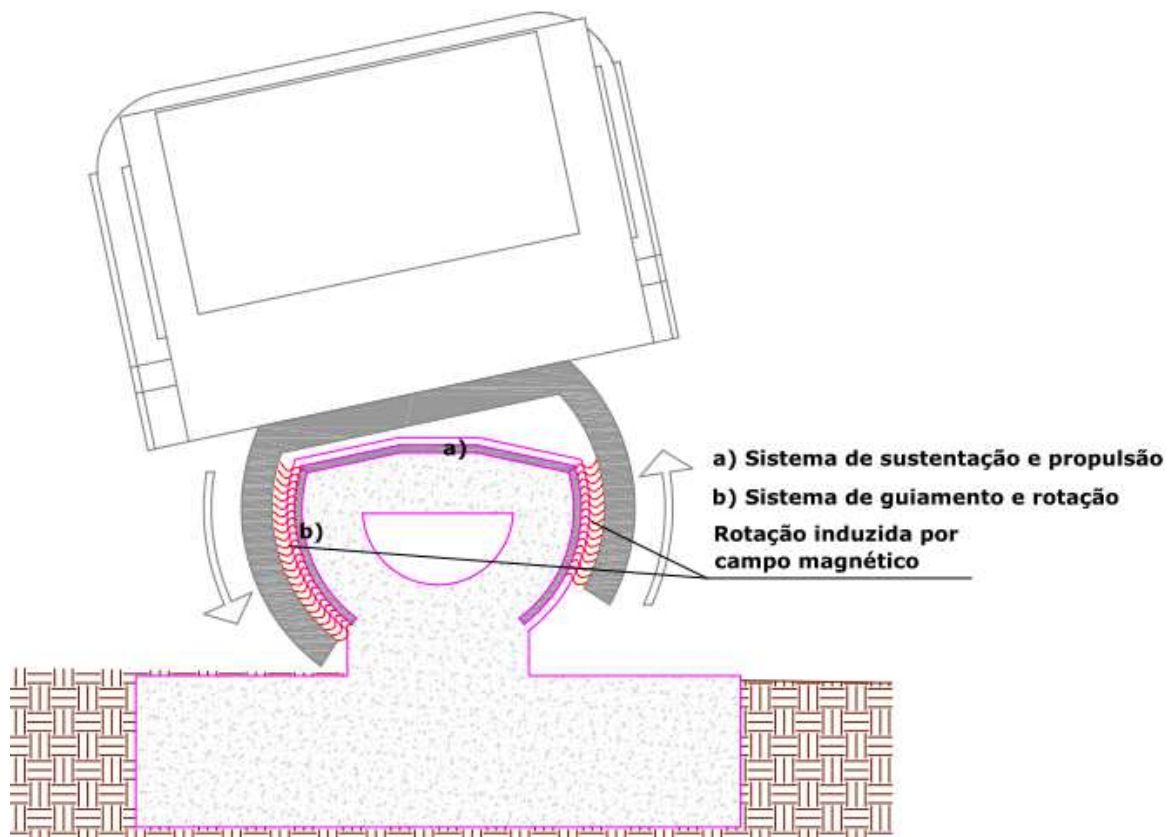


Imagem 78 – Esquema de rotação do veículo induzida por um campo magnético

Na imagem 79 apresenta-se um esquema longitudinal do trilho e de que forma este pode induzir a rotação através de um campo magnético existente. O trilho encontra-se

segmentado de forma a induzir uma rotação diferente em cada secção de acordo com a velocidade que o veículo se desloca em curva.

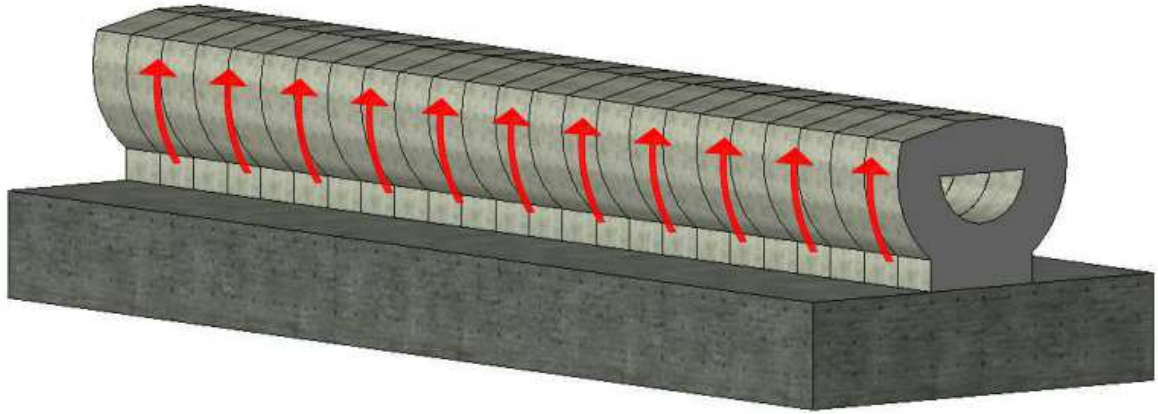


Imagem 79 – Esquema longitudinal do trilho e o campo magnético induzido, para gerar a rotação

Assim sendo a construção do trilho torna-se mais simplificada no seu desenvolvimento em curva, além disso consegue-se uma redução nos custos de execução e projeto, tornando assim mais viável a implementação do sistema magnético. Para este sistema apresentam-se dois tipos de levitação magnética hipotéticos que teoricamente são possíveis de conceber e representam uma evolução aos sistemas atualmente em uso e em testes. A imagem 80 mostra um dos sistemas a propor que consiste na reconversão sempre que possível das linhas existentes que se vai designar por sistema 1.

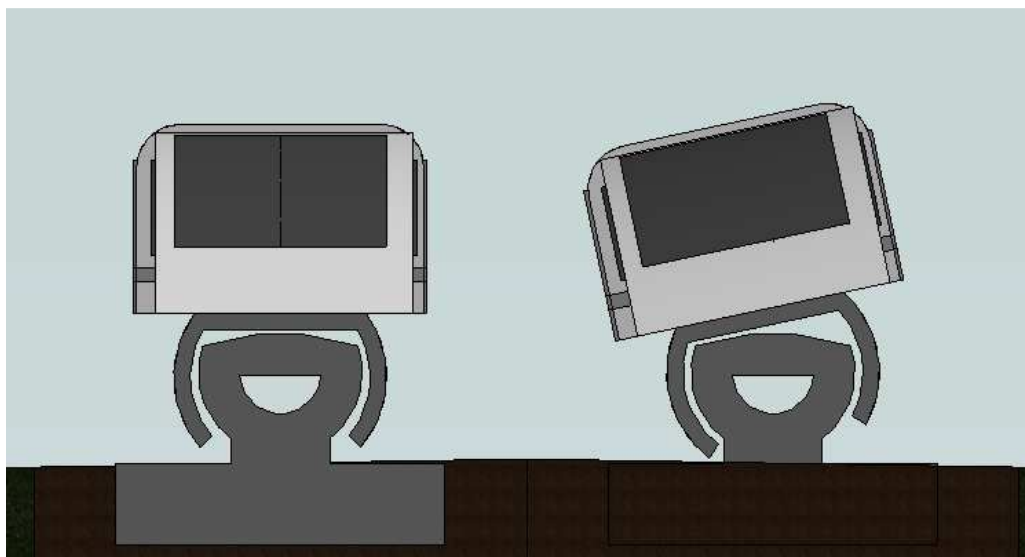


Imagem 80 – Sistema 1 alternativo de levitação magnética proposto

A imagem 81 mostra o outro sistema a propor que se vai designar por sistema 2. Os sistemas propostos aqui são distintos e são uma variante evolutiva dos sistemas de levitação magnética atuais.

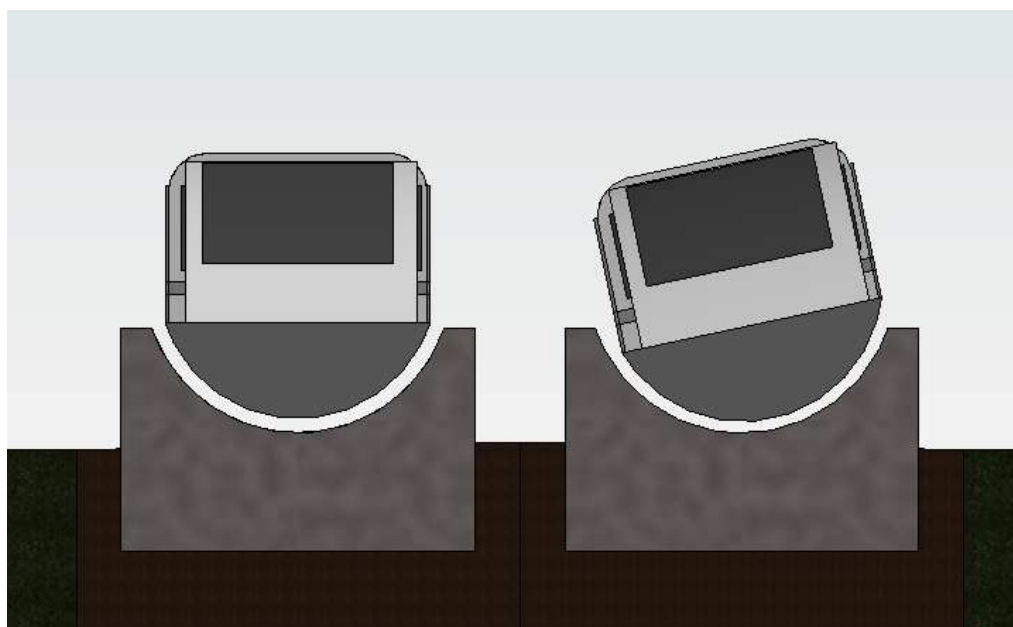


Imagem 81 – Sistema 2 alternativo de levitação magnética

Os sistemas 1 e 2 são distintos na forma do trilho e na forma da base do veículo. O sistema 1 possui uma “garra” que envolve o trilho, enquanto no sistema 2 o trilho é que envolve o veículo como se pode verificar na imagem 80. Contudo ambos os sistemas usam um sistema idêntico de levitação. A tecnologia que se propõe para o veículo rodar em curva é idêntica para os dois sistemas, não havendo assim necessidade de realizar escala em nenhum dos dois sistemas propostos. Assim sendo consegue-se na construção deste tipo de sistema, uma produtividade continua tanto em linha reta como em curva, além disso o sistema garante em curva a melhor relação entre a rotação e a velocidade a que se desloca, garantindo o melhor conforto para os passageiros.

Na imagem 82 também se verifica que a parte superior do veículo é igual nos dois sistemas, mudando só a parte inferior.

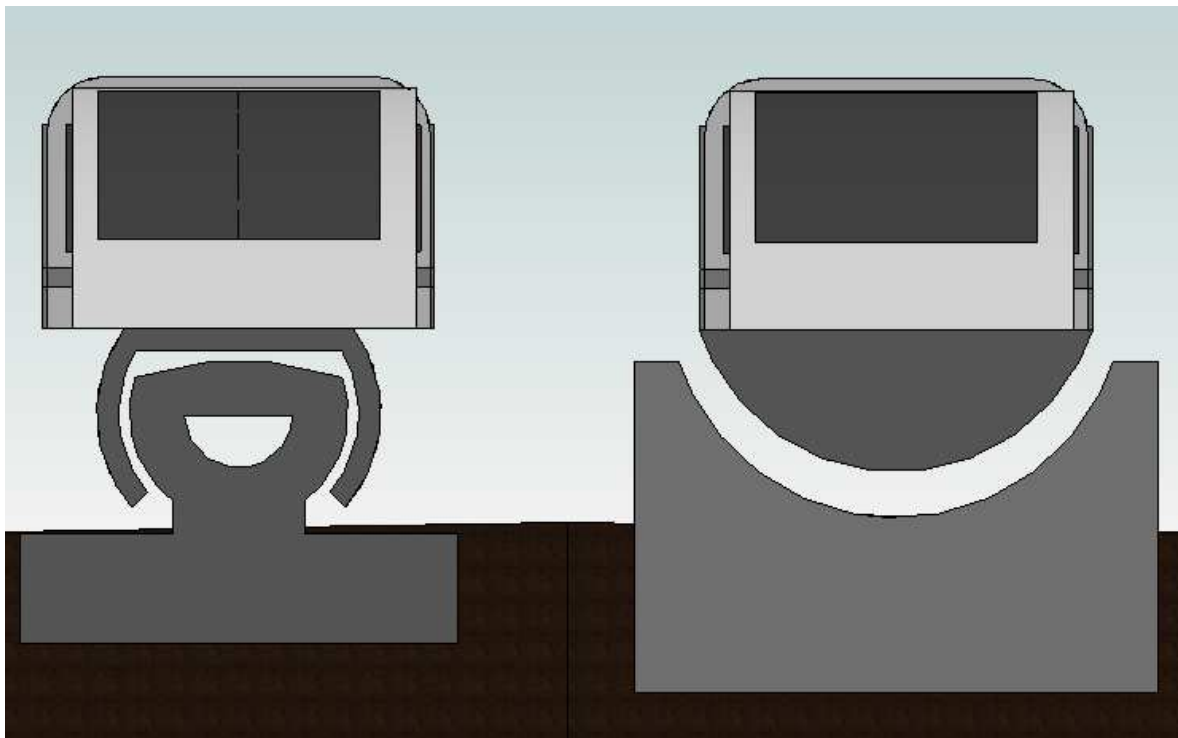


Imagem 82 – Sistema 1 e sistema 2

## **6.2. Sistemas Propostos**

Como já foi referido, apresentam-se dois sistemas distintos de levitação magnética. Em que se considera que estes representam uma redução significativa na implementação do sistema, mais especificamente no que toca a realização do trilho. Seguem-se nos dois próximos subcapítulos as características dos dois sistemas a usar e quais as vantagens em relação aos sistemas atuais de levitação magnética.

### **6.2.1. Sistema 1**

No sistema 1 pode-se verificar, a imagem 83, que resulta de uma variação do sistema existente no Transrapid Alemão. O modelo 3D deste sistema, como o do sistema 2 foi realizado no software Revit da Autodesk. O Revit permitiu após a concepção dos modelos uma maior produtividade na aplicação destes sempre que foram necessárias realizar alterações. O modelo do veículo é uma variação de um modelo já existente que foi adaptado para este tipo de sistemas propostos. Após a modelação e os ajustes finais do modelo os ficheiros foram exportados para outro software, o 3D Studio MAX da Autodesk, que permite dar uma visualização mais realista e a criação de vídeos.

Este sistema possui também uma forma de agarra que encaixa sobre o trilho, tal como o Transrapid.

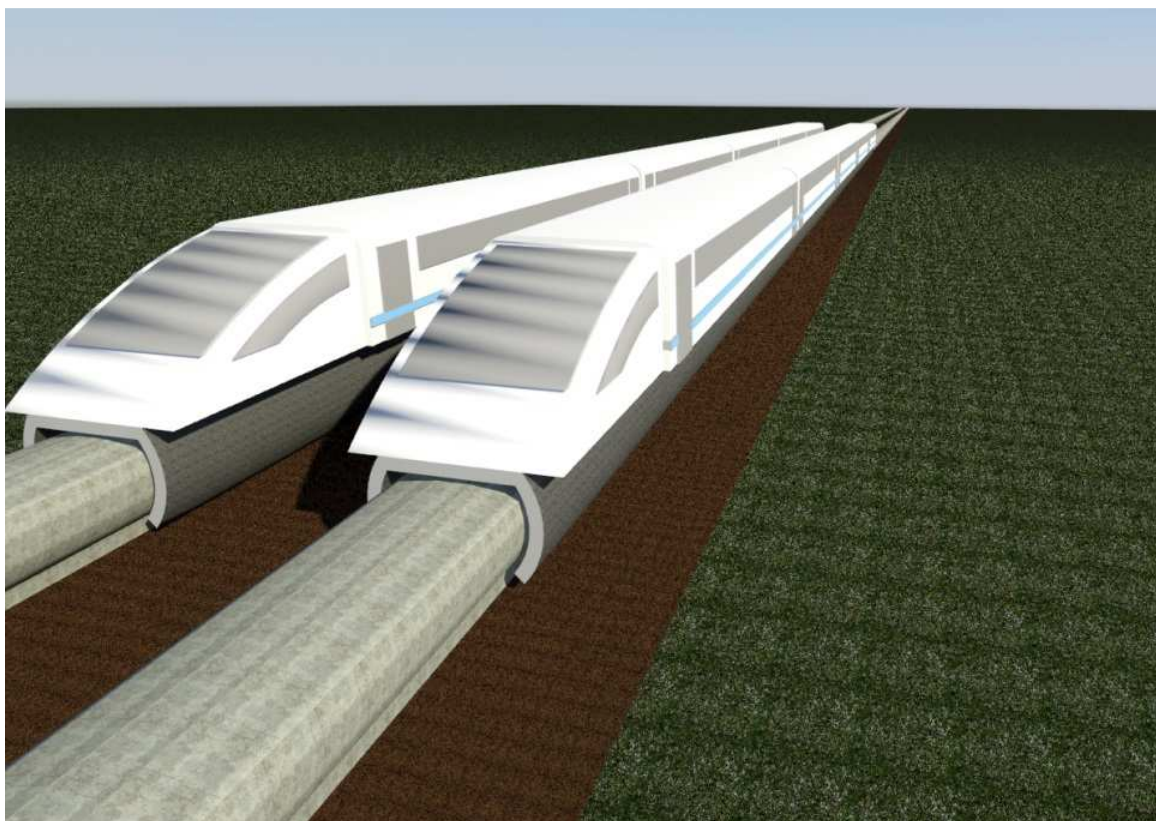


Imagem 83 – Sistema 1 proposto

Na imagem 84 pode-se verificar as semelhanças entre os dois sistemas, mas a grande diferença entre estes consiste no seu traçado em curva, em que o sistema proposto não necessita da escala. Este sistema é capaz de rodar sobre o trilho e aplicar o ângulo que necessita consoante a velocidade a que se desloca, garantindo um maior conforto aos passageiros e facilitando o processo construtivo no se refere à construção do trilho em curva. O sistema proposto adapta-se à velocidade, procurando a posição de rotação ideal.



Imagem 84 – Comparação entre o sistema 1 proposto e o sistema Transrapid

#### 6.2.1.1. Características construtivas do trilho e do veículo

As diferenças prendem-se essencialmente em relação ao trilho e à forma como o veículo se desloca sobre o trilho. Na imagem 85 pode-se verificar as características construtivas do trilho deste sistema no seu desenvolvimento longitudinal.

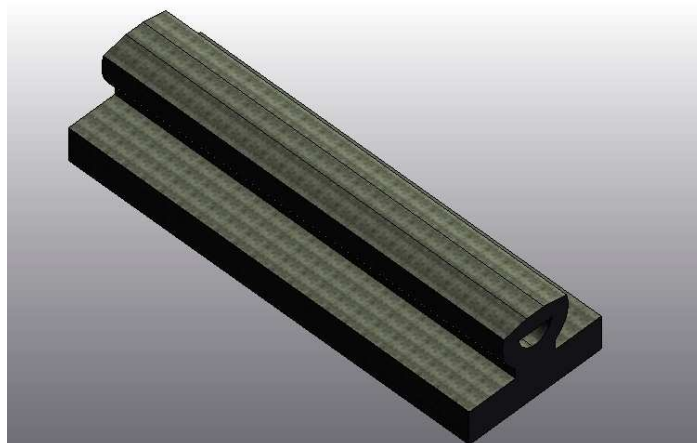


Imagem 85 - Trilho a usar no sistema 1 proposto

A configuração do trilho tem uma base cilíndrica que permite que o veículo rode sobre o trilho. Esta configuração é baseada no pressuposto de que será possível, através da indução de um outro campo magnético, fazer com que o veículo rode sobre o trilho. Com esta sugestão passa a haver a necessidade de uma terceira força magnética que aplique uma força necessária ao veículo para que ele rode o necessário de acordo com a velocidade a que se desloca em curva, diminuindo o efeito do desconforto devido à aceleração centrífuga. Além disto, este campo magnético requer também um controlo informático constante para que esta rotação se mantenha dentro dos limites de segurança. Na imagem 86 demonstra-se um corte da secção transversal do trilho deste sistema e as suas dimensões.

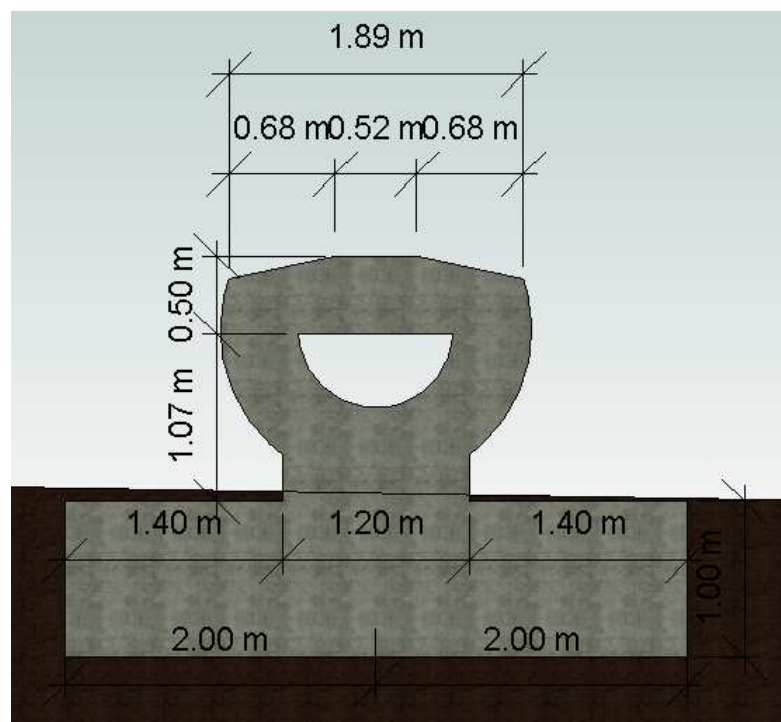


Imagem 86 - Secção transversal do trilho do sistema 1 proposto

Na imagem 87 verifica-se uma perspectiva transversal do veículo do sistema 1 e as respectivas suas dimensões. O veículo possui dimensões idênticas às do Transrapid, às

dimensões apenas são diferentes na zona inferior do veículo onde este interage com o trilho.

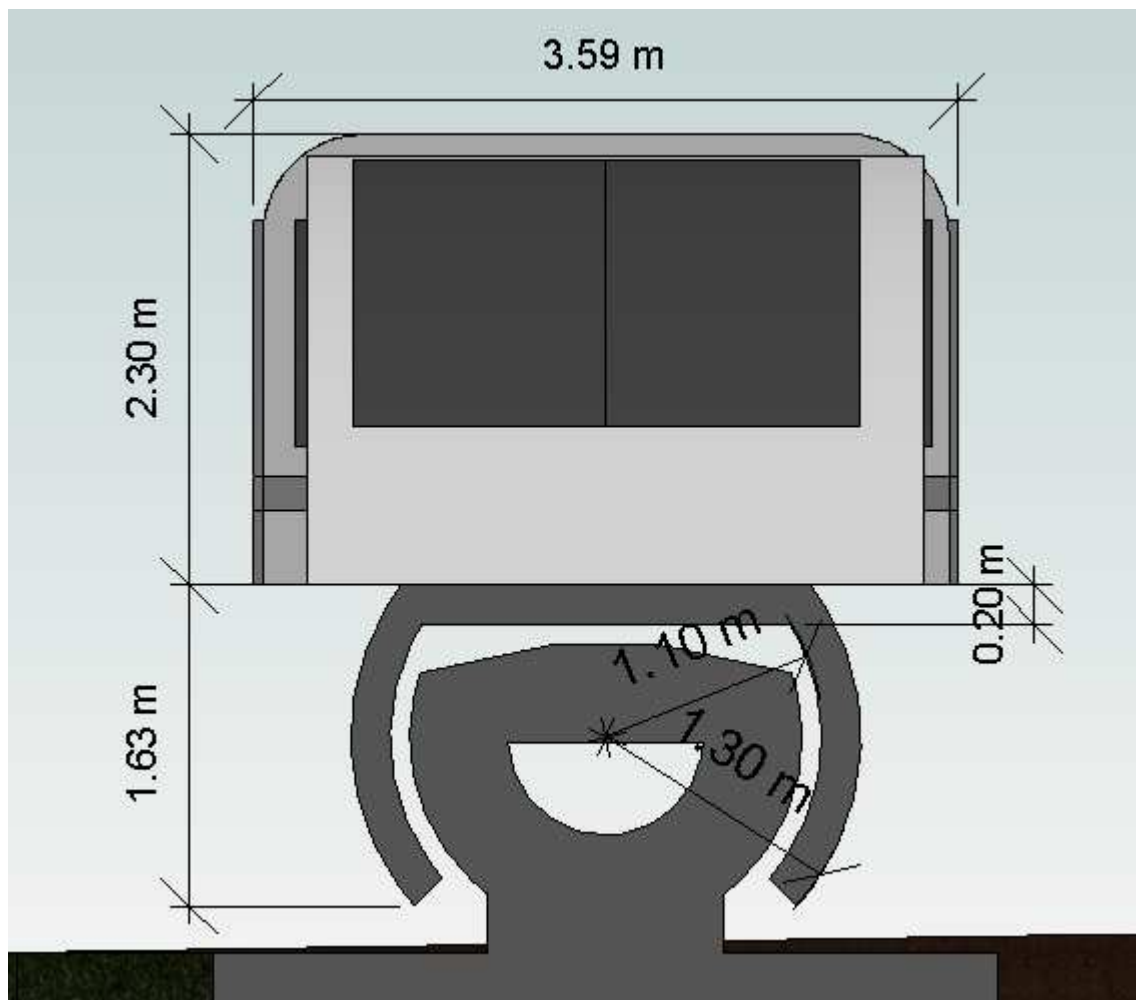


Imagem 87 – Perspectiva transversal do veículo do sistema 1

Na imagem 88 demonstra-se uma perspectiva longitudinal do veículo do sistema 1 e a suas dimensões. O Veículo é composto por carruagens de 15 metros de comprimento, ou no caso das composições das extremidades estas têm cerca de 19.98 metros de comprimento.

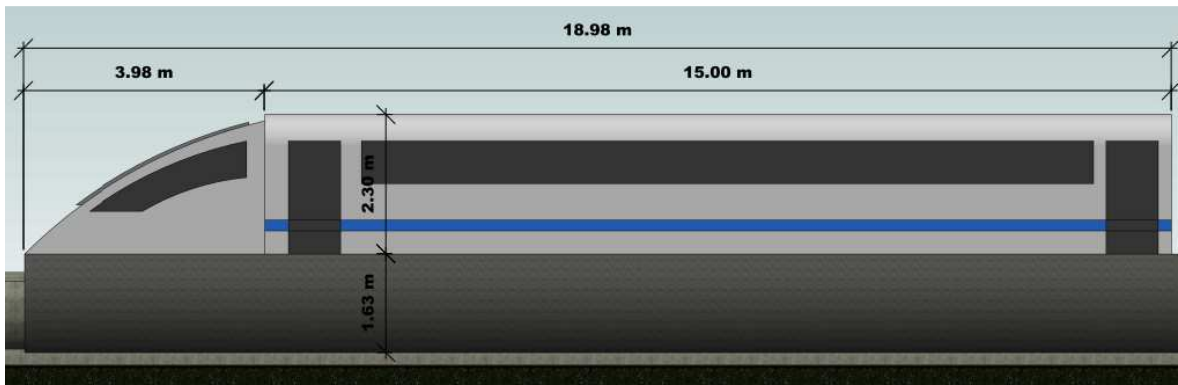


Imagem 88 - Perspectiva longitudinal do veículo do sistema 1.

### 6.2.1.2. Traçado em curva

A configuração do trilho tem características que permitem o veículo rodar sobre o trilho em curva, não existindo escala. Na imagem seguinte pode-se verificar como o veículo roda sobre o trilho num ângulo máximo de  $12^\circ$ .

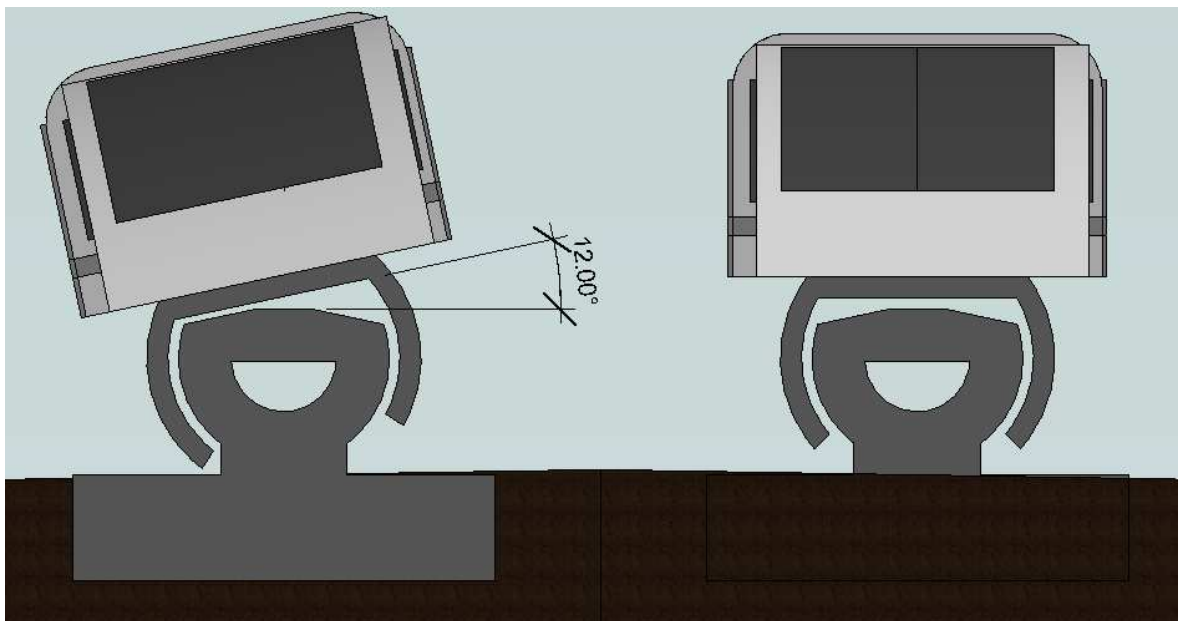


Imagem 89 – Rotação do veículo no sistema 1 proposto

Este sistema tem uma configuração máxima de 12° e consegue garantir uma relação ótima entre a velocidade a que o veículo se desloca e a rotação necessária para essa velocidade, mantendo sempre o conforto ideal para os passageiros. O conforto dos passageiros depende da velocidade a que o veículo se desloca, do raio da curva e da inclinação do veículo. De forma a minimizar o efeito da aceleração centrífuga é necessário que exista uma relação ideal entre estes três fatores. Esta da aceleração é descrita na expressão 6.1.

$$a_c = \frac{v^2}{R} \quad (6.1)$$

Em que:

$a_c =$  Aceleração Centrifuga (  $m/s^2$  )

$v =$  Velocidade (  $m/s$  )

$R =$  Raio da curva em (  $m$  )

A aceleração centrífuga para ferrovia tem registo valores para o conforto dos passageiros os quais estão compreendidos entre 0  $m/s^2$  e 1,5 $m/s^2$ . Acima de e 1,5 $m/s^2$  os passageiros começam a sentir desconforto. Para o cálculo da aceleração centrífuga considerou-se a situação de limite de conforto condicionante para os passageiros, a alta velocidade e em curva. Esta análise consiste na deslocação do veículo à velocidade operacional de 450 km/h num raio de curvatura mínimo de 4400 m. Pode-se verificar na expressão 6.2 o valor da  $a_c$  é de:

$$a_c = \frac{\left(\frac{(450 \times 1000)}{3600}\right)^2}{4400} = 3.551 \text{ m/s}^2 \quad (6.2)$$

Contudo salienta-se que, para se obter o correto valor de conforto para os passageiros, recorre-se ao cálculo da aceleração compensada, que consiste na subtração da componente da aceleração centrífuga com a componente da aceleração devido ao peso de veículo. Estas componentes da aceleração estão representadas esquematicamente na imagem 90.

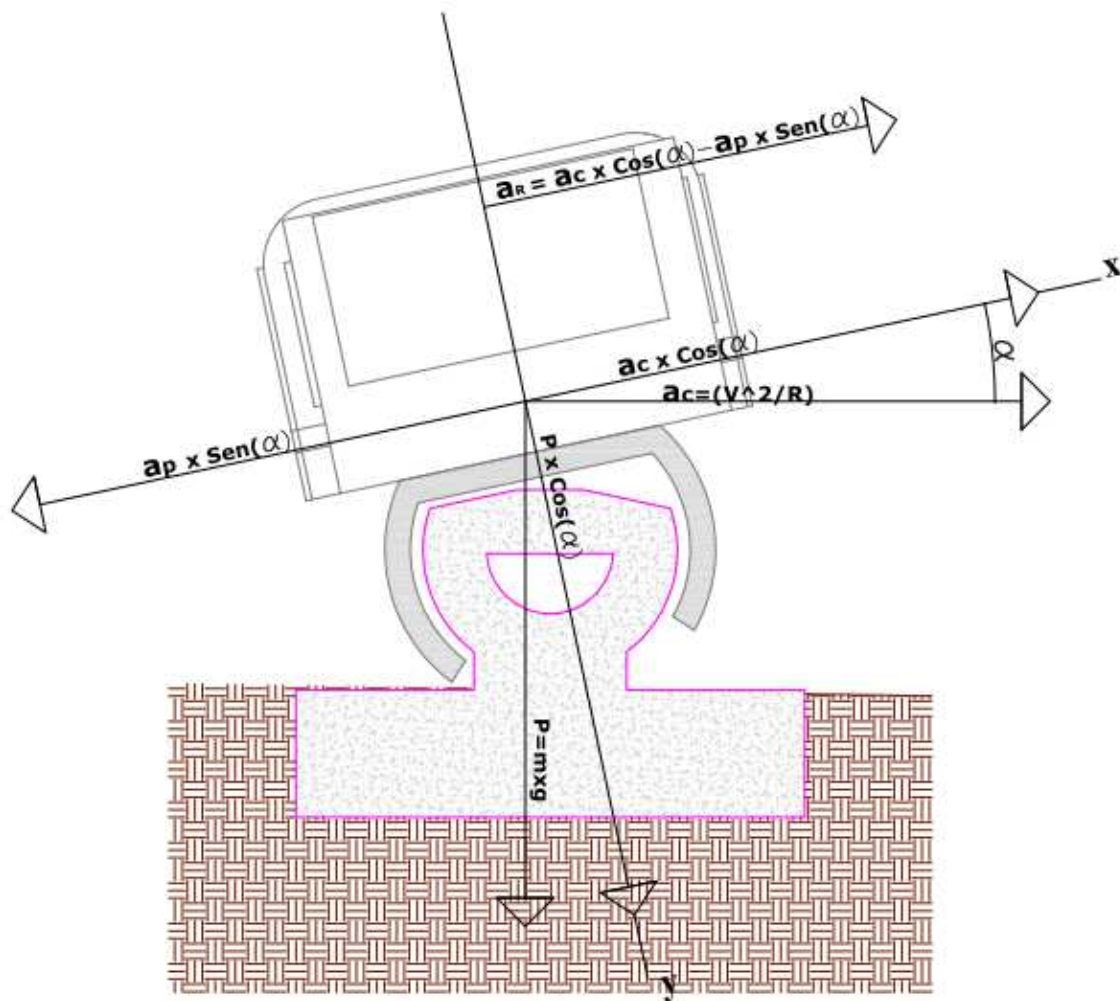


Imagem 90 - Esquema das forças atuantes no veículo

O cálculo da componente da aceleração devido ao peso do veículo para a situação representada na imagem 90 é obtido pela expressão 6.3.

$$a_p = 9,8 \times \sin(12^\circ) \rightarrow 2,037 \text{ m/s}^2 \quad (6.3)$$

O cálculo da componente da aceleração centrífuga para a situação representada na imagem 90 para um ângulo de  $12^\circ$  é obtido pela expressão 6.4.

$$a_c = a_c \times \cos(12^\circ) \quad (6.4)$$

De acordo com o resultado obtido na expressão 6.2 pode-se calcular a componente da aceleração centrífuga para a situação em análise como pode se verificar na expressão 6.5.

$$a_c = 3.551 \times \cos(12^\circ) \rightarrow 3.474 \text{ m/s}^2 \quad (6.5)$$

Assim sendo para obter a aceleração compensada recorre-se a expressão 6.6

$$\text{aceleração compensada} = a_c - a_p \quad (6.6)$$

Utilizando os valores da expressão 6.3 e da expressão 6.5 da situação em análise obtém-se de a aceleração compensada como se pode verificar na expressão 6.7

$$\text{aceleração compensada} = 3.474 - 2,037 \rightarrow 1.437 \text{ m/s}^2 \quad (6.7)$$

Assim sendo obteve-se um valor de  $1,437 \text{ m/s}^2$ , que se situa dentro dos valores de conforto para os passageiros entre 0 e  $1,5 \text{ m/s}^2$ . Na imagem 91 pode-se verificar que para uma velocidade operacional de  $450 \text{ km/h}$ , limitando a rotação do veículo aos  $12^\circ$ , só se conseguem valores de conforto com raios superiores aos  $4300 \text{ m}$ .

### Aceleração Compensada ( $m/s^2$ ) para uma velocidade de 450 km/h com 12° de inclinação

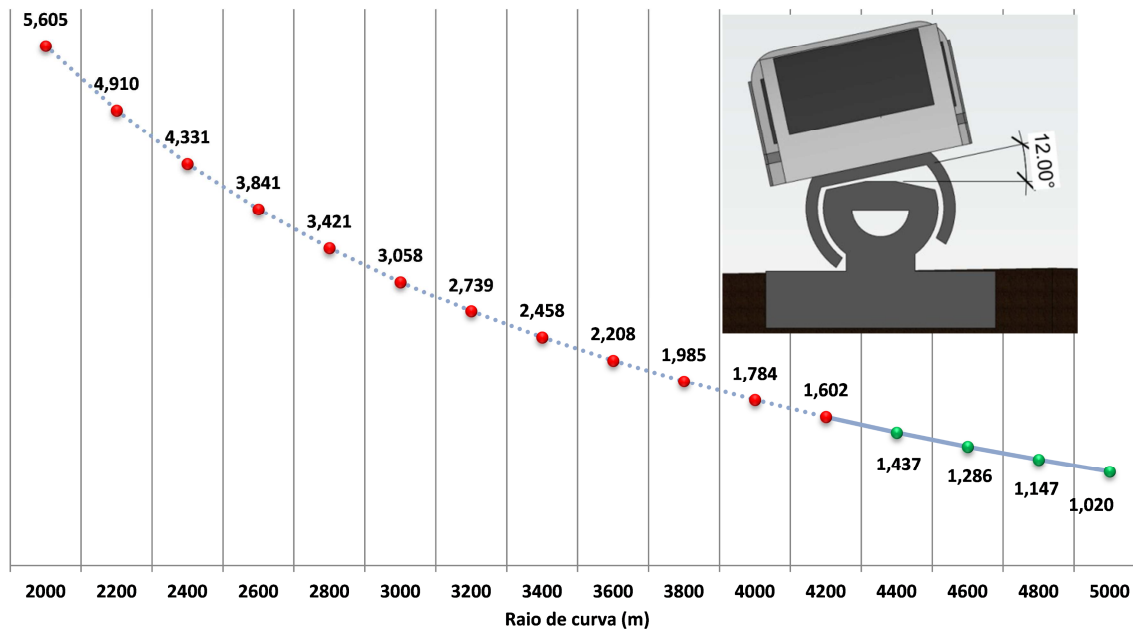


Imagem 91 – Aceleração compensada para uma velocidade de 450 km/h com 12° de inclinação e diversos raios em curva

Na imagem 92 expõe-se as inclinações possíveis para as velocidades operacionais e a aceleração compensada para cada velocidade considerando um raio de 4440m. Verifica-se que todos os valores da aceleração compensada estão dentro dos parâmetros de conforto. A aceleração compensada depende da velocidade e assim sendo estes valores podem ser sempre ajustados em curva deste que nunca ultrapasse os 12° de inclinação e os valores de conforto admissíveis para a aceleração compensada.

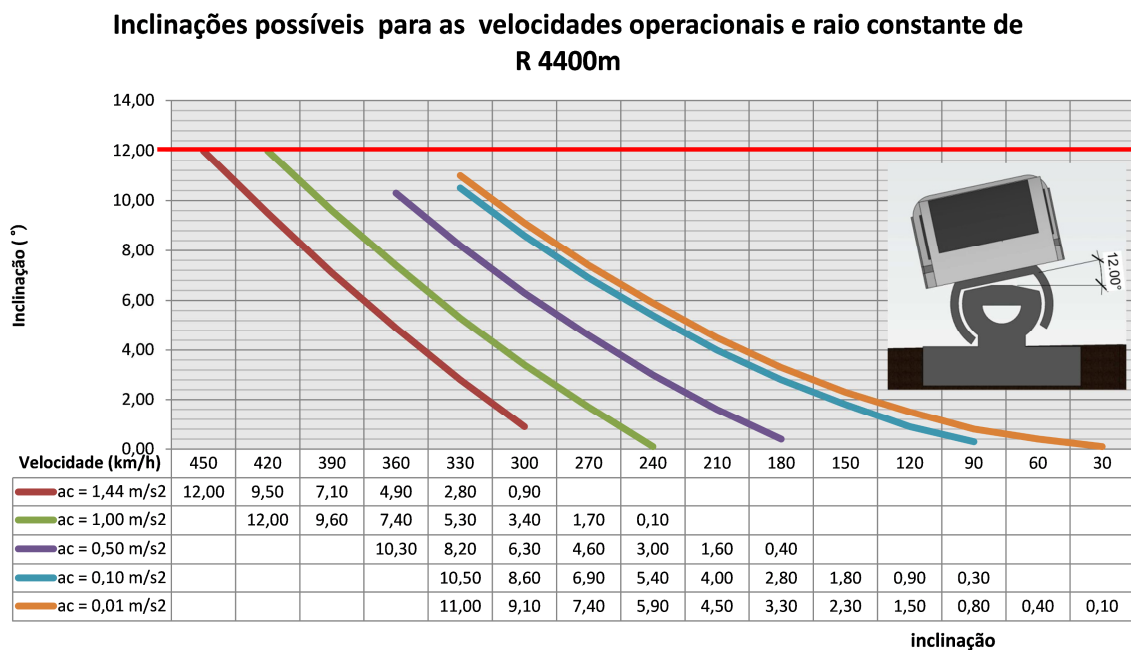


Imagem 92 – Inclinações possíveis para as velocidades operacionais considerando um raio constante de 4400m

Tendo em vista que o raio em curva é de 4400 metros, há necessidade de certificar que o veículo em curva não entra em contacto com o trilho curvo. Na imagem 93 verifica-se que o veículo não toca no trilho.

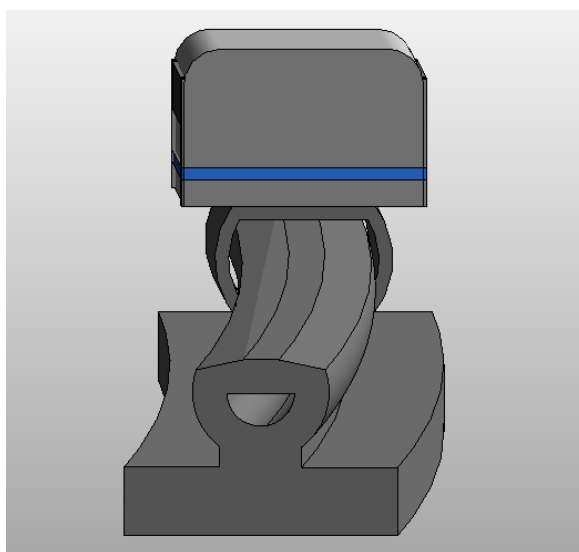


Imagem 93 – Secção transversal do veículo em curva

Na imagem 94 verifica-se também uma secção transversal onde se verifica que o veículo não toca no trilho.

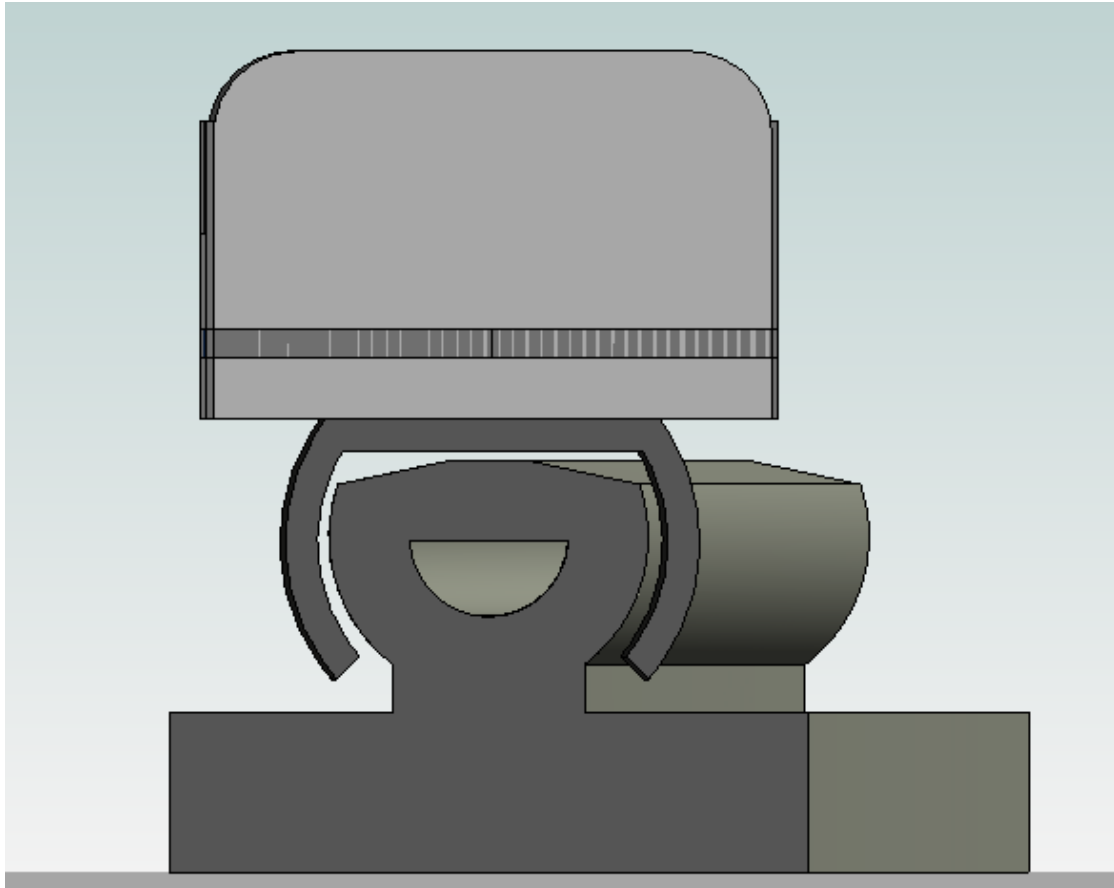


Imagem 94 – Vista 3D do veículo em curva 4400 m

Deste modo, entende-se que este sistema garante uma boa relação entre o grau de inclinação velocidade operacional e conforto de passageiros, garantindo uma simplicidade na construção especialmente em curva onde este sistema prescinde de qualquer tipo de sobrelevação em curva, ou seja, a escala. A grande vantagem está em que o trabalho de construção do trilho é constante, quer em curva ou reta, diminuindo os custos de construção significativamente.

## 6.2.2. Sistema 2

O sistema dois resulta de uma variação do sistema existente no MXL01 Japonês, como se verifica na imagem 95.

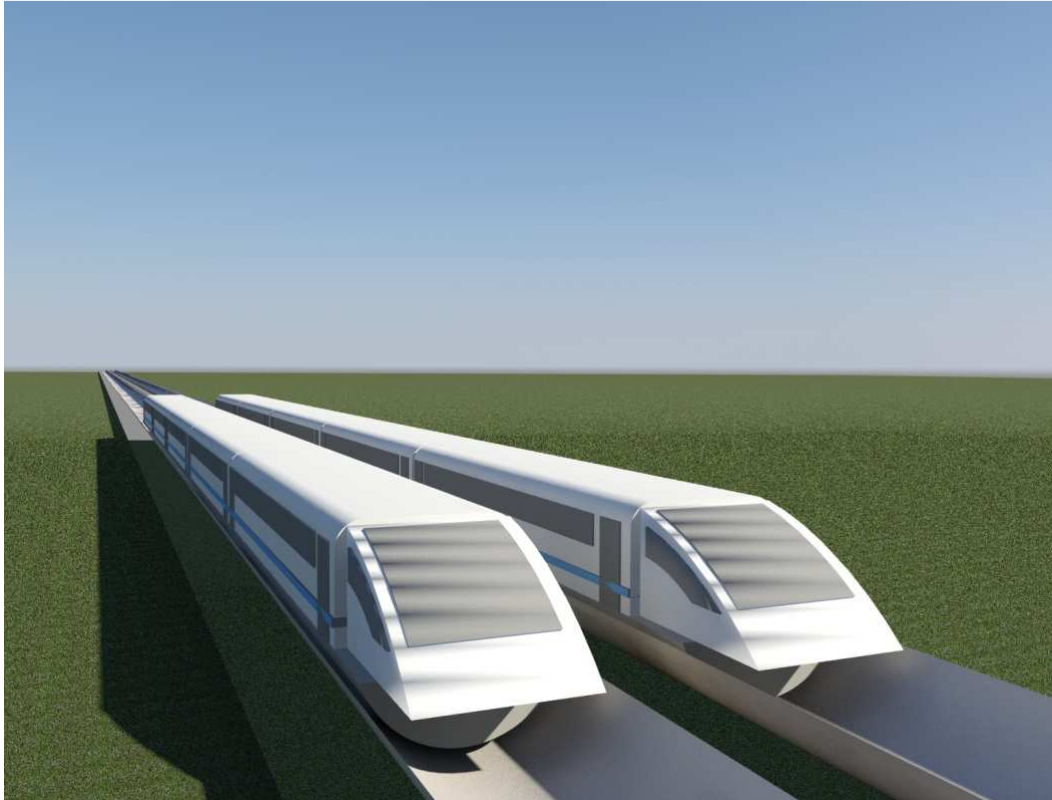


Imagem 95 – Sistema 2 proposto

Este sistema possui uma forma circular idêntica à forma em “u” que encaixa sobre o trilho, tal como o SCMaglev. Na imagem seguinte podem-se identificar as diferenças entre os dois sistemas.

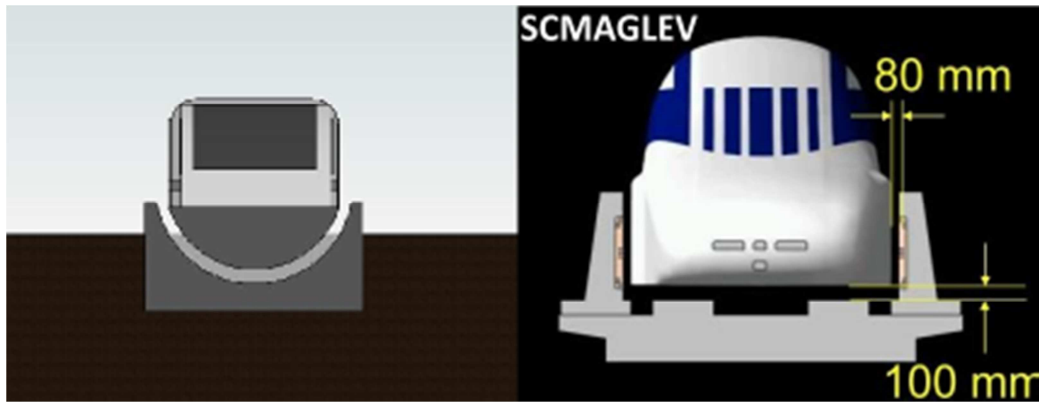


Imagem 96 - Comparação entre o sistema 2 proposto e o sistema SCMaglev

### 6.2.2.1. Características construtivas do trilho e do veículo

Tal como no sistema 1, o sistema 2 distingue-se do sistema SCMaglev devido ao trilho e a forma como o veículo circula sobre o trilho. Este sistema permite tal como o sistema 1 que o veículo rode sobre si próprio em curva não sendo necessário a existência de escala no trilho. Esta situação tal como no sistema 1 recorre à introdução de uma força magnética que faz rodar o veículo em curva de acordo com a velocidade a que se desloca. Na imagem 97 pode-se verificar as características construtivas do trilho deste sistema no seu desenvolvimento longitudinal.

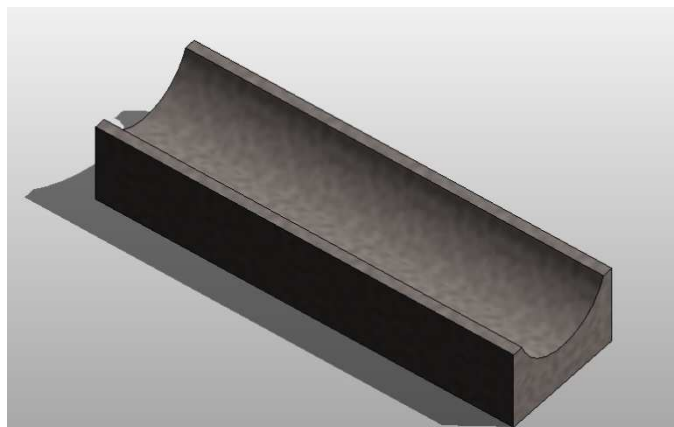


Imagem 97 – Trilho a usar no sistema 2 proposto

Na imagem 98 demonstra-se um corte da secção transversal do trilho deste sistema e as suas dimensões. Como este trilho é contínuo e tem sempre as mesmas características geométricas torna muito fácil a sua construção, pode-se utilizar a pré-fabricação para uma melhor produtividade.

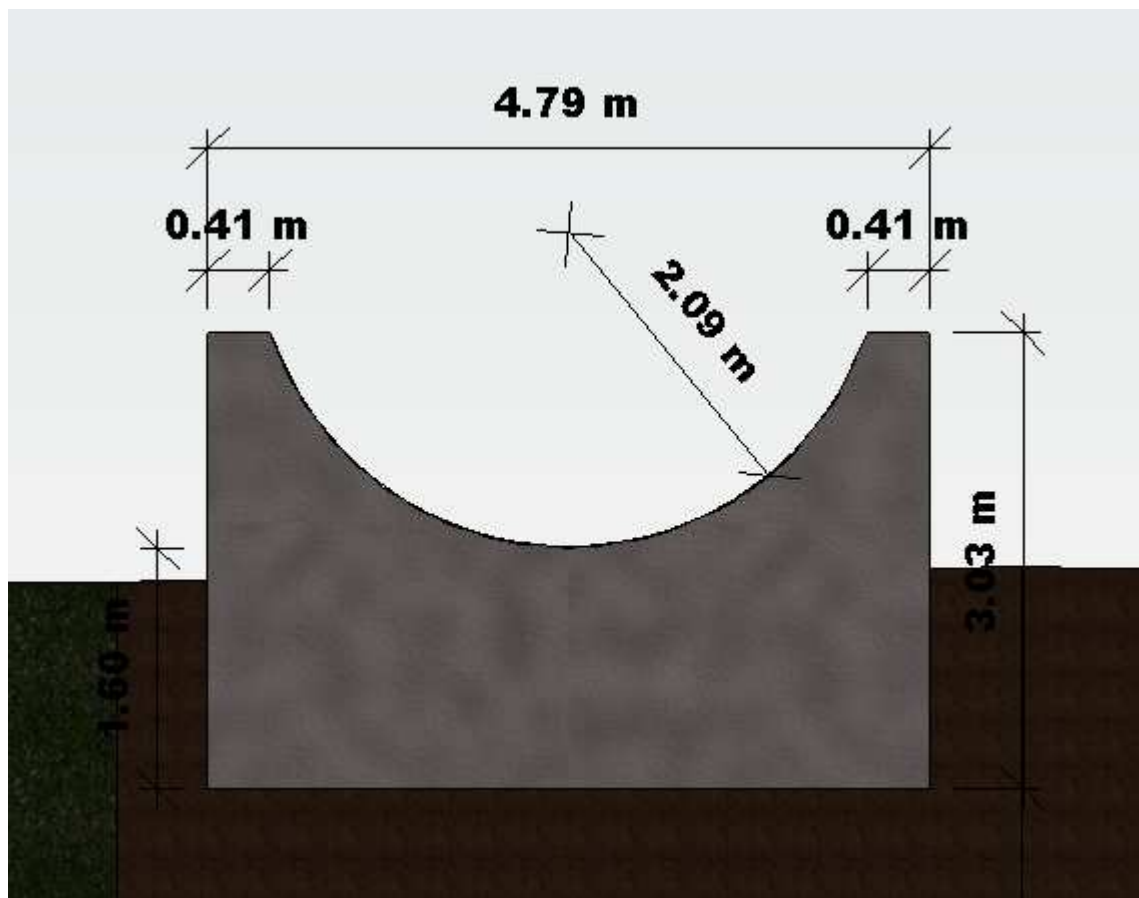


Imagem 98 - Secção transversal do trilho do sistema 2 proposto

Na imagem 99 verifica-se uma perspectiva transversal do veículo do sistema 2 e as suas dimensões. Tal como no sistema 1 o sistema 2 também é semelhante ao Transrapid só difere na forma de contacto com trilho.

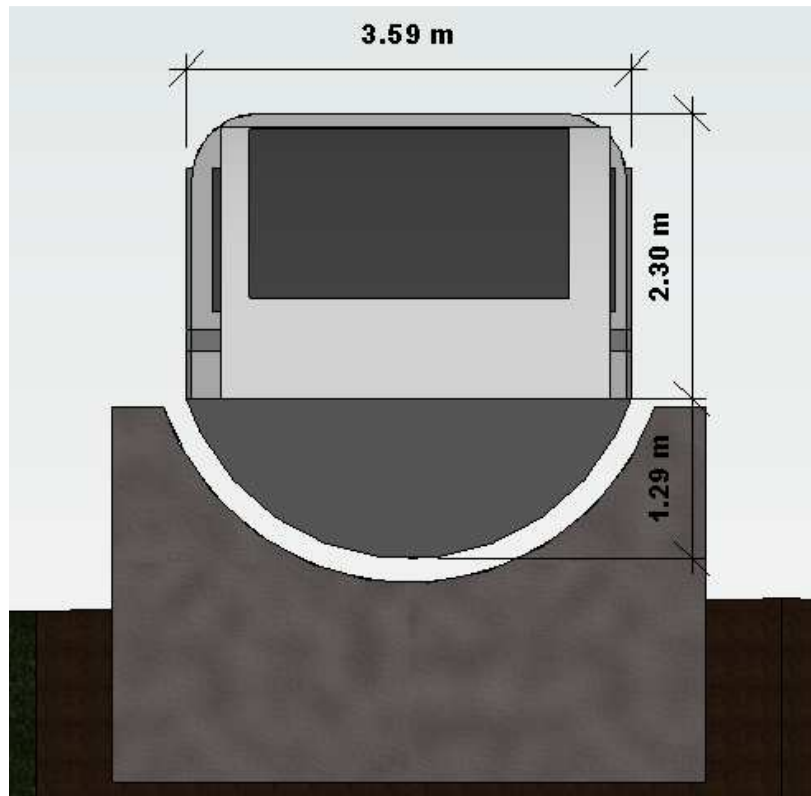


Imagem 99 - Perspectiva transversal do veículo do sistema 2

Na imagem 100 demonstra-se uma perspectiva longitudinal do veículo do sistema 2. O Veículo do sistema 2 é idêntico ao do sistema 1, é composto por carruagens de 15 metros de comprimento, ou no caso das composições das extremidades estas têm cerca de 19,98 metros de comprimento.

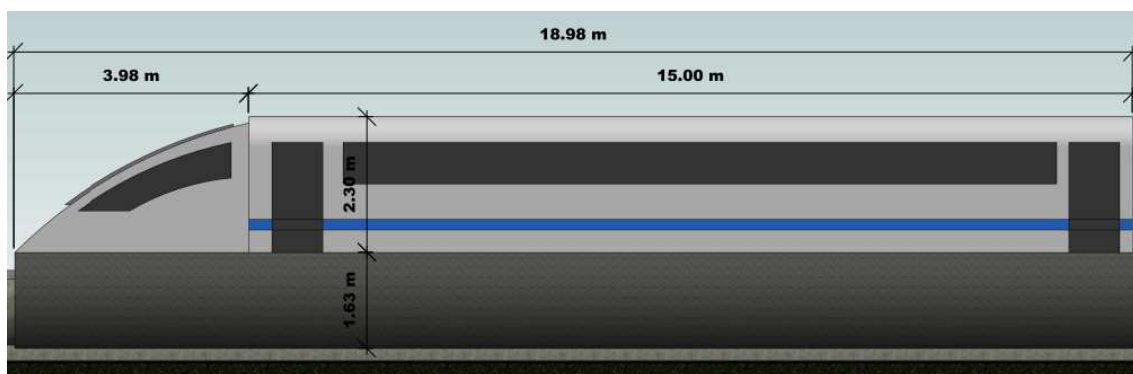


Imagem 100 - Perspectiva longitudinal do veículo do sistema 2.

### 6.2.2.2. Traçado em curva

Este sistema tal como o sistema 1 tem uma configuração que permite uma rotação máxima de  $12^\circ$  como se verifica na imagem 101. O sistema consegue garantir uma relação ótima entre a velocidade a que o veículo se desloca e a rotação necessária para essa velocidade, mantendo sempre o conforto ideal para os passageiros.

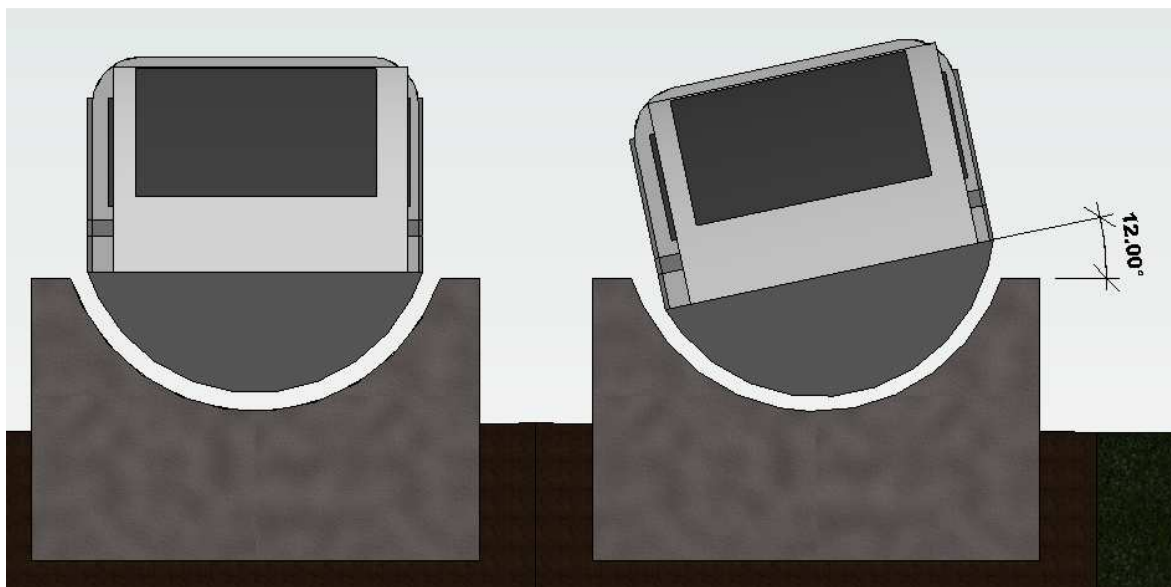


Imagem 101 - Rotação do veículo no sistema 2 proposto

As relações entre a velocidade máxima operacional, raio em curva e a inclinação de  $12^\circ$  são idênticas às expressões existentes no sistema 1. O raio mínimo considerado para este sistema é também de 4400m assim sendo há necessidade de certificar que o veículo em curva não entra em contacto com o trilho curvo. Na imagem 102 verifica-se que o veículo não toca no trilho.

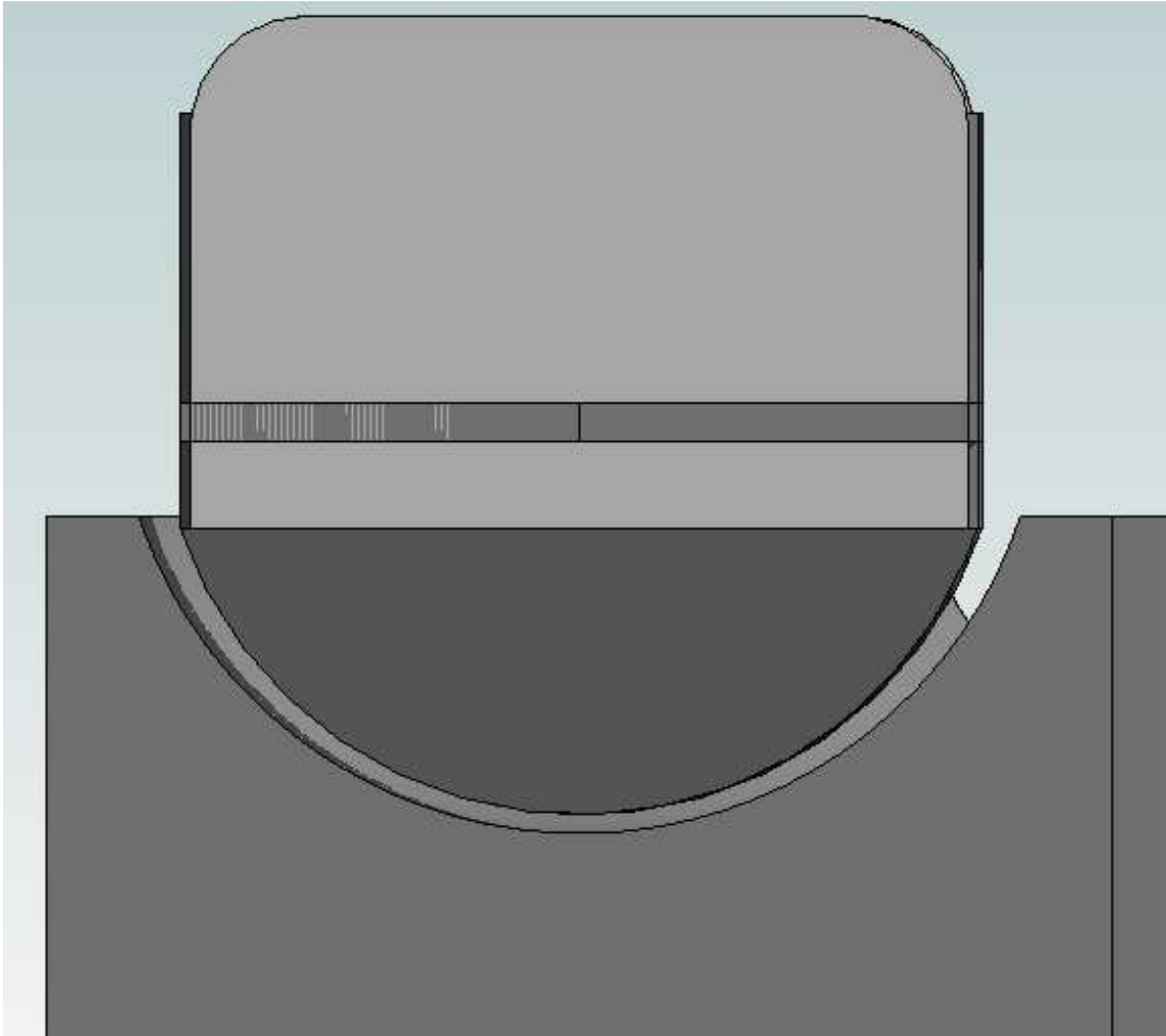


Imagem 102 – Corte transversal do veículo numa curva de 4400 m

Assim sendo este sistema tal como o sistema 1 garante uma boa relação entre o grau de inclinação velocidade operacional e conforto de passageiros, garantindo uma simplicidade na construção especialmente em curva onde este sistema prescinde de qualquer tipo de sobrelevação em curva, ou seja, a escala.

### 6.3. Proposta de conversão dos caminhos-de-ferro – Caso de estudo Brasil

O Brasil possui um território vasto, onde existem cidades com elevada densidade populacional, em maior parte das viagens é realizada, ou por avião, ou por automóvel. Propõem-se assim a implementação do sistema de levitação magnética, com um meio que possui a capacidade de inovar a rede de transportes de passageiros no Brasil. Um dos objetivos desta proposta é tentar atrair passageiros da aviação e novos utilizadores para este novo meio de transporte que oferece um meio rápido, económico e mais amigo do ambiente. O Brasil apresenta um amplo território com cerca de 8.515.767, 049 km<sup>2</sup> e possui cidades como é o caso de São Paulo e do Rio de Janeiro com cerca de 44.045.304 e 16.461.173 de habitantes respectivamente. Na imagem 103 demonstra-se uma comparação que relaciona a distância ideal da aviação, linhas de caminho de ferros e linha de levitação magnética tendo em conta como factor económico.[71]

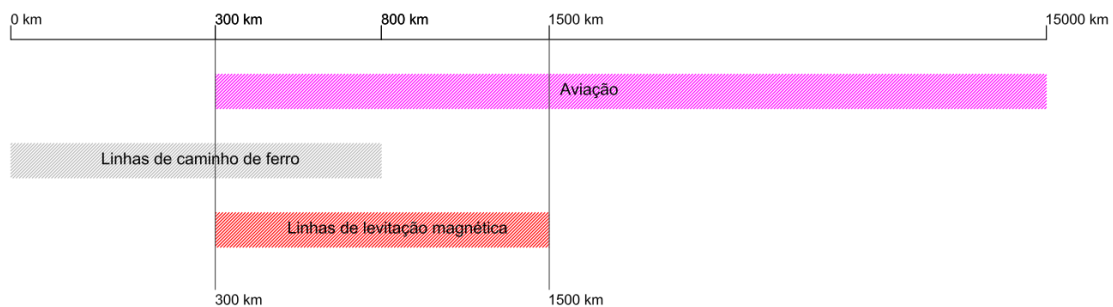


Imagem 103 – Comparação de meios de transporte tendo em conta o fator económico.

Em França com o crescimento das linhas de caminho de ferro de alta velocidade verificou-se, desde 1985 até 2007, um aumento muito significativo de passageiros a utilizarem o TGV como meio de transporte entre as principais cidades. Na imagem 104 pode-se

verificar um aumento de 15 milhões de passageiros em 1985 para 100 milhões de utilizadores em 2007. [72]

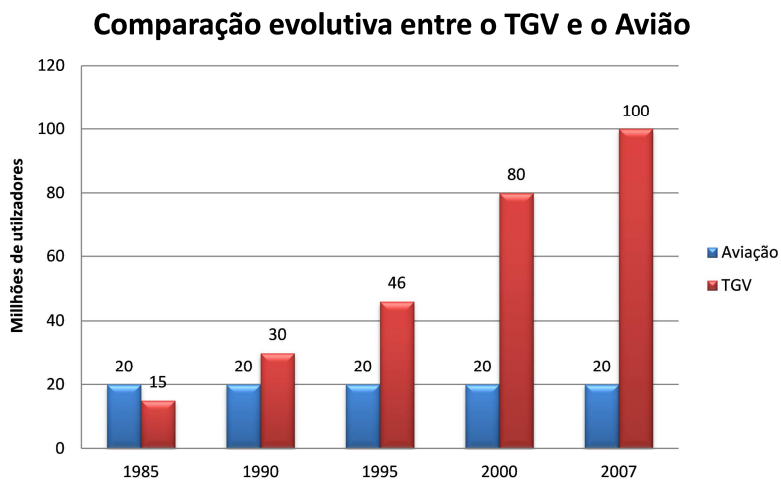


Imagem 104 – Número de passageiros utilizadores do TGV desde 1985 até 2007 a utilizarem o TGV[72]

O aumento do número de utilizadores deve-se principalmente ao aumento da extensão das linhas de TGV conforme se pode verificar na imagem 105, que aumentou ,desde 1983, de 419 km até 1872 km em 2008. [72]

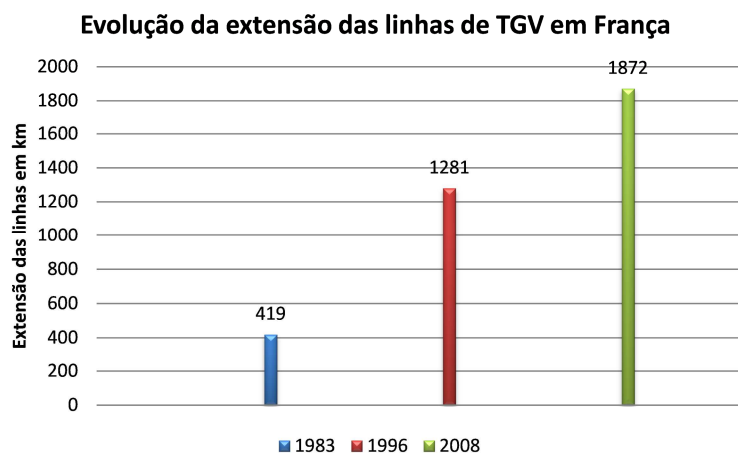


Imagem 105 – Evolução das linhas de TGV em km no território francês[72]

Em Espanha, a ligação Madrid – Barcelona, conseguiu também aumentar consideravelmente o número de utilizadores. Em apenas um ano esta ligação após a implantação do AVE os passageiros utilizadores do avião trocaram este meio de transporte pelas linhas de alta velocidade AVE como se pode velicar na imagem 106.[72]

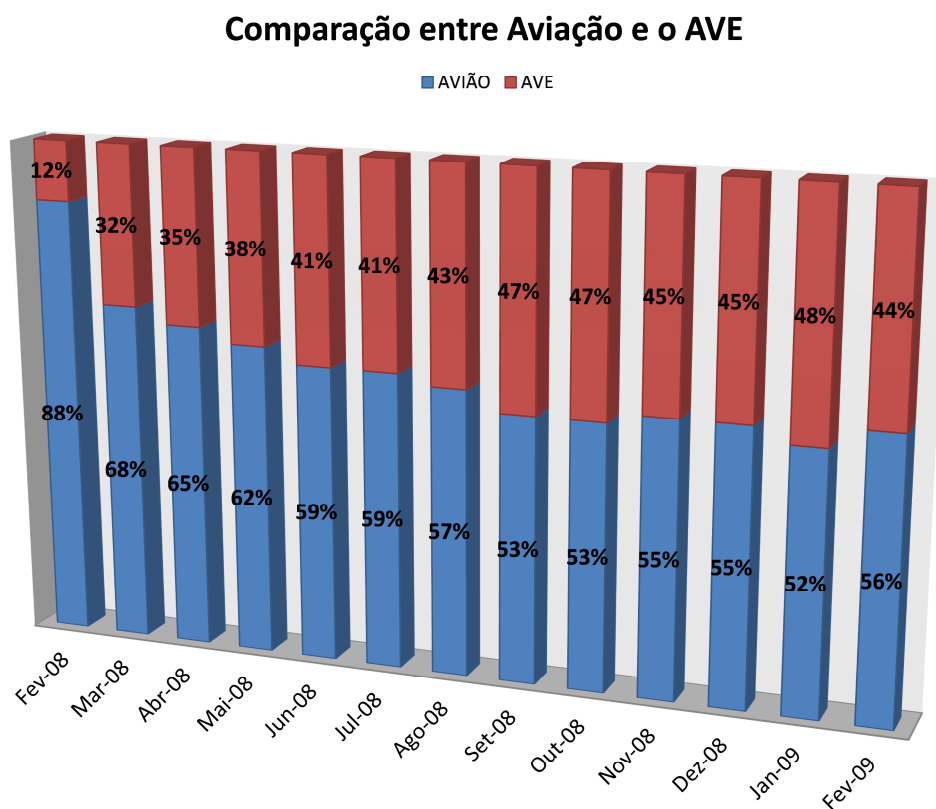


Imagem 106 – Utilizadores de linhas de alta velocidade AVE versus Aviação na ligação Madrid – Barcelona [72]

Dois estudos realizados na Austrália em 1995 e em 2011 previram que a implantação do HST “*High Speed Train*” até 2011 teria um aumento de 3% para 17% a utilização do comboio. Este estudo teve como base a regressão logística conhecida como *logit mode*. Na gráfico 107 demonstra-se o estudo realizado em 1995. [73]

### HSR High Speed Rail - Austrália 1995

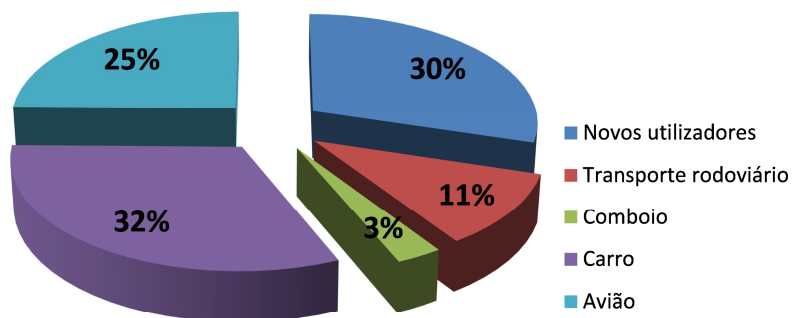


Imagem 107 – Estudo realizado na Austrália em 1995 para linhas de alta velocidade de caminho de ferro[73]

Na imagem 108 verifica-se o estudo realizado em 2011 utilizando o mesmo método, em ambas as imagens os novos utilizadores traduzem as viagens que não são provenientes de outros meios de transporte existentes.

### HSR High Speed Rail - Austrália 2011

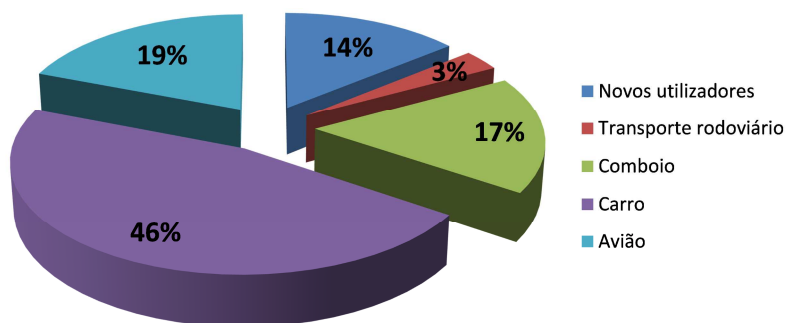


Imagem 108 - Estudo realizado na Austrália em 2011 para linhas de alta velocidade na ferrovia[73]

Pode-se então afirmar que sempre que se instala um sistema de linhas ferroviárias de alta velocidade, há uma migração de utilizadores que são provenientes de outros meios de transporte, como no caso do AVE que conseguiu captar os utilizadores da aviação. As linhas de caminho de ferro de alta velocidade são um dos meios de transporte com maior taxa de utilização e recorrendo ao sistema de levitação magnética consegue-se uma maior velocidade com custos operacionais bem mais reduzidos. Do ponto de vista do utilizador estes sistema dispensa o check-in, as esperas existentes nos aeroportos e os controlos de segurança.

#### **6.4. Análise dos traçados – Caso prático do Brasil**

A aplicação do sistema de levitação magnética no território brasileiro, representa provavelmente o melhor sistema de alta velocidade a implementar. O Brasil possui um vasto território e possui diversas cidades com uma grande densidade populacional, possui também o sistema de linhas de caminho a necessitar de ser reabilitado e estendido. A implementação de um sistema de levitação magnética, pode ser a melhor solução a implementar, pois face ao sistema de contacto roda carril só tem vantagens, por tornar as viagens mais rápidas e a um custo operacional mais baixo. O sistema a propor pretende reconverter as linhas ferroviárias existentes no Brasil para linhas de levitação magnética.

Os traçados em estudo no território brasileiro consistem na reconversão das linhas de levitação magnética, sempre que possível, em que serão divididas em três fases, na primeira fase o traçado é definido pela ligação das três maiores cidades brasileiras, Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília. A segunda fase irá ligar o norte e sul do litoral brasileiro e

uma terceira fase a ligar o interior brasileiro à costa como se pode verificar no presente na imagem 109.

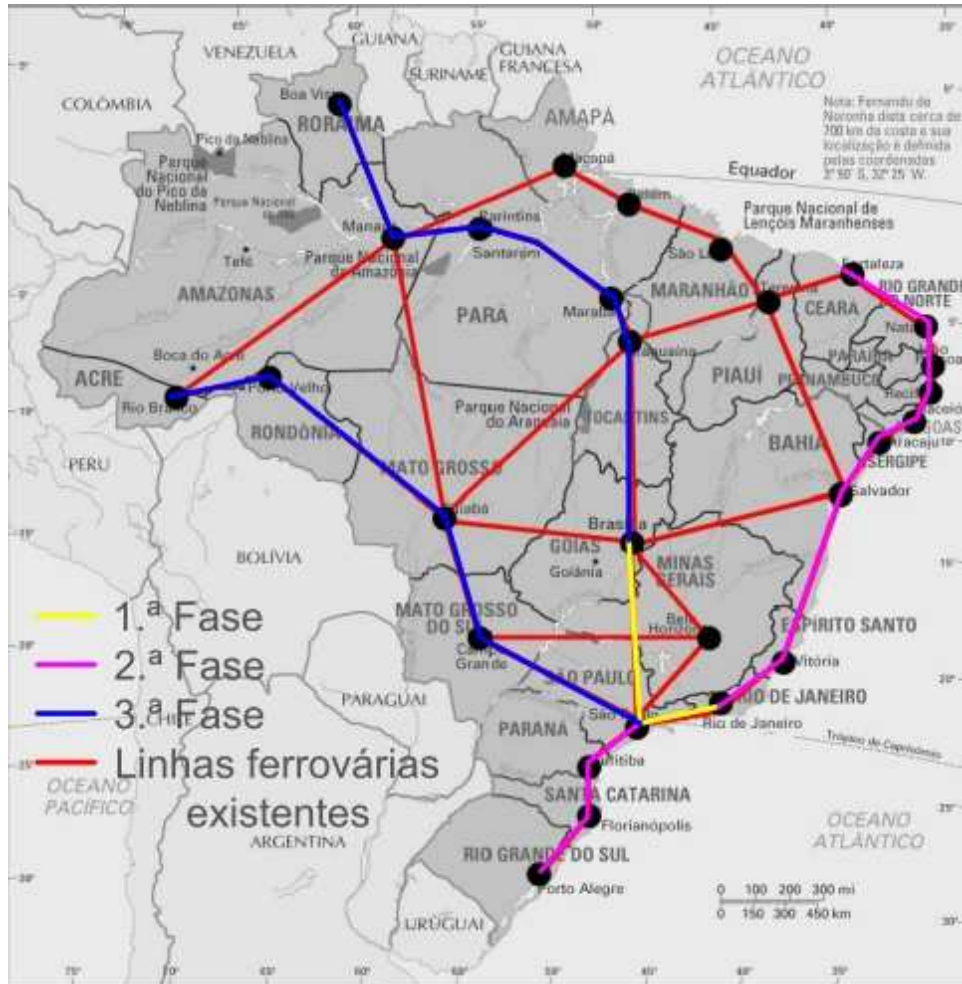


Imagem 109 – Traçado das fases propostas

Vai-se abordar aqui o traçado para 1ª fase apenas, descrevendo quais as cidades e as distâncias e os seus tempos de viagem. Sugere-se para primeira fase algumas viagens diretas sem interrupções entre as três maiores cidades, tentando assim conseguir atrair passageiros que normalmente usam o avião como forma de se deslocarem entre as maiores cidades. Além destas viagens diretas propõe-se também outras ligações entre outras cidades intermédias que se situem ao longo do desenvolvimento do traçado. Na tabela 16

estão indicadas as 11 estações propostas para esta primeira fase, assim com as distâncias e duração das viagens entre cada uma delas. Esta primeira fase o traçado tem uma extensão total de 1513 km aproximadamente.

Tabela 13 – Distância e duração prevista das viagens entre as estações propostas

Percursos	Distância aproximada (km)	Duração (h)
Rio de Janeiro → Nova Iguaçu	40	00:35:27
Nova Iguaçu → Volta Redonda	91	00:42:15
Volta Redonda → São José dos Campos	230	01:00:47
São José dos Campos → São Paulo	90	00:42:07
São Paulo → Campinas	94	00:42:39
Campinas → São Carlos	143	00:49:11
São Carlos → Ribeirão Preto	101	00:44:12
Ribeirão Preto → Uberada	174	00:53:19
Uberada → Uberlândia	108	00:44:31
Uberlândia → Brasília	442	01:29:03
Total	1513	8:23:31

Na tabela 17 apresentam-se as distâncias e as durações das viagens entre o Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília, sendo que neste cenário as viagens seriam realizadas sem qualquer paragem em cidades intermédias. Como se verifica na tabela 16 o tempo de viagem é de 8 horas e 23 minutos, neste cenário o avião é mais eficaz, contudo ao realizar viagens expresso que só param nas 3 cidades a viagem demora apenas 4 horas e 21 minutos, aqui já se torna mais eficaz do que o avião.

Tabela 14 – Duração e distância das viagens entre Rio de Janeiro; São Paulo e Brasília

Percursos	Distância aproximada (km)	Duração (h)
Rio de Janeiro → São Paulo	451	01:30:15
São Paulo → Brasília	1062	02:51:43
Total	1513	04:21:58

Na imagem 110 ilustram-se as estações sugeridas no traçado desta primeira fase que atravessam quatro estados brasileiros, o estado do Rio de Janeiro, o estado de São Paulo, o estado de Minas Gerais e o estado de Goiás.



Imagem 110 – Estações do traçado da primeira fase.

O veículo deslocar-se-ia a uma velocidade operacional aproximada de 450 km/h, mas necessita cerca de 10 km a atingir essa velocidade, assim sendo considerou-se nos primeiros 9 km de cada estação, como nos últimos 10 km antes de chegar a estação, que o veículo se deslocaria a uma velocidade média de 47,77 Km/h. Este cálculo da velocidade média baseia-se na imagem 111 onde se demonstra a relação entre a velocidade e a distância do Transrapid em utilização comercial em Xangai.[51]

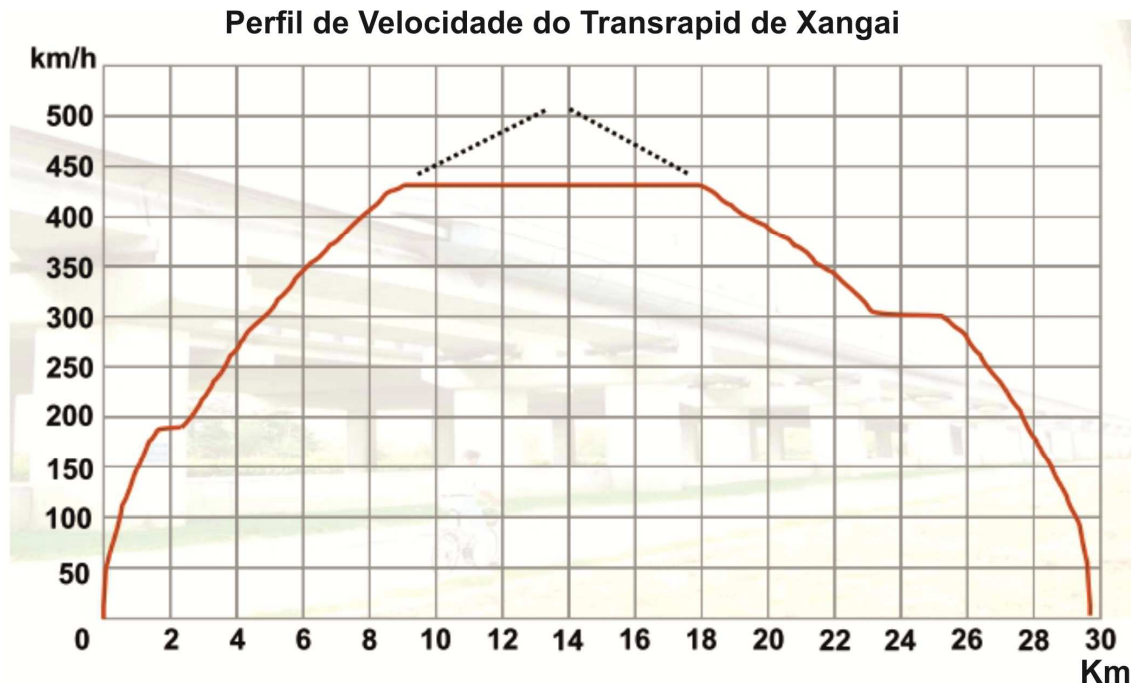


Imagem 111 - Perfil de velocidade do Transrapid de Xangai [51]

O tempo de viagem contemplando paragens em todas as estações é de cerca 8 horas e 23 minutos sendo, a viagem expresso demoraria cerca de 4 horas e 21 minutos desde o Rio de Janeiro até Brasília passando por São Paulo. A viagem neste de sistema tal como nos sistemas de alta velocidade nas linhas de caminho de ferro, permitem a utilização do telemóvel, não necessitam de *check in*, não existindo turbulência nem as outras restrições que são inerentes à aviação. Este sistema possui o potencial de atrair muitos utilizadores da aviação e outros utilizadores.

## **7. Conclusões**

### **7.1. Considerações finais**

Após análise pode-se afirmar que as linhas de caminho de ferro de alta velocidade se encontram em expansão em todo o mundo, existindo vários países que manifestam interesse em implementar o sistema ou renovar as suas linhas de caminho de ferro. Contudo baseado na pesquisa que foi desenvolvida neste trabalho pode-se constatar que os sistemas de alta velocidade atingiram provavelmente o “apogeu” do seu desenvolvimento. O sistema de contacto roda carril possui limitações físicas e problemas tais como a falta de atrito, que podem comprometer a segurança do sistema ou impedir o correto funcionamento do mesmo.

Os sistemas de levitação magnética representam a alternativa ideal às atuais linhas de alta velocidade das ferrovias, pois são um sistema onde não há contacto físico com o trilho eliminando qualquer tipo de fricção, sendo um sistema mais veloz do que os sistemas das linhas de caminho de ferro, é mais silencioso, com custos de manutenção e consumos energéticos mais eficientes, apresentam maior aceleração e maior capacidade de frenagem, conseguindo vencer inclinações longitudinais na ordem dos 10%.

Além destas vantagens os sistemas apresentados neste trabalho têm mais evoluções que permitem reduzir custos, especialmente na fase de construção, tendo em vista que o sistema não necessita de escala em curva. A escala está associada ao veículo e não à via, permitindo uma construção contínua e a possibilidade de utilizar elementos pré fabricados. Sendo o veículo que roda em curva devido à existência de um campo magnético, não há necessidade de aplicação de sobrelevação da via, reduzindo os tempos de construção, como os controlos da topografia do terreno e os devidos ajustes para garantir a sobrelevação

necessária. O trilho induz ao veículo campos magnéticos que servem: de guiamento transversal; sustentação ao longo da via; propulsão e travagem e em curva; e a rotação que substitui a escala ou a sobrelevação. A rotação do veículo é apenas realizada em curva, e esta rotação tem como vantagem o facto de se ajustar a velocidade do veículo, garantindo o melhor de conforto para os passageiros. A rotação sendo ajustável em curva é mais vantajosa, do que uma escala fixa existente na via que foi realizada para uma determinada velocidade de projeto. O veículo pode, por vários motivos, ter de se deslocar a uma velocidade inferior à velocidade prevista do projeto, caso isso aconteça e se a velocidade for inferior do que a velocidade de projeto, os passageiros podem o efeito contrário ao da força centrífuga e passam a sentir a força centrípeta. Este fenómeno é bem mais evidente se por acaso o veículo parar em curva. Assim sendo quando a rotação é realizada em tempo real, para uma determinada velocidade, este sistema garante um melhor grau de conforto e se por acaso o veículo parar em curva este ajusta-se, de modo a ficar perpendicular ao solo. Este controlo da rotação, guiamento, sustentação, propulsão e travagem é realizado por controlo informático que ajustam em tempo real todos os parâmetros, garantido a segurança e o conforto dos passageiros.

A aplicação deste sistema no vasto território brasileiro é uma solução viável. O Brasil apresenta uma rede ferroviária que necessita de ser estendida e renovada. Existe um grande fluxo pessoas entre as grandes metrópoles brasileiras, estas deslocações, são realizadas por automóvel ou por avião, que são potenciais utilizadores de um sistema de alta velocidade se este for implementado. A aplicação de um sistema de alta velocidade no território brasileiro, como o sistema de levitação magnética, não só garante um maior velocidade e segurança, como pode colocar o Brasil na vanguarda da levitação magnética. Durante este trabalho verificou-se que os sistemas de levitação apresentam ainda um custo de implementação superior aos sistemas de linhas de caminho de ferro de alta velocidade

existentes. Contudo, tendo em conta o baixo consumo e os baixos custos com a manutenção dos sistemas de levitação magnética pode-se afirmar que o investimento realizado terá rapidamente o retorno expectável comparativamente aos sistemas de linhas de caminho de ferro, tornando-se assim um sistema para o futuro.

## 7.2. Desenvolvimentos futuros

Os sistemas referidos neste trabalho apresentam uma série de desafios e, no sentido de se verificar fisicamente a sua possibilidade operacional, será necessário a realização de um modelo à escala dos veículos e dos trilhos, para que se possa verificar a rotação dos sistemas em curva. Antes da execução deste modelo, deverão ser realizadas várias experiências no sentido de verificar como os seus diversos campos magnéticos se vão comportar quando o veículo roda em curva através da introdução de uma nova força magnética e de que forma é que se podem calibrar e equilibrar estas forças. Caso se consiga verificar a operacionalidade do sistema, existirá a necessidade de verificar e dimensionar os trilhos para os dois sistemas aqui propostos. Para além do dimensionamento dos trilhos podem também ser desenvolvidos métodos construtivos contínuos *in situ* específicos para cada tipo de sistema, de forma a garantir a maior produtividade e com o menor custo possível. Os veículos presentes nestes sistemas poderão também ser adaptados para transporte de todo o tipo de mercadorias.

No âmbito da eficácia energética os trilhos e os veículos a implementar poderão estar providos de painéis fotovoltaicos garantindo assim o menor consumo e podem eventualmente alimentar a linha ou vender energia à rede pública.

A rotação do veículo e locomoção através do magnetismo pode ter aplicabilidades noutros sectores da indústria, tal como aconteceu com a aplicação da levitação magnética em alguns elevadores que estão a ser desenvolvidos atualmente.

Assim sendo, os sistemas aqui apresentados são uma melhoria aos sistemas propostos, contudo será necessário a formação de equipa multidisciplinar de investigação nas suas diversas áreas da ciência, para planear, experimentar, ajustar os sistemas desde do projeto à sua aplicabilidade e operacionalidade, garantido assim uma melhoria significativa a um sistema que já é inovador.

O sistema de rotação do veículo sobre o trilho apresentado neste trabalho, pode ser aplicado a alguns outros projetos conceptuais como o caso do SWISSMETRO, que representa um sistema que se desloca em ar rarefeito. O SWISSMETRO e outros sistemas que estão agora em fase de desenvolvimento podem beneficiar da solução apresentada nesta dissertação, tornando estes sistemas mais eficientes.

## **8. Bibliografia**

- [1] J. Walter, “The Iron Horse A CONCISE ILLUSTRATED HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF STEAM TRACTION.” Archiving Industry 2012, 2012.
  
- [2] F. Breu, S. Guggenbichler, and J. Wollmann, “PRACTICAL RAILWAY ENGINEERING 2nd Edition,” 2008. [Online]. Available: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>. [Accessed: 18-Feb-2014].

- [3] “Railways Archive U.K.” [Online]. Available: <http://www.railwaysarchive.co.uk/docsummary.php?docID=89>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [4] “Catchmewhogan.” [Online]. Available: <http://www.catchmewhogan.org.uk/home.html>.
- [5] C. Esveld, “Modern railway track,” MRT Productions; 2nd ed edition (2001), 2001.
- [6] R. Ferreira, “Interoperabilidade ferroviária Infraestrutura ( Bitola ),” 2012.
- [7] “DNIT- Ferroviário.” [Online]. Available: <http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [8] “RFFSA - Inventariança da extinta Rede Ferroviária Federal S.A.” [Online]. Available: <http://www.rffsa.gov.br/imagem/Baroneza.JPG>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [9] P. Carlos and F. De Lima, “Pequena História dos caminhos de ferro,” *Assoc. Port. dos Amigos dos Caminhos*, pp. 1–7.
- [10] “Biblioteca Nacional de Portugal.” [Online]. Available: <http://purl.pt/3367/3/>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [11] “CP.” [Online]. Available: <https://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vnextoid=1d94079ffa057010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD>. [Accessed: 18-Mar-2015].

- [12] “Transportes de Lisboa.” [Online]. Available: <http://www.metrolisboa.pt/empresa/um-pouco-de-historia/>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [13] L. Zhou and Z. Shen, “Progress in high-speed train technology around the world,” vol. 19, no. 1, pp. 1–6, 2011.
- [14] “The ROMAG Maglev GRT Technology.” [Online]. Available: <http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/romag.htm>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [15] J. H. Lever, “Technical Assessment of Maglev System Concepts Final Report by the Government Maglev System Assessment Team,” pp. 1–16, 1969.
- [16] I. Transrapid, “The future is already here.”
- [17] R. I. Popovici, *Friction in wheel - rail contacts*. 2010.
- [18] Y. Zhu, *Adhesion in the wheel – rail contact under contaminated conditions*. KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [19] U. Olofsson and R. Lewis, “Handbook of Railway Vehicle Dynamics,” May 2006.
- [20] C. Esveld, R. Engineering, and V. L. Markine, “Shape Optimisation of a Railway Wheel Profile,” pp. 1–7.
- [21] L. Explotaci, “José Luis López Gómez,” no. Ii, 2013.
- [22] P. Ferrão, “Rodas , eixos e bogies,” pp. 1–47.
- [23] R. T. Today, “How Bogies Work,” vol. 5, no. December, pp. 52–61, 1998.

- [24] “trainweb.” [Online]. Available:  
<http://trainweb.org/tgvpages/images/laposte/index.html>. [Accessed: 18-Mar-2015].
- [25] F. Portela, “Infraestruturas ferroviárias normas e especificações técnicas.”
- [26] D. Paulo and F. Teixeira, “Fundamentos , parâmetros e critérios de projecto de traçado ferroviário : Circulação em curva , sistemas pendulares , curvas de transição , traçado em alçado .,” no. Módulo 1.
- [27] “railes\_garganta.pdf.” .
- [28] F. de M. Parente, “Módulo 2 - Projecto de via f Projecto de via férrea e aparelhos de via,” 2009.
- [29] “Necessidade de um sistema de transporte ferroviário . Fundamentos do sistema roda-carril e características principais dos componentes da via férrea . Docente : Paulo Fonseca Teixeira ( IST ),” no. Módulo 1.
- [30] E. Fortunato, “Modernização de Linhas Férreas Análises técnicas e socioeconómicas Reabilitação da via férrea ? Reabilitação da subestrutura ?,” 2014.
- [31] R. Sousa, “Universidade Estadual de Campinas BALANÇA CURIE E CORRENTES DE FOUCAULT,” 2005.
- [32] H. Yaghoubi, “Practical Applications of Magnetic Levitation Technology Technology,” no. September, 2012.
- [33] H. Yaghoubi, “The Most Important Maglev Applications,” *J. Eng.*, vol. 2013, pp. 1–19, 2013.

- [34] O. Moraes, “Levitação Magnética - Universidade Estadual de Campinas,” pp. 1–16.
- [35] B. Brevet, “Bachelet\_brevet\_1912.pdf.” .
- [36] Transrapid, “ThyssenKrupp Transrapid GmbH.” [Online]. Available: [http://www.transrapid.de/cgi/en/basics.prg?session=c1899d5453666a6c\\_678418](http://www.transrapid.de/cgi/en/basics.prg?session=c1899d5453666a6c_678418).
- [37] “the International Maglevboard.” [Online]. Available: [http://magnetbahnforum.de/index.php?en\\_aboutimb](http://magnetbahnforum.de/index.php?en_aboutimb).
- [38] E. Levitation and L. M. Car, “HSST Systems International Inc. ITOCHU International Inc.”
- [39] E. A. Perondi and P. U. Gpfai, “DEVELOPMENT OF A CONTROLLER FOR AN ACTIVE SUSPENSION SYSTEM FOR HIGH PERFORMANCE ELEVATORS,” vol. 3, no. 2001, pp. 46–55, 2008.
- [40] J. Čermák, R.; Bartoň, L.; Spal, P.; Barták, J. & Vavřík, “OVERVIEW OF MAGNETIC LEVITATION PRINCIPLES AND THEIR APPLICATION IN MAGLEV TRAINS,” vol. 2, pp. 19–28, 2008.
- [41] T. International, “Flying on the ground,” 1991.
- [42] A. Richard, M. Stephan, and G. David, “MAGLEV-COBRA: O TRANSPORTE URBANO SOBRE TRILHOS MAGNÉTICOS Autores: Richard Magdalena Stephan e Eduardo Gonçalves David.”
- [43] a. Cassat and M. Jufer, “MAGLEV projects technology aspects and choices,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 12, pp. 915–925, 2002.

- [44] P. B. Obama, “California-Nevada Interstate Maglev Project ( CNIMP ) A Guideway to the Future ® A Guideway to the Future ® Southern California to Southern Nevada.”
- [45] A. S. T. Ultra, H. Speed, L. With, A. S. Trunk, E. To, T. H. E. Brownlelds, and O. F. The, “KM H GROUND TRANSPORT FOR " RITAIN % AST IN LESS TIME THAN IT CURRENTLY TAKES LINKED BY A JOURNEY OF LESS THAN AN HOUR.”
- [46] C. High and S. Rail, “The Transrapid Magnetic Levitation System : A Technical and Commercial Assessment Brian D . Sands UCTC No . 183 The University of California Transportation Center University of California Berkeley , CA 94720,” no. 183.
- [47] M. Knobel, “maglev,” pp. 1–26, 1842.
- [48] J. Santos and A. Coelho, “A Via Ferroviária de Alta Versus Via de Levitação Magnética.”
- [49] H. Lee, K. Kim, and J. Lee, “Review of maglev train technologies,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 7, pp. 1917–1925, Jul. 2006.
- [50] T. Ag, ““ Flying on the Ground .””
- [51] S. Ag and A. R. Reserved, “Shanghai Maglev Transrapid Technology Propulsion Traveling Field,” no. C, 2006.

- [52] Daily Tech, “Daily Tech.” [Online]. Available: <http://www.dailytech.com/Japan+Gives+Top+US+Politicians+a+Free+Ride+Sales+Pitch+on+New+Maglev+Trains/article33778.htm>.
- [53] J. Santos and A. Coelho, “A Via ia Ferroviária erroviária de Alta V Velocidade elocidade Versus ersus ia de Levitação evitação Magnética agnética A Via Ferroviária de Alta V Velocidade elocidade Versus Via de Levitação Magnética.”
- [54] R. Thome, A. Radovinsky, and B. Montgomery, “EDS Levitation and Guidance Using Sheet Guideways 2 Magplane System Description 1 Introduction Design Issues for Sheet Guideways,” no. 617, 1992.
- [55] S. Report, “MAGLEV SYSTEM OF TRANSPORTATION,” 2011.
- [56] A. J. PRASAD, “MAGLEV SYSTEM OF TRANSPORTATION,” 2011.
- [57] J. Khachan and S. Bosi, “Superconductivity,” 1933.
- [58] K. Onnes, “O fascinante mundo dos materiais Supercondutores,” 1911.
- [59] P. S. Branício, “Introdução à Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MgB<sub>2</sub>: Uma Ab rdagem Didática,” *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 23, 2001.
- [60] “RTRI - Yamanashi Teste Line.” [Online]. Available: [http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/yamanashi/english/yamanashi\\_testline\\_E.html](http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/yamanashi/english/yamanashi_testline_E.html).

- [61] “RTRI - Railway Technical Research Institute JR,” 2014. [Online]. Available: <http://www.rtri.or.jp/eng/>.
- [62] “TNEM - The Northeast Maglev.” [Online]. Available: <http://northeastmaglev.com/>.
- [63] C. Schmidt, “INDUCTRACK MAGNETIC LEVITATION TRAINS FOR MORE EFFICIENT TRAVEL IN THE UNITED STATES A BRIEF HISTORY OF MAGLEV,” 2014.
- [64] J. F. Hoburg and R. F. Post, “A Laminated Track for the Inductrack System : Theory and Experiment,” 2004.
- [65] “Magnetic Levitation or Maglev Propulsion.” [Online]. Available: <http://www.venusproject.org/new-energy/magnetic-levitation-or-maglev-propulsion.html>.
- [66] “Monorails.” [Online]. Available: <http://www.monorails.org/tmspages/TPMagIntro.html>.
- [67] Y. Kasai, “JR Central ’ s Business Strategy,” no. February, 2012.
- [68] General Atomics, “CONCEPTUAL DESIGN STUDY FOR THE ELECTRIC CARGO CONVEYOR (ECCO) SYSTEM Final Report,” no. October, 2006.
- [69] E. Fields, “Campos electromagnéticos e saúde pública,” pp. 2–5, 2006.
- [70] T. International, ““ Flying on the Ground .””

- [71] D. P. E. Coordena, I. Sociais, C. Ger, and D. A. S. Uf, “ESTIMATIVAS DA POPULAÇÃO DOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS COM DATA DE REFERÊNCIA EM 1º DE JULHO DE 2014.” pp. 1–18, 2014.
- [72] L. Pita, “Planificación y diseño de líneas de alta velocidad,” 2010, no. 2008.
- [73] A. Group, “Rail Study.”