

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise da Utilização de Materiais  
Piezelétricos em Vias de Redes Metroviárias  
para Geração de Energia Limpa**

Felipe Bonfim Monteiro  
Hanna Freitas Mignot de Carvalho

Projeto final apresentado em cumprimento às normas  
do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como  
parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco  
Coorientador: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

**Rio de Janeiro  
Junho de 2019**

## **Agradecimentos – Felipe Bonfim Monteiro**

Após muita luta, mais uma etapa se encerra e uma nova se inicia. Foram nove anos no total, e quase 5 anos até descobrir a minha paixão pela engenharia mecânica. Hoje encerro com este projeto esta etapa com sentimento de dever cumprido e isto tudo devo a várias pessoas que estiveram ao meu lado durante este tempo.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha grande amiga Hanna, que aceitou estar comigo neste desafio que é o projeto de conclusão de curso. Só nós sabemos as noites mal dormidas, dias inteiros estudando, alegrias e decepções deste período, mas olhando para o que fizemos vejo que valeu a pena pois crescemos muito fazendo juntos este projeto. Agradeço por estar sempre presente, me ajudar no que foi preciso, sempre com sorriso no rosto, mesmo quando parecia que nada estava dando certo.

Gostaria também ao CEFET pela oportunidade de ter estudado nesta grande instituição, que me abriu portas para meu futuro como profissional, assim como ajudou a moldar a pessoa que sou hoje.

Ainda falando do CEFET gostaria de agradecer aos docentes do CEFET pela grande dedicação para com o ensino e um agradecimento especial aos professores Pedro Manuel por aceitar nos orientar e nos ajudar neste projeto, ao professor Fernando Ribeiro por ter nos ajudado com inúmeras dúvidas, e mesmo quando isto não foi possível, nos aconselhou e nos tranquilizou em momentos em que parecíamos não ter ânimo para continuar. Finalmente, gostaria de agradecer à professora Luciana por aceitar ser a nossa co-orientadora e pelo grande empenho em nos ajudar sempre que precisamos, sempre com bons conselhos, alguns puxões de orelha, mas sempre extremamente solícita e interessada pelo nosso trabalho. Muito obrigado professora, sem a senhora este projeto não teria acontecido.

Por fim gostaria de agradecer a meus pais. É por causa deles que hoje sou o que sou e tenho um orgulho enorme da pessoa que me tornei. Agradeço

à minha mãe, Claudia, por sempre estar ao meu lado, me apoiando, não importasse a situação, sempre me dando os melhores conselhos e me falando sempre o que precisava ouvir. Agradeço imensamente ao meu pai, Fernando, por sempre me incentivar e estar sempre comigo em todos os momentos. Ver meu pai trabalhando com engenharia e me contando todas as coisas que fazia, foi o motivo que me fez escolher a engenharia e, apesar de não chegar a ser a pessoa e o profissional incrível que ele é, me contento se chegar a ser algo próximo disso. Agradeço do fundo do coração pelo grande esforço em sempre colocar a minha educação em primeiro lugar, sempre me ensinando os caminhos certos a seguir e me dando a oportunidade de estudar em ótimas instituições, o que me ajudou a chegar aonde estou hoje e me ajudará nos desafios no meu futuro. Agradeço também a minha família e amigos pelo grande apoio durante esta jornada, sempre me dando o apoio e a energia necessária para passar por esta jornada. Esta vitória também é de todos vocês!

Muito obrigado a todos.

# **Agradecimentos – Hanna Freitas Mignot de Carvalho**

Esse trabalho é mais uma etapa de diversas outras que já passaram e que virão pela frente e simboliza uma parte importante da minha vida de estudante que se iniciou há muito tempo. Nessa caminhada, a experiência e instruções de todos aqueles profissionais com quem eu tive a chance de aprender desde o ensino infantil ao nível superior foram e são fundamentais para minha formação não apenas como profissional, mas como pessoa que na minha concepção andam interligadas.

Agradeço a todos que se dedicaram ao ensino e me proporcionaram chegar a essa etapa e nesse projeto em específico, agradeço ao meu amigo Felipe Monteiro, quem concordou em dividir momentos tão importantes de nossas vidas comigo, em meio a aprendizados, dias e noites de interrogações e êxitos com a finalização e compreensão de cada tópico, envoltos de conhecimentos e “cafés”. Agradeço também ao professor Pedro Pacheco por ter aceitado o projeto, ao professor Fernando Ribeiro pelas dicas e imensamente a professora e orientadora Luciana Monteiro, quem assumiu a responsabilidade de nos guiar e se aventurar nas milhões de questões e mostrou toda a sua dedicação com suas ajudas preciosas, demonstrando mais uma vez a grande profissional que é além das melhores aulas que já tive. Menciono, igualmente, o suporte da empresa MetroRio no fornecimento de dados e conhecimentos obtidos ao longo de minha experiência como estagiária.

No entanto, todos esses agradecimentos não poderiam ser realizados sem todo o apoio inigualável dos meus pais Aimbirê Carvalho e Marian Freitas que sempre me ensinaram que educação e respeito são as maiores riquezas de um ser e em meios a muitas e muitas privações para oferecer o melhor a mim e a minha irmã Raphaella Mignot (outra pessoa essencial em todo esse processo) possibilitaram a mim muito mais que concluir esse trabalho, mas a ampliação de todo um horizonte pleno de sonhos. Sem esquecer o apoio de todos os amigos e familiares, meus tios e padrinhos Valéria e Mauro, minha prima Rayane e

minha inesquecível avó Maria Auxiliadora Pinheiro de Carvalho que me acolheram em sua casa em meus primeiros anos no CEFET e permitiram o início dessa jornada com todo o amor, sobretudo minha avó e companheira que esse ano nos deixou, mas que de alguma forma presenciará minha conclusão, como tanto desejava. Espero fazer valer a pena todos os momentos que todos vocês me proporcionaram e que esse trabalho seja apenas mais um de outros super importantes na minha caminhada.

Meu imenso obrigada!

# RESUMO

Nos dias de hoje é frequente se falar em energias renováveis para a substituição dos meios de obtenção de energia mais comuns, que apesar do grande potencial de geração, causam impactos ambientais graves, sejam eles pela queima de combustíveis fósseis, como é o caso das termelétricas, ou com o represamento de rios, alagando grandes áreas de vegetação nativa e até áreas habitadas, sendo necessária a remoção das pessoas e animais da região, como é o caso das hidrelétricas. Por estas e outras muitas razões que foram expostas por meio de estudos em relação à degradação do meio ambiente e destruição da camada de ozônio, estão sendo estudados diversos meios alternativos de obtenção de energia, que gerem menos impactos neste sentido. Uma das tecnologias que vem ganhando grande visibilidade está relacionada ao uso de materiais piezelétricos sujeitos a vibrações do ambiente.

Neste trabalho é analisada a viabilidade da implantação destes materiais acoplados a trilhos da rede de metrô para que, com a passagem dos trens sobre a via e a vibração da mesma, possa ser gerada energia elétrica. Primeiramente realiza-se um levantamento e análise dos casos onde esta tecnologia foi utilizada; como se dá o seu funcionamento; estudo dos modelos utilizados para os cálculos de vibração da via e cálculo das tensões as quais o sistema é submetido. Em seguida desenvolve-se um modelo numérico para prever a energia acumulada com a passagem de um trem usando um oscilador com um grau de liberdade, explorando diferentes parâmetros a fim de avaliar o impacto de cada um deles sobre o potencial energético que o sistema é capaz de gerar para então, avaliar se o projeto é tecnicamente viável.

**Palavras-chave:** Colheita de Energia, Piezeletricidade, Materiais Inteligentes, Ferrovias.

# ABSTRACT

Nowadays, it is common to talk about renewable energies to replace the most common energy sources, which in spite of the great potential of generation, cause serious environmental impacts, by the burning of fossil fuels, as is the case of thermoelectric, or damming rivers, flooding large areas of native vegetation and even in habited areas, requiring the removal of people and animals from the region, such as hydroelectric dams. For those and many other reasons that have been exposed through studies in relation to environmental degradation and destruction of the ozone layer, several alternative means of obtaining energy are being studied which generate less impact in this regard. One of the technologies that has gained great visibility is related to the use of piezoelectric materials subject to environmental vibrations.

This work will analyze the feasibility of the implantation of these materials coupled to rails of the subway network so that, with the passage of the trains over the track and the vibration generated by this movement, electric power can be generated. This will be done, at first, carrying out a survey and analysis of the cases where this technology was used, how it works, study of the models used for the calculation of the vibration of the track and calculation of the tensions which the system is submitted; development of a numerical model to measure the energy accumulated with the passage of a train using an system with a degree of freedom, exploring different parameters in order to evaluate the impact of each of them on the energy potential that the system is able to generate for and then evaluate whether the project is technically feasible.

**Keywords:** Energy harvesting, Piezoelectricity, Intelligent Materials, Railways.

# SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
1.1. Objetivo .....	13
2. Revisão Bibliográfica .....	14
2.1. Surgimento e Evolução das Ferrovias .....	14
2.2. Piezeletricidade .....	19
2.2.1. Definição .....	19
2.2.2. História .....	19
2.2.3. Aplicações .....	23
3. Fundamentos Teóricos .....	32
3.1. Piezeletricidade .....	32
3.2. Características dos Componentes da Via .....	35
3.2.1. Vias Permanentes .....	35
3.2.2. Componentes Principais da Via Permanente.....	36
3.2.3. Bitolas.....	38
3.2.4. Distribuição de Forças na Via Permanente.....	40
4. Dados Empresa MetrôRio - Sistema Metroviário da Cidade do Rio de Janeiro .....	41
4.1. Avaliação de Variáveis do Sistema MetrôRio.....	41
4.2. Trecho Analisado: Logística de Intervalos e Via Permanente .....	41
5. Modelo Analítico .....	44
5.1. Dados Iniciais do Trem .....	44
5.2. Considerações Gerais .....	45
5.3. Cálculos Analíticos .....	46
5.3.1. Análise de Tensão e Deformação.....	46
5.3.2. Equação de Tensão Elétrica para Transdutor Piezelétrico entre Patim do Trilho e Dormente .....	51
6. Modelo Numérico.....	54
6.1. Vibrações em Vias Metroviárias.....	54
6.2. Modelagem Dinâmica da Via e Dispositivo Gerador de Energia .....	56
6.2.1. Parâmetros utilizados.....	59
6.3. Monitoramento da lotação .....	73
6.3.1. Parâmetros utilizados.....	73
7. Considerações Finais .....	76
Referências Bibliográficas .....	78
Anexo I .....	82
Anexo II .....	83
Anexo III .....	84

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Piso do estabelecimento Club Watt .....	26
Figura 2 - Pneu com transdutores piezelétricos .....	27
Figura 3 - Localização dos IPED's.....	28
Figura 4 - Configuração do trilho com transdutores piezelétricos.....	29
Figura 5 - (Esq.) Esquema truque, trilho e transdutor; (Dir.) Ampliação cantilever piezelétrico.....	30
Figura 6 - Polarização em molécula de cristal de quartzo.....	32
Figura 7 – Direções de forças que afetam o elemento piezelétrico.....	35
Figura 8 – Bitolas pelo mundo.....	39
Figura 9 - Camadas da Via Permanente .....	47
Figura 10 - Configuração forças sobre o trilho para análise de compressão ...	48
Figura 11 - Configuração forças sobre o trilho no momento analisado .....	50
Figura 12: Sistema massa mola amortecedor utilizado para a colheita energética.....	57
Figura 13 - Metade de uma Composição .....	60
Figura 14 - (a) Deslocamento Trilho x Comprimento (1 roda); (b) Deslocamento Trilho x Tempo (1 roda).....	61
Figura 15 - (a) Deslocamento Trilho x Tempo (carro A); (b) Deslocamento Trilho x Tempo (carro C); (c) Energia x Tempo (carro A); (d) Energia x Tempo (carro C) .....	63
Figura 16 - (a) Deslocamento gerador x Tempo (carro A – $c = 0,122 \text{ Ns/m}$ ); (b) Deslocamento gerador x Tempo (carro C – $c = 0,122 \text{ Ns/m}$ ); (c) Deslocamento gerador x Tempo (carro A – $c = 1,500 \text{ Ns/m}$ ); (d) Deslocamento gerador x Tempo (carro C – $c = 1,500 \text{ Ns/m}$ ); (e) Deslocamento gerador x Tempo (carro A – $c = 5,500 \text{ Ns/m}$ ); (f) Deslocamento gerador x Tempo (carro C – $c = 5,500 \text{ Ns/m}$ ); (g) Energia x Tempo (carro A); (h) Energia x Tempo (carro C).....	65
Figura 17 - (a) Deslocamento PZT (carro A – $k = 1889$ e $9088 \text{ N/m}$ ); (b) Deslocamento PZT (carro A – $k = 101750 \text{ N/m}$ ); (c) Deslocamento PZT (carro C – $k = 1889$ e $9088 \text{ N/m}$ ); (d) Deslocamento PZT (carro C – $k = 101750 \text{ N/m}$ ); (e) Energia (carro A – variação de rigidezes); (f) Energia (carro A – variação de rigidezes).....	67
Figura 18 - (a) Deslocamento Trilho x Tempo - trem vazio; (b) Deslocamento Trilho x Tempo - Trem lotação máxima.....	69
Figura 19 - (a) Energia x Tempo - trem vazio; Energia x Tempo – trem lotação máxima; (c) Deslocamento PZT x Tempo $c = 5,5 \text{ N/m}$ – trem vazio; (d) Deslocamento PZT x Tempo $c = 5,5 \text{ N/m}$ – trem lotação máxima .....	70
Figura 20 - (a) Deslocamento do gerador – trem vazio $k = 1889 \text{ N/m}$ ; (b) Deslocamento do gerador – trem lotação máxima $k = 1889 \text{ N/m}$ ; (c) Deslocamento do gerador – trem vazio $k = 9088 \text{ N/m}$ ; (d) Deslocamento do gerador – trem lotação máxima $k = 9088 \text{ N/m}$ ; (e) Deslocamento o gerador –	

trem vazio $k = 101750 \text{ N/m}$ ; (f) Deslocamento do gerador – trem lotação máxima $k = 101750 \text{ N/m}$ ; (g) Energia – trem vazio; (h) Energia – trem lotação máxima.....	72
Figura 21 - (a) Deslocamento relativo sistema – $0 \text{ pax/m}^2$ ; (b) Deslocamento relativo sistema – $2 \text{ pax/m}^2$ ; (c) Deslocamento relativo sistema – $4 \text{ pax/m}^2$ ; (d) Deslocamento relativo sistema – $6 \text{ pax/m}^2$ ; (e) Deslocamento relativo sistema – $8 \text{ pax/m}^2$ .....	74

# Capítulo 1

## 1. Introdução

O crescimento da população urbana já alcançou mais de 50% da população mundial conforme relatórios da ONU de 2014 e está previsto para alcançar cerca de 70% de acordo com a McKinsey Global Institute. Esse constante crescimento leva a considerar uma série de alternativas entrelaçadas ao modelo de desenvolvimento dessas áreas e a melhoria de vida de seus habitantes.

A preocupação com meios de locomoção atenta a exploração de sistemas como o metrô, numa forma de mitigar congestionamento de automóveis, prover fácil e rápido acesso a demais zonas da metrópole e aumentar a qualidade de vida. Não obstante a busca por meios de transportes em massa que satisfaça os requisitos antes citados e uma operação eficaz e segura, a redução da queima de combustíveis fósseis e preocupação geral com o meio ambiente, sobretudo nas áreas urbanas, tomadas pela concentração da poluição e seus efeitos, devem ser estimuladas. Para a harmonia das futuras populações o incentivo massivo a práticas de minimização do impacto ambiental e investimentos em meios de transportes como o sistema metroviário, se tornam essenciais.

Algumas dessas práticas já vêm recebendo esforços no Brasil e no mundo com a tentativa de diversificação da matriz energética. Segundo a Agência Internacional de Energia (2018), o Brasil é o terceiro país em geração de energias renováveis, porém grande parte dessa colocação se deve a energia provinda de hidrelétricas, que ainda tem efeitos danosos às áreas onde são alocadas. Além disso, modais à propulsão elétrica e não por combustíveis fósseis como metrôs, VLT's (veículos leves sobre trilhos) e trens urbanos, se limitam a cerca de 12 capitais brasileiras, somente.

Estendendo essa inquietação, as tecnologias em materiais piezelétricos que vem sendo aperfeiçoadas e têm se mostrado grandes aliadas ao propósito sustentável, principalmente, com diversas aplicabilidades em ambientes urbanos de grande transição parecem ser subutilizadas e com incipiente participação brasileira em pesquisas.

Em meio a essa vagarosa trajetória rumo à eficiência energética e equilíbrio entre sustentabilidade e urbanização, estudos no âmbito da união entre meios de transportes alternativos e energias renováveis servem de impulsionadores. Logo, a análise da implementação do conceito de colheita de energia através de materiais piezelétricos sujeitos a vibrações alinhada à operação metroviária se torna alvo desse projeto, possível vetor de transformações do atual modelo urbanístico.

## 1.1. Objetivo

O presente trabalho visa a análise de viabilidade técnica da implantação de dispositivos piezelétricos em trilhos metroviários com o objetivo de transformar a energia mecânica decorrente da passagem dos trens em energia elétrica. O trecho a ser analisado será o de maior movimentação de carros no metrô da cidade do Rio de Janeiro, trecho este compreendido entre as estações Botafogo e Central.

Para este fim, será desenvolvido um modelo matemático aproximando as características do trecho de via escolhido para análise das forças e vibrações que atuam sobre o mesmo e posterior análise da quantidade de energia elétrica que pode ser gerada com a instalação de dispositivos piezelétricos, variando diferentes parâmetros do modelo sugerido a fim de se estudar as suas influências na capacidade de geração de energia durante a passagem dos veículos.

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

#### 2.1. Surgimento e Evolução das Ferrovias

Para entendimento da eclosão do sistema metroviário é fundamental uma análise do início do século XVI na Europa. Vale lembrar que por volta de 650 A.C. na Grécia Antiga já se via os traçados de uma rota predeterminada, o que se assemelha a predestinação das composições ferroviárias. Porém, voltando ao século XVI, é possível ver com mais clareza as primícias daquilo que se desenvolveria e se tornaria o que chamamos hoje de ferrovia, de onde deriva o sistema metroviário.

Na Europa nesse período, a exploração de minérios que perpetuou de maneira precária por anos - como retratada em trechos da obra “Germinal”, de 1885, do escritor francês Émile Zola - possuía a necessidade de escoar os minérios extraídos do subsolo até a superfície. Como forma de atender essa demanda, segundo Enciclopédia Delta Universal (1985) (apud NETO, 2018, p.4), dois trilhos de madeira compunham uma via, por onde compartimentos dotados de rodas com frisos corriam, sendo puxados por animais (em geral, cavalos) ou homens. Era fato que ainda em seus primórdios, esse sistema era muito mais eficiente que cargas transportadas diretamente por pessoas ou compartimentos sendo levados num chão úmido e irregular.

Na Inglaterra, em meados do século XVIII, os mineiros viram a possibilidade de tornar esses trilhos mais resistentes e duráveis, revestindo-os com tiras de ferro. Logo se iniciou a fabricação de trilhos inteiramente de ferro, munidos de bordas para condução de vagões com rodas comuns de carroções. Já no fim desse mesmo século, os trilhos de ferro passaram a ser produzidos sem as bordas, por onde vagões com rodas de bordas ressaltadas correriam.

Paralelamente, esse mesmo período evidenciava o aprimoramento da máquina a vapor patenteada por James Watt (patente britânica número 1321) – inventor escocês, em 1782, quem adicionou um condensador separado e uma câmara ao motor.

Avançando mais um pouco, no início do século XIX, precisamente em 21 de Fevereiro de 1804, o inventor inglês, Richard Trevithick teve a ideia de unir a máquina a vapor de Watt, utilizando sua habilidade de aproveitar pressões de vapor para fazer girar o eixo de tração conectado a um chassi de quatro rodas projetado para se deslocar sobre trilhos. Esta ideia foi testada no mesmo ano, na qual uma máquina a vapor aperfeiçoada percorreu o caminho de Penydarren até o canal Merthyr-Cardiff, no País de Gales, podendo transportar até 10 toneladas de ferro, 70 passageiros e cinco vagões. Essa foi então a primeira locomotiva bem-sucedida do mundo. A partir de então, essa união passou a ser explorada e desenvolvida.

Em 1825, o construtor e engenheiro inglês George Stephenson construiu a primeira ferrovia pública do mundo a usar máquinas a vapor, ligando as cidades de Stockton-on-Tees à Darlington, ambas no norte da Inglaterra. George Stephenson era um grande apoiador e crédulo do sucesso das ferrovias mesmo em meio de tantas desconfianças da época, como chegou a afirmar HC Knight em seu livro *"The Rocket"* (1897), transpondo as palavras de Stephenson "uma coisa eu sei, que antes de muitos anos as ferrovias se tornarão as grandes rodovias do mundo".

Em 6 de Outubro de 1829, um concurso foi proposto pelos diretores da *Liverpool and Manchester Railway*, a fim de receberem ideias a respeito de uma nova locomotiva e tipo de motor. Dentre quatro locomotivas participantes, estava a *Rocket*, construída por George Stephenson e seu filho Robert. Alcançando uma velocidade máxima de cerca de 46 km/h e apresentando uma performance fora do esperado, surpreendendo à todos os presentes, a *Rocket* foi a ganhadora do concurso de Rainhill.

Não bastavam as contribuições já oferecidas por George Stephenson a esse novo meio de transporte, o mesmo notou a necessidade de padronizar as bitolas. Muitas complicações provinham quando se esbarrava com a incompatibilidade desses elementos. Dessa forma, a bitola de 4 pés 8  $\frac{1}{2}$  polegadas, cerca de 1435 mm, também conhecida por calibre de Stephenson virou a bitola padrão. Tal bitola tornou-se e é ainda hoje a mais usada nas ferrovias do mundo, estando presente em 55 % delas.

As ferrovias começavam a traçar seus rumos e já não serviam apenas como transporte de cargas. Em 1830 o primeiro serviço de transporte de passageiros foi instaurado. Porém, qual rumo esse modo de transporte tomou até originar o metrô?

As ruas do centro de Londres, no século XIX, encontravam-se plenas de carroças, carruagens, ônibus puxados por cavalos. Linhas ferroviárias se limitavam às áreas periféricas, que eram proibidas por uma Comissão Real de 1846, de se expandirem à zona central. A superlotação e a necessidade de locomoção do centro às periferias eram nítidas e a seguinte questão era evidente: “Como solucionar esse paradoxo?”.

Foi então que o visionário Charles Pearson sugeriu a transferência dos transportes coletivos para viadutos ou para baixo da terra. E em 1853 um projeto de lei aprovou a construção da “ferrovia subterrânea” entre Paddington e Farringdon que com investimentos também privados iniciou as escavações em 1860. Esse foi o princípio de uma grande malha metroviária, com túneis abertos pela técnica *cut-and-cover* de engenharia civil e trens movidos à vapor.

Inaugurado em janeiro de 1863, o sistema transportava cerca de 26000 passageiros por dia. Ainda com a ventilação primária precária e com o vapor gerado pelos trens, alguns trechos ficaram a céu aberto e um carro foi acoplado ao final da composição para captação do vapor expelido, que era esvaziado ao final das viagens. Intervalos regulares foram estabelecidos e novas linhas surgindo. O primeiro sistema metroviário serviu de exemplo à outras metrópoles

como: Paris, Berlim, Budapeste e foi dando forma àquele que se conhece atualmente.

A passagem das locomotivas à vapor para as elétricas se deram por volta de 1860, após uma jornada paralela a todo percurso histórico que foi descrito até o instante. Robert Davison fazia a primeira experiência de uma locomotiva elétrica nas ferrovias de Edimburgo e Glasgow, em 1837 (cerca de dez anos depois da descoberta de Faraday, que por sua vez, foi o primeiro a produzir rotações mecânicas por meios elétricos), conforme aludido no livro “Eletricidade em Locomoção” (WHYTE, 1991).

Desenvolvimentos técnicos foram aplicados aos motores elétricos e em 1879 era claro que mesmo com perdas, esse modo de tração era o mais eficiente dentre os existentes. A instalação de um “terceiro trilho” nos sistemas ferro e metroviários serviu para estabelecer uma ligação contínua entre o motor no veículo e o dínamo estacionário. Terceiro trilho esse que fornece, nos dias atuais, ao metrô da cidade do Rio de Janeiro uma tensão de alimentação de 750 VCC.

Importante ressaltar que o primeiro sistema metroviário a substituir as máquinas a vapor pelos motores elétricos foi o pioneiro londrino pela City and South London Railway em 18 de dezembro de 1890. A partir de então, não apenas o desenvolvimento de propulsores, materiais e mecanismos mais eficientes sucederam. Complementarmente, a necessidade de entendimento dos esforços sofridos pelos componentes da via e do comportamento dela como um todo, impulsionou a elaboração de modelos de vias.

Inicialmente, modelos estáticos foram elaborados, sendo o modelo de Winkler (1867), o pioneiro e base para modelos posteriores. Em sua proposição, Winkler considera o trilho como uma viga infinita de Euler-Bernoulli, o que permite uma simplificação da teoria da elasticidade, viabilizando cálculos de deflexão de uma viga submetida a carregamentos estáticos ou dinâmicos, por meio de uma equação diferencial parcial linear. Ele atribui um parâmetro para a fundação, porém não considera: características dinâmicas do carregamento;

palmilhas resilientes; suporte pontual para trilhos; propriedades dos dormentes; características das camadas do pavimento.

A evolução da proposta de Winkler, tem como exemplo a contribuição de Schwedler (1888), quem estabelece uma viga infinita sobre fundação elástica e uma carga pontual, como condições de contorno para a equação proposta por Winkler, obtendo modelos analíticos para deflexão e momento fletor. Adicionalmente, Zimmermann (1888), quem assume trilhos apoiados continuamente por molas justapostas de rigidez constante e que segundo Brina (1979), possui efeitos do carregamento limitados a poucos dormentes e deflexões dos dormentes proporcionais às tensões de contato com o lastro. Seguidos pelo modelo de Talbot (1919), quem assume o trilho como uma viga apoiada continuamente sobre fundação elástica de módulo de via, também conhecido por coeficiente de fundação, que considera o efeito estrutural do conjunto: dormentes, lastro, sublastro e subleito. Embora os novos modelos tenham incorporado novos parâmetros ao de Winkler, não consideram três dimensões do pavimento e não conseguem refletir a não linearidade e não-homogeneidade dos componentes, sobretudo as camadas granulares: lastro, sublastro e subleito (SILVA, 2016).

Na investida de aproximar mais os modelos da situação real, Timoshenko foi o primeiro a tentar uma solução analítica considerando fenômenos dinâmicos à via. Assim como o modelo de Winkler foi referência para os posteriores, principalmente considerando análise estática, o de Timoshenko passou a ser referência para os que sucederam a análise dinâmica. Apesar de ser referência para uma análise dinâmica, o modelo de Timoshenko não considera diversos parâmetros, tais como: comportamento dinâmico ou não linear do aterro/terraplanagem, suporte discreto do trilho, flexibilidade dos dormentes, palmilhas resilientes, função realística dos carregamentos, momento de inércia e deformação por cisalhamento dos trilhos e dormentes. Simplificando o modelo de Timoshenko, Ahlbeck, Meachan e Prause modelaram a via como uma única massa efetiva apoiada numa mola representando a rigidez total da via. Eles

derivaram da primeira frequência natural do trilho a massa concentrada efetiva, considerando o trilho uma viga infinita sobre fundação elástica.

A exemplo dos autores citados, uma pluralidade de modelos é proposta, onde diferentes parâmetros são acrescentados ou excluídos, de acordo com a realidade do sistema e onde modelagens numéricas começaram a ser introduzidas devido à grande complexidade das análises.

## **2.2. Piezeletricidade**

### **2.2.1. Definição**

*“Piezeletricidade é a propriedade que alguns dielétricos têm, de desenvolver uma polarização quando submetidos a uma tensão mecânica. A polarização produzida pela tensão cria cargas de polarização e, portanto, um campo elétrico. Reciprocamente, a aplicação de um campo elétrico num material piezelétrico resulta na deformação mecânica chamado efeito piezelétrico reverso”.* (REZENDE, 2004)

### **2.2.2. História**

A piezeletricidade foi descoberta no ano de 1880 pelos irmãos, Jacques e Pierre Curie, dois físicos franceses. Através de um experimento, que consistia em aplicar cargas superficiais sobre alguns cristais (turmalina, quartzo, topázio, cana-de-açúcar e sal de Rochelle), foi observado que estes se deformam gerando um campo elétrico. O fenômeno observado chamou atenção da comunidade científica que o nomeou de piezeletricidade, com o objetivo de distingui-lo de outros fenômenos semelhantes, tais como: eletricidade de contato (gerada por atrito) e piroeletricidade (gerada a partir do aquecimento de cristais).

Já no ano de 1881, Gabriel Lippmann descobriu o efeito inverso ao já descoberto pelos irmãos Curie. Estes mesmos cristais, quando submetidos a um campo elétrico, se deformam mecanicamente de forma proporcional à intensidade deste campo. Propriedade que foi matematicamente deduzida dos princípios fundamentais da termodinâmica.

Devido à grande relevância das descobertas, foi estabelecido um núcleo de pesquisas para estudos relacionados ao tema. Desde essa data até o ano de 1910, muitos trabalhos foram realizados, permitindo a classificação dos cristais piezelétricos em 20 classes e a partir disso a definição de 18 coeficientes piezelétricos macroscópicos acompanhando um rigoroso tratamento termodinâmico de sólidos de cristal usando análise tensorial apropriada. Em 1910, Voigt publicou seu trabalho de referência padrão "Lerbuch der Kristallphysik" (trabalho este que englobava conhecimentos adquiridos nos anos anteriores).

A primeira utilização desta tecnologia se deu durante o período da primeira guerra mundial, na França, quando Paul Langevin se aproveitou do efeito piezelétrico para criar um detector ultrassônico de submarinos. Com um mosaico de cristais de quartzo colados entre duas chapas de aço envolvido por um alojamento adequado para submersão, Langevin e seus colaboradores criaram o transdutor de uma frequência de ressonância de cerca de 50 KHz. O êxito alcançado por Langevin serviu de estímulo aos demais cientistas e uma série de aplicações com cristais naturais foram desenvolvidas entre 1920 e 1940 - dispositivos ressonantes quanto não-ressonantes, dentre os quais, alguns familiares nos dias de hoje, como: microfones, acelerômetros, transdutores de ultrassom, caixas de som, filtros de sinal, etc. Essas aplicações ficaram conhecidas pela primeira geração de piezelétricos.

A segunda geração, por sua vez, se deu de 1940 a 1965, com o desenvolvimento durante a Segunda Guerra Mundial de cerâmicas piezelétricas que exibiam constantes dielétricas até 100 vezes mais altas que as apresentadas pelos cristais naturais e suas posteriores aplicações. Nesse

período se verificavam os avanços da ciência de materiais, podendo destacar o desenvolvimento da família de titanato de bário, titanatos zirconatos de chumbo, o entendimento da correspondência entre a estrutura cristalina da perovskita com a atividade eletromecânica, da lógica de dopagem de famílias com impurezas metálicas para alcançar propriedades pretendidas (possibilitando adaptar um material a uma determinada aplicação).

Convém citar que grupos industriais dos Estados Unidos, aproveitaram o momento para apropriação de relevantes patentes e liderança do setor de piezeletricidade. Dentre os dispositivos desenvolvidos com a segunda geração, tem-se:

- Potentes sonares - baseados em transdutores de geometrias esféricas e cilíndricas e tamanhos obtidos à partir de fundição em cerâmica;
- Sistemas de Ignição Piezelétrica - no qual motores monocilíndricos geram tensão elétrica, através da compressão de uma pílula cerâmica;
- Microfones pequenos e sensíveis;
- Relés;
- Sonobouys;

Todavia, o âmbito de pesquisa estadunidense era de grande sigilo, o que contrastou com a postura adotada pelos pesquisadores japoneses. No país oriental empresas e universidades criaram uma associação de desenvolvimento cooperativo, conhecida por “Comitê de Pesquisa de Aplicações do Titanato de Bário” em 1951. Os avanços dessa cooperação puderam ser vistos em 1965 quando novas famílias de piezo cerâmicos foram criadas em concorrência ao PZT da Vernitron e entraram no mercado sem restrições de patente, permitindo o rápido desenvolvimento de tecnologias para o setor de telecomunicações, que apresentou alguns artigos os quais estamos habituados, tomando como exemplo, controles remotos de televisão e alarmes de intrusão.

Todos esses avanços contribuíram para alavancar o interesse em pesquisas nessa esfera e a taxa de publicação de artigos aumentou

consideravelmente também na Rússia, Índia e China da década de 80 até os dias atuais. Com os avanços tecnológicos nos últimos anos, muitos estudos têm sido feitos em várias áreas para que esta tecnologia possa ser aproveitada. Estudos de viabilidade em sua utilização atentando ao armazenamento tem sido de grande relevância.

Sodano et al. (2014), por exemplo, foram os autores de um estudo no qual testou alguns tipos de piezelétricos para avaliar a sua capacidade de gerar energia e carregar baterias de níquel, muito comuns nos dias de hoje em vários equipamentos eletrônicos. Foram preparados experimentos com três tipos diferentes de piezelétricos: MFC- composto de microfibras, PZT – Titanato Zirconato de Chumbo e QP Quick-Pack. O MFC é um composto de piezelétricos retangulares dispostos em forma de matriz, separados por polímeros isoalantes (epóxi); o PZT é um cerâmico com estrutura em cristais de zirconato de chumbo ( $\text{PbZrO}_3$ ) e titanato de chumbo ( $\text{PbTiO}_3$ ) que formam células elementares dessa cerâmica ferroelétrica e exibem estrutura de cristal Perovskite; o QP utiliza duas camadas planas e finas de PZT conectadas permanentemente entre si e ligadas eletricamente em contra fase (COELHO, 2015).

Estes eram submetidos a esforços vibratórios e os resultados da geração de energia dos três foram medidos a fim de se avaliar a viabilidade destes carregarem a bateria. Ao fim pôde-se concluir que o QP e, principalmente, o PZT conseguiram gerar energia suficiente para carregar a bateria, ao passo que o MFC se mostrou uma má escolha neste sentido.

Tomada a significância desse tema, Laumann et al. (2017) decidiram estudar sobre o interesse pela colheita de energia através de piezelétricos. Eles avaliaram o período de 2005 a 2016 e verificaram que resultados de buscas por patentes nessa área, retornavam 550 patentes do European Patent and Trademark Office e 174 do US Patent and Trademark Office. Sendo que a maioria das patentes foram obtidas a partir de 2005.

### 2.2.3. Aplicações

Como já foi visto anteriormente, esta tecnologia pode ser aplicada em diversas áreas e para diversas funções e algumas invenções vêm ganhando destaque nos dias atuais e em diversas áreas do conhecimento. Uma das vertentes que vêm sendo desenvolvidas está relacionada ao monitoramento estrutural, caso das pinturas piezelétricas. Esta ainda é uma tecnologia em desenvolvimento, mas já apresenta inúmeras aplicações como a própria geração de energia limpa e o levantamento de características estruturais da estrutura em que esta é inserida assim como a prevenção de falhas pela detecção devido a tensões elétricas geradas em algum ponto do material. Na Finlândia, um estudo (LAHTINEN, 2007) foi feito com esta pintura aplicada a uma ponte e ligada a eletrodos que medem constantemente as tensões geradas na ponte. Deste modo é possível detectar falhas estruturais que poderiam ocasionar o colapso da estrutura por meio das variações de tensão nos eletrodos e impedir que este tipo de falha ocorra.

Kang et al. (2014) fizeram um estudo onde testavam uma tinta piezelétrica (PNN-PZT) composta por grãos que após um processo de sinterização e adição de alguns outros componentes formam a cobertura final do corpo de alumínio a ser testado. Foram feitos ensaios vibratórios e foi possível capturar uma pequena tensão proveniente da vibração da barra. Em adição a isso foram feitos também testes de impacto que mostraram que quando a barra é submetida ao impacto do martelo, uma variação de tensão elétrica é gerada e pôde ser vista por meio dos equipamentos de medição do experimento. Em uma situação em maior escala poderiam ser medidos possíveis cargas indesejáveis que a estrutura estaria sofrendo, evitando algum tipo de falha, além da geração de energia caso esta estivesse submetida a algum tipo de vibração.

Matsuda et al. (2017) conduziram outro estudo cobrindo um dispositivo piezelétrico flexível (FPED) com uma camada de pintura piezelétrica de alta durabilidade para resistir à correntes e condições adversas no ambiente marinho de forma que este dispositivo pudesse colher a energia proveniente das

vibrações e forças geradas pelas correntes oceânicas. Neste estudo foi desenvolvido um modelo numérico para que se pudesse fazer a análise das interações entre o fluido e a pintura e mensurar a sua eficiência para a colheita energética, seguido por testes para a validação dos seus resultados. O estudo também é útil para se obter uma relação entre a rigidez da pintura e as frequências vibratórias a que ele é submetido assim como esses fatores afetam a sua performance. Após todas as análises pôde-se concluir que o sistema é um meio sólido de geração energética podendo ser usado em ambientes agressivos como os oceanos.

A amplitude das aplicações desse material parece acentuar ao momento em que se percebe sua capacidade de colheita de energia de fontes, a priori, ínfimas, caso de fontes naturais de vibração (como o vento) e sons do ambiente e em tecnologia de fibras têxteis. Como o projeto “Windstalker Power Plant”, constituído por 1203 hastes flexíveis de 55 metros de altura, ancorados ao chão por bases de concreto de 10 a 20 metros de diâmetro que utilizam o vento como recurso para compressão com pastilhas piezelétricas presas ao longo de seu comprimento e o experimento realizado por Boban et al. (2014), no qual com algumas otimizações propostas pela equipe na caracterização do transdutor piezelétrico, a captação de energia a partir da vibração provocada pelos sons do ao redor e sua armazenagem foram bem-sucedidas.

Sucesso igualmente alcançado após 10 anos de pesquisas pela equipe do pesquisador do MIT (Massachusetts Institute of Technology) Yoel Fink. Seus estudos produziram fibras, de modo que pudessem ser implementadas na fabricação de vestimentas que atuam como microfones ultrassensíveis, seja para captura de vozes, som ambiente, ou para monitoramento de funções fisiológicas do usuário. Dentre as possíveis aplicações das fibras de plástico condutor a base de grafite, com teor de flúor alterado, de maneira a criar uma assimetria pelo alinhamento de átomos de flúor de um lado e de hidrogênio do outro, estão a medição de fluxo sanguíneo nos capilares e pressão no cérebro, monitoramento do fluxo de água em oceanos e sistemas de imageamento com elevadas resoluções.

O material também está sendo pesquisado por exércitos e forças de segurança de várias nações. Foi desenvolvido e já é utilizado em alguns locais um dispositivo chamado LRAD (Long Range Acoustic Device). Este dispositivo é responsável por gerar sons em altíssimas intensidades e que o som gerado possa ser “direcionado” de forma que pessoas que estejam sendo diretamente atingidas pelas ondas sonoras ouçam sons mais altos do que aquelas que estejam em locais próximos. O LRAD já foi utilizado em algumas ocasiões e se mostrou muito eficiente como em protestos violentos, controle de postos de checagem na guerra do Iraque e defesa de navios contra piratas, no caso do navio Seabord Spirit que escapou usando a tecnologia para evitar que piratas o abordassem na costa da Somália.

Focando na geração de energia através da transição de pessoas ou veículos, a primeira delas que chamou imensa atenção no ano de 2008 é o Sustainable Dance Club. Mais conhecido como Club Watt, situado em Rotterdam, na Holanda, o estabelecimento ganhou grande destaque da mídia de todo o mundo, conforme mostrado na Figura 1. Isso porque o local utiliza um tapete piezelétrico sobre a pista de dança e áreas comuns, fazendo com que a movimentação das pessoas gere parte da energia necessária para o funcionamento do clube. Este foi o primeiro estabelecimento deste tipo no mundo a utilizar este tipo de tecnologia mostrando para todos o seu grande potencial para a geração energética em larga escala para um futuro não tão distante.



Figura 1 - Piso do estabelecimento Club Watt - Fonte: The Guardian website.

No Rio de Janeiro, uma parceria das empresas Shell e Pavegen possibilitou a instalação de 200 placas piezelétricas em um campo de futebol no Morro da Mineira que produzem cerca de 20 à 30% dos 2kWh que mantém os refletores acesos por até 10h, segundo Pavegen, 2014 (apud ANTUNES et al., 2014).

Elhalwagy et al. (2017) fizeram um estudo com a mesma tecnologia para a geração de energia elétrica pela movimentação de pessoas por meio de placas piezelétricas instaladas no chão de uma estação de metrô no Cairo e em um apartamento. Os resultados mostraram que, dentre as alternativas de tapetes piezelétricos, algumas opções são viáveis para a geração de energia tanto na estação, onde há uma grande circulação de pessoas, quanto no apartamento, onde esse número é menor para, por exemplo, alimentar a iluminação de LED presente no local.

Da mesma forma, foi sugerido o uso da piezeletricidade na pavimentação de ruas, estradas e rodovias como averiguado no estudo de Xu et al. (2017) que mostra que apesar de não gerar energia suficiente para suprir toda a demanda da via onde é instalada, ela pode servir para a redução dos custos energéticos além de ajudar no monitoramento do tráfego e com a vantagem de não ter que buscar parte da energia de longas distâncias, o que gera perdas ao longo de sua transmissão.

Esta inovação também foi implementada no interior de alguns veículos automotivos, como exemplo a Figura 2 – Pneu com transdutores piezelétricos, para testar a sua capacidade de gerar energia à medida que se locomove. Uma destas pesquisas feitas por Behera et al. (2015), no qual foram feitos experimentos para determinar a eficiência do sistema. Os resultados mostraram que apesar de não gerar energia suficiente para que o carro funcionasse de forma autônoma, a energia gerada pela sua movimentação supre de 30 a 40% do total, podendo ser utilizada por vários sistemas eletrônicos do carro e para recarga de celulares e outros aparelhos portáteis.



Figura 2 - Pneu com transdutores piezelétricos. Fonte: Prakash et al. (2014).

Priyanshu Kumar (2013), publicou na “*International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*” (2013), uma aplicação de piezelétricos em vias rodoviárias proposta para ser implementada na Califórnia. As cerâmicas piezelétricas instaladas em um trecho de 1 km de rodovia aproveitariam a vibração gerada pelo movimento dos veículos e em um ano poderiam produzir 44 MW de eletricidade, capaz de suprir a demanda de 30800 casas neste mesmo período.

Ressaltadas tantas aplicabilidades, se assente a importância do fenômeno e esforços para seu contínuo desenvolvimento. Seguindo com a investigação de pesquisas com enfoque na união de materiais piezelétricos e ferrovias - de similares propósitos ao objeto de estudo desse projeto - a combinação desses elementos mostra-se proficiente.

Em 2008, a empresa israelense Innowattech apresentou o projeto de substituição das palmilhas de borracha, localizadas entre patins dos trilhos e dormentes (Figura 3), por suas placas piezelétricas, conhecidas por IPED. Em um protótipo, substituíram 32 palmilhas tradicionais pelas propostas, em parceria com a Universidade Technion e a Companhia Ferroviária Israelense e mostrou que a passagem de 10 a 20 trens por hora pode gerar cerca de 120 kWh de energia elétrica, podendo esta ser usada para alimentar elementos de sinalização da via ou serem aproveitados pela rede de energia. Além disso, as placas propostas permitem determinar o tamanho e peso das rodas e a velocidade do trem.



Figura 3 - Localização dos IPED's. Fonte: Innowattech Railroad Monitoring Presentation.

Em 2013, Song et al. estudaram a viabilidade de aplicar piezeletricidade para converter as vibrações mecânicas de um trem comercial de alta velocidade coreano (300 km/h) em eletricidade útil. Após estudos de vibrações da via, diferentes espessuras de vigas em cantiléver e piezelétricos de diferentes dimensões foram experimentados, levando em conta dados reais de registros aleatórios de frequências e amplitude de vibração do trem. A adição de massas

de ponta no feixe de cantilever diminuiu a faixa de frequência de ressonância natural quando as vibrações eram constantes, mas não quando eram aleatórias. A condição ótima foi experimentalmente encontrada, envolvendo a diminuição da espessura do feixe e o aumento da área do feixe, em vez de apenas aumentar a massa da ponta. O método mais eficaz para melhorar a sensibilidade operacional foi diminuir a frequência de ressonância adicionando massas de ponta, diminuindo a espessura do feixe e aumentando as áreas de feixe e então o maior valor de potência de saída obtido foi de  $19 \mu\text{W}$ .

Nesta mesma linha, Wang et al (2015) modelam a captação de energia proveniente das passagens de trens sobre as vias ferroviárias com a utilização de transdutores piezelétricos do tipo *patch* (fita piezelétrica) e *stack* (onde pastilhas piezelétricas são empilhadas para amplificarem a atuação do transdutor). Ele considera a via como uma viga de Euler-Bernoulli, numa fundação de Winkler e sujeita a múltiplas forças dinâmicas e através de contas analíticas, modelos numéricos e testes experimentais chega à conclusão que os dois tipos de transdutores podem suprir energia de parte da rede de sensores sem fio e também podem servir de sensores no monitoramento de informações do trem, como: velocidade, localização e força de eixo, com a energia de vibração da via.

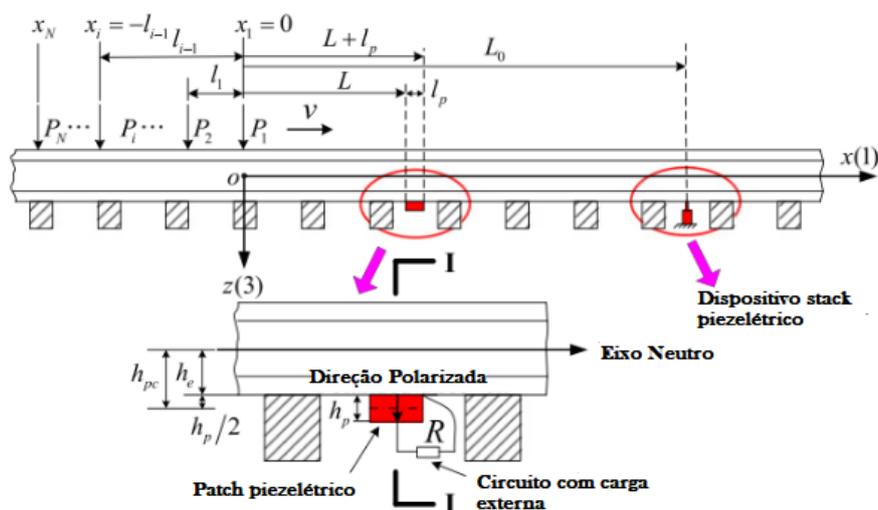


Figura 4 - Configuração do trilho com transdutores piezelétricos – Fonte: Wang et al (2015).

A aplicação de transdutores piezelétricos que utilizam uma relação direta entre impedância mecânica e impedância elétrica no monitoramento de vias, também é estudada por Cremins (2014) em sua tese de mestrado. O transdutor, nesse caso, é um equipamento que visa o monitoramento da integridade estrutural dos trilhos e sua viabilidade é analisada numericamente (com métodos de elementos finitos e programas em MATLAB) além da verificação experimental se circuitos indutivos aumentam a sensibilidade a pequenos danos no trilho, investigações que foram validadas ao fim dos resultados.

Gao et al (2016) realizaram a análise da captação de energia de vibração das vias gerada com a passagem de trens a 250 km/h por um filme piezelétrico PZT, comparando quatro espectros de trilhos. Seus experimentos com o PZT de dimensões 200 mm x 170 mm x 80 mm, com um braço de força acionado por um sistema hidráulico permitindo uma força de 140 kN , para uma simulação realista da força de contato entre rodeiro e trilho apresentaram uma coleta de energia de 4,9 mW e impedância de carga de 100 kOhm, a baixa frequência entre 5 Hz e 7 Hz e deslocamento de trilhos entre 0,2 mm – 0,4 mm.

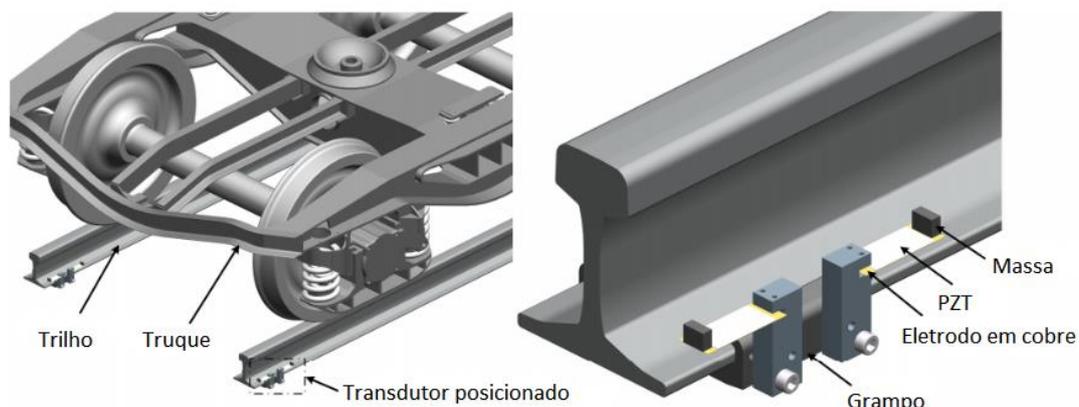


Figura 5 - (Esq.) Esquema truque, trilho e transdutor; (Dir.) Ampliação cantilever piezelétrico – Fonte: Gao et al, 2016.

Em 2016, Yong Cho et al. projetaram um sistema piezelétrico com um pêndulo magnético capaz de aproveitar energia inercial e vibracional para retroalimentação de um sistema de registro de dados de vibração e aceleração do trem, usados para monitoramento. Esse sistema baseia-se em um ímã localizado no final de uma haste de pêndulo e outro localizado na extremidade

livre de um cantilever piezelétrico. Com condições estruturais estabelecidas e alteração de parâmetros, como: direção do pêndulo, polo magnético e resistência de carga, otimizaram a potência de saída e considerando a direção Y do pêndulo, polo magnético atrativo e impedância de 200 k $\Omega$ , o sistema gerou 40,24  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ . Com a densidade de potência achada é possível alimentar o sensor de segurança do trem de passageiros.

## Capítulo 3

### 3. Fundamentos Teóricos

#### 3.1. Piezeletricidade

A piezeletricidade é um fenômeno que se expressa quando uma tensão mecânica é aplicada a um material com características específicas, gerando neste material uma polarização elétrica ou vice-versa. Este efeito pode ser visto, por exemplo nos cristais de quartzo. À medida que a tensão mecânica é aplicada em um dos eixos X e Y (o eixo Z não altera a geometria da molécula, não gerando nenhuma carga), ocorre um desbalanceamento nos átomos, gerando uma carga elétrica, Figura 6. Como a transformação de tensão mecânica em elétrica foi o primeiro a ser descoberto foi dado a ele a denominação de efeito direto.

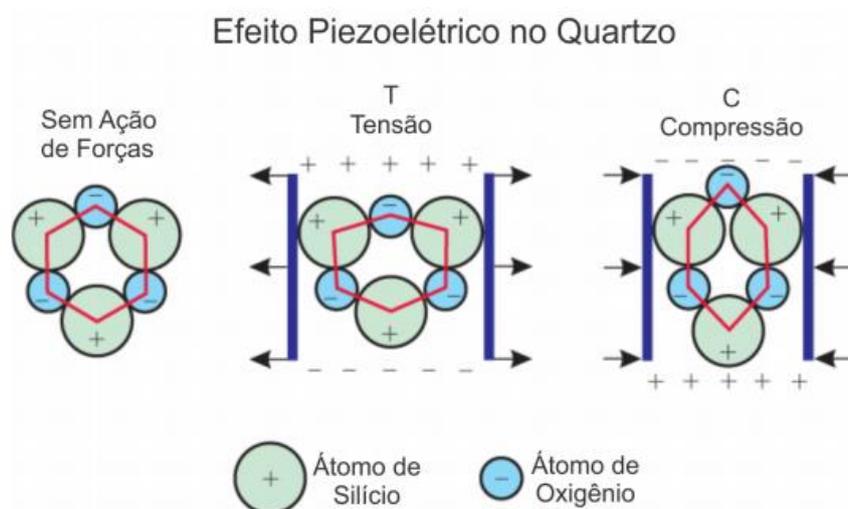


Figura 6 - Polarização em molécula de cristal de quartzo - Fonte: Fedalto et al. (2013).

Algum tempo depois foi descoberto que da mesma forma, um campo elétrico poderia ser induzido sobre o material a fim de gerar nele uma deformação proporcional no limite linear. A este fenômeno foi dado o nome de efeito inverso. Estes materiais, portanto, apresentam acoplamento eletromecânico.

As equações constitutivas destes materiais no regime linear (pequenas deformações) podem ser mostradas conforme a seguir. No efeito direto ao se aplicar uma tensão mecânica no material o mesmo irá se deformar, conforme a Equação (1).

$$S = \frac{1}{Y}T = sT \quad (1)$$

Na Equação (1), a variável ( $Y$ ) representa o módulo de Young do material, em  $N/m^2$ . A variável ( $S$ ) representa a deformação do material e ( $T$ ) a tensão a que o material é submetido. Na segunda parte da igualdade é introduzida a variável  $s$  que representa o inverso do módulo de Young do material. Além disso, quando material piezolétrico é submetido a uma tensão, como descrito anteriormente, ele se polariza criando uma densidade de carga que é denominada deslocamento elétrico ( $C/m^2$ ). Em uma segunda relação, é possível relacionar a tensão aplicada com este deslocamento elétrico, como mostrado na equação 2.

$$D = dT \quad (2)$$

Para esta equação, o termo ( $D$ ) representa o deslocamento elétrico, como já dito ( $T$ ) representa a tensão aplicada e ( $d$ ) representa o coeficiente de deformação piezolétrico do material em  $C/N$ . Estas duas primeiras equações representam o efeito direto, ou seja, representam a transformação da tensão mecânica em deslocamento elétrico assim como as próximas equações que serão mostradas representarão o efeito inverso, ou seja, quando um campo elétrico aplicado sobre o material faz com que este se deforme mecanicamente.

$$D = \varepsilon E \quad (3)$$

Na Equação (3), ( $E$ ) representa o campo elétrico aplicado, em  $V/m$ . A relação entre o campo e o deslocamento elétrico é chamado de permissividade elétrica do material ( $F/m$ ). Finalmente, a última equação relaciona a deformação

gerada no material devido a um campo elétrico aplicado, como mostrado na Equação 4.

$$S = dE \quad (4)$$

Nesta equação as variáveis representam o coeficiente de deformação piezométrico ( $d$ ) que tem sua unidade expressa em m/V, o campo elétrico ( $E$ ) em V/m e a deformação mecânica do material ( $S$ ) expressa em m/m. Com estas equações em mãos, podemos organizá-las na forma matricial apresentada na equação 5, de modo a fornecer as equações constitutivas para um piezométrico linear que podem ser desenvolvidas para determinação de casos com até três dimensões e em função do parâmetro desejado. Neste caso, a parte superior da matriz representa o efeito direto, ao passo que, a parte inferior o efeito inverso.

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s & d \\ d & \varepsilon \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Pelo fato de os materiais piezométricos serem transversalmente isotrópicos, ou seja, as suas propriedades físicas na direção relativa à transversal são as mesmas, os efeitos são dependentes da direção da aplicação da força ou campo elétrico. Durante a fabricação do material é normalmente convencionado para que a direção de polarização positiva seja a mesma da direção do eixo z ou eixo 3, como representado na figura 7.

De todos os modos de operação de um piezométrico, os modos 33 e 31 são amplamente utilizados em relação aos demais. No caso do modo 33, a força é aplicada na direção 3 e a tensão é gerada nesta mesma direção. Já no modo 31, a força é aplicada na direção 1 e a tensão é gerada na direção 3.

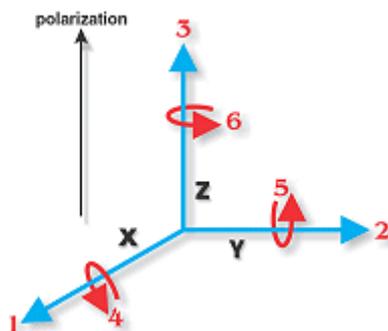


Figura 7 – Direções de forças que afetam o elemento piezoeletrico - Fonte: Americanpiezo website

## 3.2. Características dos Componentes da Via

### 3.2.1. Vias Permanentes

O conjunto de camadas e elementos que possibilitam a direção e passagem do trem suportando seus esforços é denominado via permanente. A via permanente pode ser subdividida em sua infraestrutura e superestrutura.

A infraestrutura baseia-se nas obras de “correção” do solo inicial, de abaixo do nível do subleito e por vezes o lastro. Essa classificação de componentes pode variar de país para país de modo a oferecer sustento a superestrutura. Abertura de caminho e terraplanagem são obras principais dessa subdivisão. No Brasil, assim como na França, os componentes da infraestrutura são: todas as obras localizadas abaixo da camada de lastro.

Considerando a classificação brasileira, a superestrutura é composta por: trilhos, dormentes, fixações, palmilhas, lastro, por vezes, sublastro e aparelhos de mudança de via (AMV's). A grade da via é a denominação dada à parte dessa composição, que seriam os trilhos, dormentes e fixações. Sujeita a desgastes pelo contato com os rodéiros e intempéries é alvo constante de manutenção e considerada crítica devido sua grande influência na segurança e continuidade da operação.

Além das vias em lastro, amplamente utilizadas, vias em laje que eliminam a utilização do lastro com a substituição deste por uma laje de concreto ou concreto-asfáltico, que podem ser pré-fabricadas ou moldadas *in loco*, também entram em vigência. Este modelo mais recente de via vem sendo desenvolvido desde os anos de 1970 no Japão e largamente difundido no mundo, demonstrando alto desempenho em vias de alta velocidade e outros parâmetros vantajosos (OLINGER, 2014).

### **3.2.2. Componentes Principais da Via Permanente**

#### **3.2.2.1. Trilhos de Rolamento**

Os trilhos de rolamentos são os trilhos responsáveis por direcionar e sustentar o Material Rodante. De acordo com Selig e Waters (1994), os trilhos devem ter rigidez suficiente de maneira a suportar a carga concentrada dos rodeiros sem transferência excessiva aos dormentes, minimizando ao máximo a deflexão entre os componentes.

Os perfis dos trilhos sofreram mudanças no curso da história das ferrovias, convergindo para os trilhos tipo Vignole - idealizado pelo engenheiro inglês de mesmo nome em 1836 - amplamente empregados na atualidade (NABAIS, org., 2014). Estes elementos possuem seção transversal composta por patim, alma e boleto. O patim é a base do trilho, sendo mais largo que todos os outros elementos, pois deve prover estabilidade e ligação da peça com os dormentes. O boleto é o elemento onde a roda se apoia, possuindo aproximadamente 40% da área da seção transversal. A alma é a parte mais estreita e vertical da seção transversal, possuindo a função de ligar o patim ao boleto (SANTOS, 2011). A normatização vigente classifica os trilhos de acordo com a sua massa por metro (kg/m), sendo os mais usuais: TR-37, TR-45, TR-50, TR-57 e TR-68. As especificações dos trilhos padrão Vignole estão consolidadas na NBR 7590/2012, que substituiu a NBR 12.320/1979.

### **3.2.2.2. Dormentes**

Dormentes são elementos estruturais que se localizam nas vias permanentes, de maneira transversal à disposição dos trilhos. Conforme a descrição da DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes) – Especificação técnica de materiais (ETM – 003: Dormentes), dentre suas principais funções estão:

- Suporte para os trilhos, fixando e assegurando a sua posição e gabarito da via, além de manter a estabilidade da via frente às variações de temperatura, esforços estáticos (da própria estrutura) e dinâmicos (ocasionados por materiais rodantes);
- Receber os esforços transmitidos pelos trilhos e repassá-las tão uniformemente quanto possível às camadas inferiores (lastro ou laje);
- Manter a geometria da via permanente;
- Deve resistir aos esforços mecânicos e às intempéries por um longo tempo;

Esses elementos podem ser constituídos de madeira, concreto armado, concreto bi-bloco e aço.

### **3.2.2.3. Palmilhas**

É uma placa amortecedora de borracha para fixação, colocada entre os patins dos trilhos e dormentes ou entre patins dos trilhos placas de apoio, podendo ser classificada de acordo com sua superfície (lisa ou canelada) e isolamento térmico (isolante ou não isolante). E tem por finalidade, evitar desgastes de contato entre trilhos e dormentes, reduzir vibrações prejudiciais à infraestrutura da via e seus componentes, também distribuindo de maneira uniforme as cargas oriundas dos trilhos (LICHTBERGER, 2005).

### 3.2.3.Bitolas

A distância entre as faces internas dos trilhos é conhecida por bitola e sua medida apresentada por Stephenson foi estabelecida como padrão em 1907, na Conferência de Berna. Essa medida é tomada a partir de um ponto, que pelo padrão norte-americano, o mesmo adotado pelas ferrovias brasileiras é de 16 mm abaixo da superfície dos trilhos.

Além da bitola padrão de 1,435 m (que continua sendo a mais presente nas ferrovias e suas derivações), tem-se a larga de 1,600 m, a estreita ou métrica de 1,000 m e outras medidas de bitola adotadas em diferentes partes do mundo. Exemplos de Bitolas (NETO, 2018) são mostradas na tabela 1:

Tabela 1 - Diferentes bitolas

ITÁLIA	1,445 m
FRANÇA	1,440 m
ESPAÑA	1,674 m
PORTUGAL	1,665 m
ARGENTINA E CHILE	1,676 m
RÚSSIA	1,523 m

Fonte: Manual Didático de Ferrovias – NETO, 2018.

A Figura 8 ilustra a adoção de bitolas no cenário mundial com suas medidas apresentadas no Sistema Internacional e no americano.

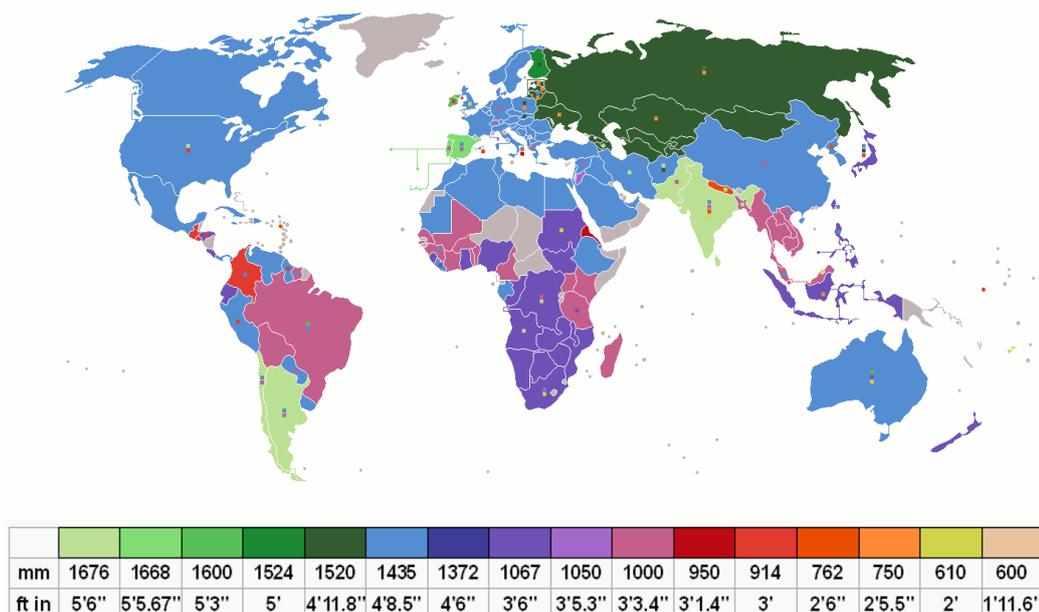


Figura 8 – Bitolas pelo mundo - Fonte: CIA Factbook railway e Seabhcán's railmap por Wikipedia

A adoção de bitolas diferentes do padrão foi, por muitas vezes, uma estratégia de segurança. Essa foi uma tática de muitos países europeus, como a bitola Ibérica adotada por Portugal e Espanha para tentar impedir a invasão das tropas francesas na época de Napoleão Bonaparte. Porém, essas diferenças têm sido prejudiciais no intercâmbio comercial.

No Brasil, apesar do Plano Nacional de Viação aprovado em 1964 no governo de Castello Branco instituir a bitola larga como ideal no processo de unificação de bitolas, pode-se encontrar além das bitolas já apresentadas, as mistas - que combinam numa mesma linha as bitolas larga e métrica. Essa tentativa de unificação vem sendo implementada em diversos outros países para contornar os prejuízos ao comércio e demais relações com seus países vizinhos.

Atentando às redes metroviárias, observa-se a mesma pluralidade de bitolas. Na Europa, por exemplo, encontra-se em Madri a bitola de 1,445 m, na linha 1 em Barcelona a bitola 1,674 m, nos metrô de Lisboa, Paris e Londres a padrão, que mantém sua predominância nesse sistema europeu. No Brasil, o mesmo fenômeno ocorre. Nas primeiras linhas dos metrô do Rio de Janeiro e de São Paulo a bitola larga foi adotada, seguidos pelas demais capitais

brasileiras com o sistema metroviário. Nas linhas mais recentes do metrô de São Paulo e metrô de Salvador a opção pela bitola padrão foi definida.

### **3.2.4. Distribuição de Forças na Via Permanente**

A correta modelagem da via permanente para cálculos dos diferentes tipos de movimento da via e os esforços decorrentes destas movimentações são fundamentais para uma estimativa mais aproximada à situação real dos esforços cíclicos associados a passagem dos trens sobre trilhos a que a estrutura é submetida, que transmitem então esses esforços aos dormentes e às camadas inferiores aos dormentes. Em geral os dimensionamentos das vias ferro e metroviárias são baseadas em simplificações teóricas e formulações empíricas.

Segundo Prause e Meacham (1974) as práticas atuais para a modelagem das vias ferroviárias é baseada na satisfação de diversos critérios para a resistência de componentes individuais. Alguns dos importantes critérios são:

- Tensão admissível de flexão do trilho;
- Tensão admissível de flexão do dormente;
- Pressão admissível de lastro;
- Pressão admissível de subleito;

Em condições de análise, a priori, é necessário determinar a força exercida pelo material rodante, ou seja, pelo trem, para posteriormente, utilizá-la no modelo de simulação da via permanente.

Como mostrado anteriormente, alguns modelos foram descritos e um destes modelos será estudado para a avaliação do caso específico do metrô do Rio de Janeiro nos próximos capítulos.

## Capítulo 4

### 4. Sistema Metroviário da Cidade do Rio de Janeiro

Objetivando uma análise que possa beneficiar a cidade do Rio de Janeiro e outras com logística metroviária semelhantes, convém a parceria com a empresa concessionária, MetrôRio, responsável pela operação da rede metroviária da cidade do Rio de Janeiro.

A disponibilização de dados pela empresa, permite uma avaliação mais fiável em relação a logística de intervalo entre trens, lotação, peso, medidas e consumo energético de equipamentos, incluindo energia de tração dos trens, que tem peso representativo nos custos da empresa.

#### 4.1. Avaliação de Variáveis do Sistema MetrôRio

Para a análise proposta é necessária a avaliação de diversas variáveis do sistema. A compreensão detalhada dos componentes que compõem as vias para determinação da distribuição de tensões mecânicas e deformações; a limitação de um trecho ideal para a instalação do tapete piezelétrico; o fluxo de trens e passageiros por esse trecho, já que os mesmos influem na força exercida pelos rodeiros, que por conseguinte devem gerar uma deformação esperada sobre os tapetes com a finalidade de gerar energia elétrica o suficiente para ser reaproveitada em algum sistema de equipamentos auxiliares.

#### 4.2. Trecho Analisado: Logística de Intervalos e Via Permanente

A escolha do trecho leva em conta o menor intervalo entre trens, o que resulta num maior fluxo de passagens de rodeiros. No sistema metroviário da cidade do Rio de Janeiro, esse trecho se localiza entre as estações Central e Botafogo (trecho de compartilhamento entre as linhas 1 e 2). Esse tipo de trecho,

conhecido por sua operação em Y não é algo comum entre outros sistemas metroviários, porém algo semelhante também ocorre no sistema de metrô de Bruxelas, na Bélgica. Logo, por essa peculiaridade ocorre a diminuição do tempo de intervalo entre um trem e outro no sistema operado pela MetrôRio.

A tabela 2, permite identificar as estações que compõem o trecho avaliado, seus anos de inauguração e as distâncias interestações, que implicam no trecho total de 6724 m a ser explorado no projeto. Na tabela A.1 encontram-se os significados das siglas das estações utilizadas pela empresa MetrôRio.

Tabela 2- Distância interestações

<b>TRECHO COMPARTILHADO (Linhas 1 e 2)</b>			
<b>Inauguração</b>	<b>Estações</b>		<b>Distância [m]</b>
1979	CTR	PVG	550
1979	PVG	URG	436
1980	URG	CRC	660
1981	CRC	CNL	446
1979	CNL	GLR	1055
1979	GLR	CTT	654
1981	CTT	LMC	620
1981	LMC	FLA	681
1981	FLA	BTF	1622
<b>Distância Total</b>			<b>6724</b>

Fonte: MetrôRio

No sistema geral, o intervalo entre trens nos horários de pico (7h00 às 10h00 e 16h00 às 19h00) é de 4 minutos e 30 segundos. Já nos horários de menor solicitação do serviço, conhecidos como vales, os intervalos variam, sendo a média de 7 minutos. Sendo que no trecho compartilhado, nos horários de pico os intervalos dos trens são de 2 minutos e 15 segundos. Tomando os tempos anteriormente mencionados e sabendo que a composição de trem pela empresa é de seis carros, cada carro possuindo dois truques onde são instalados os rodeiros, cada qual com duas rodas, uma primeira estimativa será realizada para quantificar as passagens dos rodeiros dos trens em pontos específicos da

via durante um determinado tempo e por conseguinte estabelecer uma relação entre tempo e geração de energia.

Na averiguação da via, na rede metroviária do Rio de Janeiro se encontram via em lastro e via em laje. O trecho escolhido pela logística de intervalo entre trens é composto pela via em laje, contudo, a modelagem da via para cálculos de esforços se baseará em estudos prévios já validados que, no entanto, portam credibilidade, aproximando os resultados dos esforços reais. O modelo proposto será explanado no próximo capítulo.

## Capítulo 5

### 5. Modelo Analítico

O entendimento do comportamento da via permanente quando submetido às forças corriqueiras, sobretudo às forças dinâmicas da passagem dos trens é indispensável para o desenvolvimento do projeto. Modelos já validados, para análise de esforços nas vias e geração de energia através de um transdutor piezelétrico servirão de base para os cálculos analíticos para mostrar a viabilidade da implementação destes materiais para gerar energia. Na Tabela 3 são apresentados alguns dados relativos às características dos carros existentes na frota no metrô da cidade do Rio de Janeiro.

#### 5.1. Dados Iniciais do Trem

Tabela 3- Dados dos carros que compõem o trem da frota analisada

	Carro A	Carro B	Carro C	unidade
Distância entre centro de rodas de um mesmo rodeiro	2500	2500	2500	Mm
Peso – Tara	40500	40500	40900	Kgf
Lotação - 8 passageiros por metro quadrado (pax/m <sup>2</sup> )	350	350	385	N/A
Velocidade Máx. projeto	100			km/h
Velocidade Máx. operação	80			
Velocidade operação	30			
Diâmetro nominal rodas	850	850	850	Mm
Carga máxima por eixo	1700			Kgf
Material	aço inox			N/A
Iluminação salão	LED			N/A
Distância entre truques (dist. entre centro rodeiros).	15600			Mm
Comprimento	22080	22140	22140	Mm

Fonte: MetroRio.

## 5.2. Considerações Gerais

Para cálculos que consideram lotações média e máxima de um carro de metrô serão necessários englobar o peso médio da população mundial que possui uma massa correspondente a 80 kg e gravidade igual a 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Foram realizadas as devidas conversões de unidades para realização dos cálculos, conversões essas encontradas nos desenvolvimentos dos cálculos correspondentes. Para a análise proposta pelo projeto, será avaliada a geração de energia elétrica pela passagem dos trens sobre pontos específicos de localização dos transdutores piezelétricos em duas situações distintas:

- Situação 1 - Carro A ou B (mais leves) e sem lotação, que supostamente serão responsáveis por uma menor força atuante sobre a via permanente e proporcionarão menores deformações no transdutor.
- Situação 2 - Carro C (mais pesado) em lotação máxima de 8 passageiros por metro quadrado, ou seja, um total de 385 passageiros, responsável por uma maior força atuante sobre a via permanente e proporcionará maiores deformações no transdutor.

Além da prévia descrição, as avaliações serão realizadas levando em conta situação de carregamento estático e situação de carregamento dinâmico. Para cálculos os quais será necessária a utilização da velocidade como parâmetro, serão consideradas a velocidade de operação do trecho compartilhado (30 km/h) e velocidade máxima de operação (80 km/h), que pode ser alcançada por diversas vezes durante a operação.

### 5.3. Cálculos Analíticos

Visando comparar a eficiência de transdutores piezelétricos localizados em pontos distintos da via permanente – um localizado entre o patim do trilho e o dormente e outro no meio do trecho de viga entre dois dormentes – cálculos para descobrir a deformação do transdutor vão ser realizados.

Serão apresentados cálculos analíticos para a análise de esforços de compressão e deflexão aos quais serão submetidos os transdutores piezelétricos. Primeiro, cálculos para avaliação do transdutor piezelétrico instalado entre patim do trilho e dormente e posteriormente, cálculos para avaliação do transdutor instalado no ponto central do trecho de trilho localizado entre dormentes, ponto de deflexão máxima do trilho. Adiante, será verificada a geração de energia elétrica por um transdutor piezelétrico. O PZT-5H, também utilizado por Yang et al. (2017) e por Astudillo-Baza et al. (2016). Através dos cálculos analíticos da deformação sofrida pelo transdutor piezelétrico e a estimativa de energia apresentada, a viabilidade técnica desse estudo poderá ser evidenciada.

#### 5.3.1. Análise de Tensão e Deformação

A via, como descrito anteriormente (Tópico 3.2.1), é composta dos seguintes elementos: trilho, placa de apoio, dormente, lastro e subleito. Cada um destes elementos, quando sujeito a uma força, sofre uma deformação e “amortece” a força aplicada às camadas inferiores, como mostrado na figura abaixo, sendo ( $P$ ) a carga imposta por cada eixo, ( $Q$ ) a carga imposta por cada roda e ( $A$ ) a área dos componentes descritos, como mostrada na figura 9.

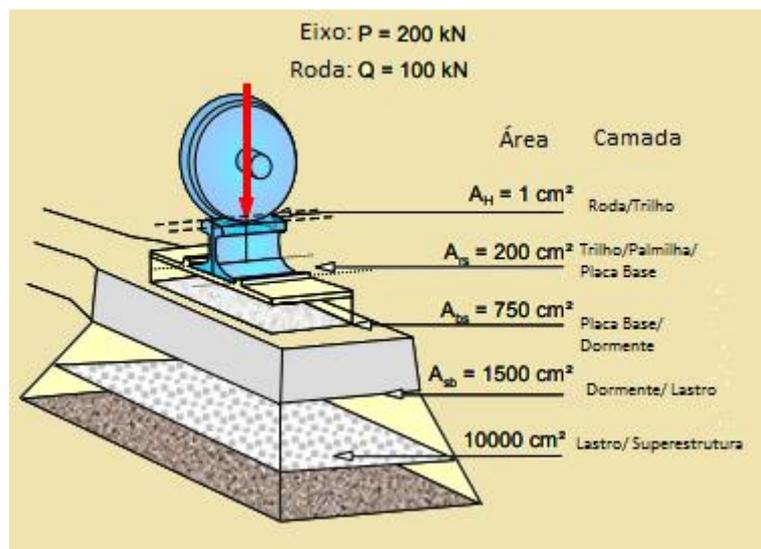


Figura 9 - Camadas da Via Permanente - Fonte: ESVELD, 2001.

Os fatores de incremento dinâmicos (*FID*) da via podem ser calculados de duas formas. A primeira, proposta por Eisenmann em 1970, é composta de duas equações, dependendo da velocidade de operação dos carros, usada para vias com velocidades máximas de 60 km/h e para os casos onde a velocidade está entre 60 km/h e 200 km/h. Estes cálculos utilizam coeficientes tabelados que exprimem as condições da via e a posição em que se deseja analisar os esforços, entretanto estas não apresentam resultados exatos sendo difícil mensurar o quanto a movimentação sobre a via impacta nos resultados, por isto, normalmente, é utilizado um fator de 2,4 para cálculos deste tipo (ESVELD, 2001).

### 5.3.1.1. Transdutor entre Patim do Trilho e Dormente - Carregamento Estático



Figura 10 - Configuração forças sobre o trilho para análise de compressão - Fonte: VigasOnline website com edição própria.

Para a situação 1 estática, tem-se uma força exercida por uma única roda sobre a via de 49,66 kN na primeira camada e segundo (ESVELD, 2001) a cada camada inferior a tensão se reduz à metade. Com o valor de tensão na interface trilho e transdutor piezométrico (1,24 MPa), módulo de Young do PZT-5H (64 GPa) e sua espessura inicial ( $h_i = 0,2 \text{ mm}$ ) é possível obter a variação de espessura ( $\delta = 3,88 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ) sofrida pelo transdutor com a passagem do Carro A ou B sem passageiros.

Para a situação 2, estática, tem-se uma força exercida por uma única roda sobre a via de 87,89 kN na primeira camada e segundo (ESVELD, 2001) a cada camada inferior a tensão se reduz à metade. Com o valor de tensão na interface trilho e transdutor piezométrico (2,20 MPa), módulo de Young do PZT-5H (64 GPa) e sua espessura inicial ( $h_i = 0,2 \text{ mm}$ ) é possível obter a variação de espessura ( $\delta = 6,87 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ) sofrida pelo transdutor com a passagem do Carro C em lotação máxima.

### 5.3.1.2. Transdutor entre Patim do Trilho e Dormente - Carregamento Dinâmico

Para a situação 1 é utilizado o coeficiente dinâmico para se simular a situação de maior carregamento do sistema. A partir desta premissa tem-se uma força exercida por uma única roda sobre a via de 119,20 kN na primeira camada e segundo (ESVELD, 2001) a cada camada inferior a tensão se reduz à metade. Com o valor de tensão na interface trilho e transdutor piezelétrico (2,98 MPa), módulo de Young do PZT-5H (64 GPa) e sua espessura inicial ( $h_i = 0,2 \text{ mm}$ ) é possível obter a variação de espessura ( $\delta = 9,31 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$ ) sofrida pelo transdutor com a passagem do Carro A ou B sem passageiros.

Para a situação 2, assim como no caso anterior assumimos o coeficiente dinâmico para simular a força exercida por uma única roda sobre a via. Neste caso foi obtida uma força de valor 210,94 kN na primeira camada e segundo (ESVELD, 2001) a cada camada inferior a tensão se reduz à metade, aproximadamente. Com o valor de tensão na interface trilho e transdutor piezelétrico (5,27 MPa), módulo de Young do PZT-5H (64 GPa) e sua espessura inicial ( $h_i = 0,2 \text{ mm}$ ) é possível obter a variação de espessura ( $\delta = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ ) sofrida pelo transdutor com a passagem do Carro C em lotação máxima.

### **5.3.1.3. Transdutor Piezelétrico no Ponto Médio do Trecho de Trilho Entre Dois Dormentes**

Para a análise de esforços sofridos pelo transdutor piezelétrico nesse ponto - ponto de deflexão máxima do trilho – apresentam-se em seguida os cálculos de deflexão em linha elástica de uma viga biapoiada, utilizada como modelo simplificado de um trecho do trilho. Os cálculos foram realizados com base na situação de maior lotação do carro C para verificar a deflexão máxima que será submetido o trilho e fazer a comparação a partir de uma situação a princípio mais eficiente para essa localização do transdutor. A configuração das forças atuantes dessa análise pode ser exemplificada pela Figura 11, onde temos a força exercida por uma roda do trem sobre o trecho de trilho entre dois dormentes e sua distribuição igualada nos apoios.

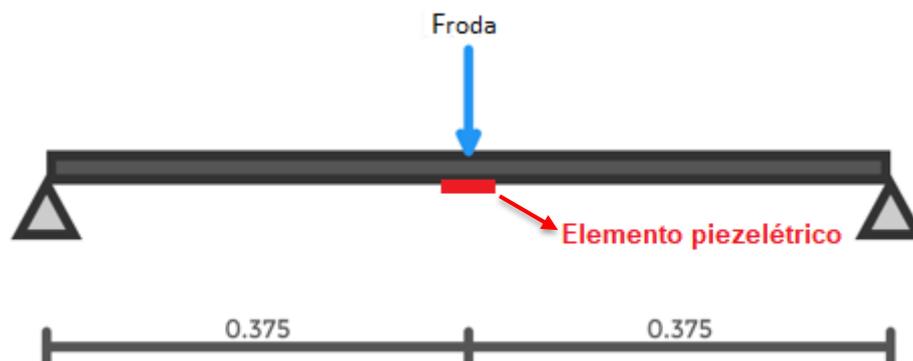


Figura 11 - Configuração forças sobre o trilho no momento analisado - Fonte: VigasOnline website com edição própria.

Por conceito, a linha elástica passa pelo centroide de cada área da seção transversal da viga e se o material é homogêneo, este comporta-se de maneira linear-elástica e então é possível aplicar a Lei de Hooke e fórmula de flexão, que combinadas e representada a curvatura em termos de  $v$  e  $x$ , resultarão em uma equação infinitesimal não-linear de 2º ordem. Admitindo apenas deformações por flexão, rigidez à flexão ( $EI$ ) e a inclinação da linha elástica ao quadrado  $\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2$  um valor muito pequeno, logo:

$$\frac{EI \partial^2 v}{\partial x^2} = M(x) \quad (6)$$

#### 5.3.1.4. Aplicação do Conceito para achar a Deflexão Máxima com os Dados do MetrôRio:

Partindo da equação de linha elástica (equação 7), com devidas manipulações algébricas e aplicação de condições de contorno para uma viga bi apoiada é conhecida a equação de deflexão máxima, apresentada abaixo:

$$Y_{m\acute{a}x}, \text{ para } x = \frac{L}{2}:$$

$$Y_{m\acute{a}x} = -\frac{PL^3}{48EI} \quad (7)$$

Tabela 4 - Parâmetros do Carro C

Parâmetros	Total (kgf)	Total (kN)	Por roda (kN)
<b>Carro C</b>	40900,00	401,09	50,15
Lotação	Total (kg)	Total (kN)	Por roda (kN)
<b>385 pessoas</b>	30800,00	301,84	37,73
<b>Total</b>			87,89

Fonte: MetrôRio, 2018.

Multiplicando a força total exercida por uma única roda pelo fator de carregamento dinâmico de 2,4, tem-se: 210,94 kN, (considerando o peso médio por pessoa de 80 kg, gravidade de 9,81 m/s<sup>2</sup> e coeficiente dinâmico de 2,4). Então, aplicando na equação 7, com  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $I = 0,000027305 \text{ m}^4$  (Anexo III) e  $L = 0,75 \text{ m}$ , como propriedades do trilho, acha-se a deflexão máxima:

$$Y_{\text{máx}} = -3,23 \cdot 10^{-1} \text{ mm}$$

Contudo a deflexão a qual se está interessado é a do elemento piezolétrico, logo, supondo um PZT-5H em placa de dimensões 200 mm x 100 mm e espessura 0,2 mm, sabendo que o trecho de trilho biapoiados sobre dormentes é de 750 mm e devido ao raio muito pequeno da deflexão do trilho, podemos aproximar este arco de um segmento reto e aplicar semelhança de triângulos para encontrar a deflexão do piezolétrico com base na deflexão do trilho. Através desta, acha-se o valor de deflexão do elemento piezolétrico  $\delta = 8,61 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$ .

### 5.3.2. Equação de Tensão Elétrica para Transdutor Piezolétrico entre Patim do Trilho e Dormente

De acordo com o artigo "Getting Electric Power For Piezoelectricity" de Austudillo-Baza et al (2016), que analisa a energia elétrica gerada por uma placa com fileiras de discos piezolétricos quando submetida a carga de uma pessoa de cerca de 80 kg gerando uma tensão elétrica.

A equação da tensão elétrica pode ser obtida através dos conceitos de piezeletricidade. Considerando um circuito aberto, no qual os contatos elétricos das extremidades do transdutor em placa não estão conectados, pode-se inferir que o deslocamento dielétrico (D) será nulo e conseqüentemente a tensão mecânica (T) será proporcional ao campo elétrico gerado (E), sendo esta relação mostrada na equação 8:

$$g = -\frac{T}{E} \quad (8)$$

Partindo dos conceitos de elétrica, o campo elétrico (E) de um sistema como o descrito anteriormente se define por:

$$E = \frac{k q}{h^2} \quad (9)$$

Onde:

*k*: Constante dielétrica entre as extremidades da placa.

*q*: Carga acumulada na placa.

*h*: Distância entre as extremidades (espessura).

Da mesma forma a tensão elétrica (V) equivale a:

$$V = \frac{k q}{h} \quad (10)$$

Relacionando as equações 9 e 10, tem-se:

$$V = E h \quad (11)$$

Por conceitos de mecânica, é sabido que a tensão de compressão (T) é:

$$T = -\frac{F}{A} \quad (12)$$

Por fim, através da relação entre as equações anteriormente citadas e manipulações algébricas, chega-se à equação 13.

$$V = -\left(g_{33} h \left(\frac{F}{A}\right)\right) \quad (13)$$

onde:

$g_{33}$ : Constante piezométrica de tensão elétrica (Vm/N).

$h$ : Espessura inicial do piezométrico.

$F$ : Força aplicada sobre o piezométrico.

$A$ : Área do piezométrico.

Para a análise da carga gerada por compressão, o maior valor de tensão elétrica foi obtido na situação 2, considerando o fator de carregamento dinâmico e supondo a utilização de um transdutor PZT-5H de dimensões (200 mm x 100 mm) e com 0,2 mm de espessura, módulo de Young de 64 GPa e constante piezométrica de tensão elétrica ( $g_{33}$ ) igual a  $19,7 \times 10^{-3} \frac{Vm}{N}$ , de modo a cobrir 100% da superfície de contato entre patim do trilho e dormente de 200 cm<sup>2</sup>. De mesmo modo, para a análise de deflexão que também assume o carro C em lotação máxima e com o fator de carregamento dinâmico, considerando um PZT de características semelhantes ao caso de compressão, tem-se:

$$V = 20,78 V$$

Sendo a equação 13 uma fórmula simplificada, ou seja, que considera apenas força aplicada sobre o sistema, dimensão e a constante de tensão elétrica do piezométrico, os valores de tensão elétricas para os dois casos serão os mesmos.

Com base na literatura consultada e considerando o valor de 20,78 volts encontrado como a energia gerada pelo piezométrico, podemos considerar que esta tensão apresenta um valor plausível, se compararmos, por exemplo, com os resultados obtidos por Astudillo-Baza et al (2016) que, após as análises, conseguiu obter experimentalmente um valor de 20,58 volts de diferença de potencial entre os terminais testados, valor este da mesma ordem de grandeza da voltagem encontrada por meio dos cálculos feitos acima.

## Capítulo 6

### 6. Modelo Numérico

Com o intuito de estimar a energia que pode ser gerada do sistema dinâmico, é indispensável familiarizar-se com o conceito de vibração em vias ferroviárias para modelagem do estudo proposto. Neste capítulo, serão expostas as razões pelas quais as vibrações no sistema metroviário são indesejáveis, os mecanismos mais relevantes que as geram e como este fenômeno pode ser aproveitado para a captura de energia, reaproveitando um efeito ordinário do sistema.

#### 6.1. Vibrações em Vias Metroviárias

As estruturas físicas que compõem o sistema metroviário estão sujeitas a diversas intempéries e mecanismos que levam a vibração da via, materiais rodantes que por ela passam e outras estruturas próximas ao seu percurso. As forças dinâmicas de interação entre veículo e via são notáveis agentes na geração dessas vibrações. Como descrito por Gao et al. (2016), os principais mecanismos de excitação no contato roda-trilho são: as cargas dinâmicas; rugosidades advindas do contato roda-trilho que vão gerando irregularidades nos trilhos e rodas; excitação paramétrica com a variação de rigidez experimentada pelas rodas dependendo da posição onde se encontram ao longo da via. A importância de se entender essas interações e criar procedimentos de manutenção eficazes para agir na prevenção de defeitos causados pelos mecanismos anteriormente citados são de necessidade a fim de evitar desconforto aos passageiros e riscos de descarrilamento. Nesse contexto, alguns países se precederam ao entendimento das irregularidades dos trilhos causadas por essa interação e especificaram padrões baseados em densidade espectral de potência.

“Para avaliar as condições de construção e garantir a apropriada geometria da via, departamentos relevantes em diferentes países, como por exemplo, Federal Railroad Administration of the USA e Deutsch Bahn da Alemanha, conduziram diversos teste em campo para regular o nível de irregularidades nos trilhos. Um consenso mundial para usar a densidade espectral de potência (PSD – Power Spectral Density) como um método de avaliação estatístico para regulação de nível de irregularidades da via (geometria da via) foi alcançado” (GAO et al., 2016).

O PSD (Power Spectral Density), segundo Berawi (2013), teria a função de avaliar essa interação do veículo e da via, porém viu-se a possibilidade de através dele classificar a qualidade. Outro parâmetro muito usado na avaliação da qualidade das vias é o módulo de via ( $U$ ), parâmetro este que surgiu com as incrementações a teoria de Winkler – abordada no tópico 2.1 deste trabalho. O módulo de via representa a influência dos diversos componentes da via e segundo Bastos (2005), ele está relacionado a diversos componentes, como: tipo de dormente, seu espaçamento, profundidade do lastro, resistência da plataforma e tipo de socaria que mantém a via. Quanto maior o espaçamento entre dormentes, menor será a rigidez da via e por consequência, menor a rigidez a deformação, logo, com uma maior deflexão vertical, menor o módulo de via. Alias (1977), por exemplo, associa os seguintes valores a qualidade da via:

Via ruim:  $U = 960 \text{ N/cm}^2$

Via média:  $U = 2880 \text{ N/cm}^2$

Via boa:  $U = 5760 \text{ N/cm}^2$

Partindo da teoria de Winkler (1867) e considerando uma via de média qualidade de acordo com Alias (1977), uma modelagem para o comportamento da via é estudada a fim de obter as deflexões do trilho com um veículo em movimento.

## 6.2. Modelagem Dinâmica da Via e Dispositivo Gerador de Energia

Para o entendimento da via permanente e seu comportamento vibratório, uma abordagem frequentemente usada é a de Winkler, também conhecido por modelo de viga em fundação elástica. Nesse modelo, o trilho é analisado como uma viga Euler Bernoulli infinita apoiada sobre uma fundação elástica e assume-se que a deflexão do trilho é proporcionalmente linear em relação a carga aplicada sobre ele. Esse modelo incorporou ao longo dos anos o módulo de via ( $u$ ), um parâmetro que representa a influência dos diversos componentes da via.

No manual AREMA (1991), pode-se encontrar a equação 14 que relaciona esse parâmetro ao modelo proposto por Winkler:

$$EI \left( \frac{d^4 w}{dx^4} \right) + Uw(x) = q(x) \quad (14)$$

na qual:

$w(x)$ : deflexão vertical do trilho em função da distância  $x$ .

$EI$ : Rigidez à flexão do trilho.

$U$ : módulo de via.

$q(x)$ : carga vertical das rodas.

A deflexão do trilho pode ser calculada pela equação 15 (SADEGHI, 2010):

$$w(x) = \frac{P\beta}{2U} e^{-\beta x} (\cos\beta x + \sen\beta x) \quad (15)$$

Sendo,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}} \quad (16)$$

Skoglund (2002) faz uma superposição da ação de cada roda sobre a via para representar a resposta final do trilho submetido a diversas rodas. É possível então simular diversas situações e obter o deslocamento vertical sofrido pelo trilho em cada uma delas, como nos estudos de Gao et al. (2016) e Nelson et al. (2008). Para simplificação do modelo de geração de energia proposto foram desconsiderados efeitos inercias do trilho e do veículo e para achar o deslocamento vertical sofrido por um gerador conforme mostrado na Figura 12, a aproximação deste ao comportamento de um sistema massa-mola-amortecedor foi assumido.

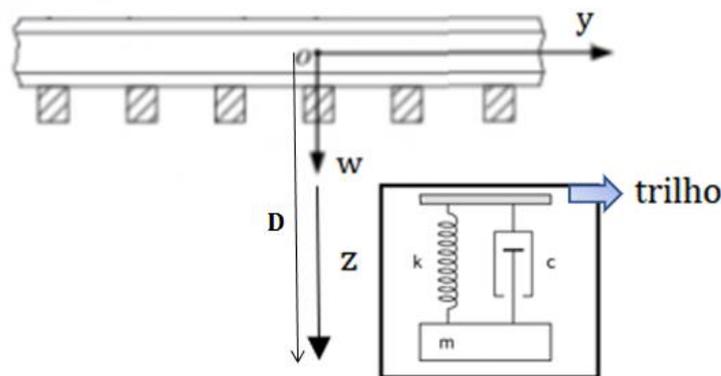


Figura 12 - Sistema massa mola amortecedor utilizado para a colheita energética – Fonte: Gao et al (2016) modificada.

Esse sistema com um grau de liberdade é governado pela seguinte equação:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = m\ddot{w} \quad (17)$$

onde:

$m$ : massa do dispositivo oscilador

$\ddot{z}$ : aceleração do sistema

$c$ : coeficiente de amortecimento

$\dot{z}$ : velocidade de sistema

$k$ : rigidez da mola

$z$ : diferença entre o deslocamento do dispositivo oscilador e a excitação de base do sistema

$\ddot{w}$ : aceleração do trilho, obtida pela segunda derivada da equação (15)

Este sistema também foi utilizado como modelo nos estudos de Tehrani et al. (2013), que usaram o mesmo sistema oscilador para estimativa de potência que seria gerada por um sistema de geração de energia a partir da vibração da via ferroviária. No estudo realizado por Tehrani et al. (2013), uma gama de dispositivos com diferentes frequências naturais foi analisada com o objetivo de verificar o dispositivo capaz de gerar maior energia e, nesse caso, o máximo de energia gerada por um único dispositivo foi de cerca de 0,15 J/kg. Dentre eles, outros autores também utilizam esse sistema para simular o dispositivo de geração de energia. Simon Paquin (2011) estudou a otimização de microgeradores piezelétricos, baseado no modelo de William et al. (1996) e Yates et al. (1997). Estes autores foram os primeiros a proporem o modelo massa, mola e amortecedores para simular o comportamento de micro geradores de energia piezelétricos com vibrações mecânicas como fontes de energia.

Para a resolução das equações um programa em linguagem Fortran foi elaborado utilizando o método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem para a solução das equações diferenciais com um passo de integração de  $h = 0,0017$ .

A partir dos valores obtidos de deslocamento vertical do dispositivo oscilador e de parâmetros adotados conforme a simulação, serão calculadas a potência instantânea e energia acumulada durante a passagem do veículo proposto para cada simulação e posteriormente comparadas as situações a fim de verificar a influência de cada parâmetro variado no propósito de obtenção de energia.

Baseado em Gatti et al. (2015), a energia para um período pode ser expressa pela equação 18, assumindo-se que, para o sistema em questão, toda a energia dissipada pelo amortecedor é colhida pelo piezelétrico posicionado na via e, para fins de simplificação, desconsidera-se qualquer perda mecânica de energia.

$$E(t_e) = \int_0^{t_e} c \dot{z}^2 dt \quad (18)$$

onde:

$E(t_e)$ : Energia acumulada em um determinado intervalo de tempo

$c$ : coeficiente de amortecimento

$\dot{z}$ : velocidade do sistema

### 6.2.1. Parâmetros utilizados

Várias simulações foram desenvolvidas para estimativa de energia acumulada pelo dispositivo, variando-se os carregamentos e fazendo uma parametrização da rigidez e coeficiente de amortecimento do dispositivo (valores na Tabela 5) para que se possa analisar a influência de cada fator sobre a captação de energia e se definir um ponto ótimo de operação do sistema. Para isto foram definidos alguns parâmetros iniciais baseados na literatura consultada e a massa do dispositivo será constante supondo o PZT-5H de dimensões  $0,02 \text{ m}^2 \times 0,0002 \text{ m}$  e densidade  $\rho = 7500 \text{ kg/m}^3$ , conforme Tabela 6. Neste caso consideram-se dois valores de velocidade para avaliar o seu efeito no comportamento dessa curva: a velocidade de operação e a velocidade máxima.

Tabela 5 - Valores Parametrizados

Rigidez do dispositivo (N/m)	Coeficiente de amortecimento (Ns/m)
1889	0,122
9088	1,500
101750	5,500

Fonte: Paquin S. (2011), Ghandchi Therani M. et al (2013).

Tabela 6 - Parâmetros utilizados

Velocidade média de operação veículo	30 km/h
Velocidade máxima de operação veículo	80 km/h
Massa do dispositivo	0,3 kg
Rigidez do dispositivo	1889 N/m
Coefficiente de amortecimento do dispositivo	0,122 Ns/m
Módulo de elasticidade do trilho	206,8 GPa
Momento de Inercia de área do trilho	$2730,5 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
Módulo de via	$28,80 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

Fonte: MetrôRio, BostonPiezelectrics, Paquin S. (2011), PIM-DNIT, Alias (1997).

A força exercida sobre o trilho e as distâncias das rodas ao ponto de referência (dispositivo oscilador) variam de acordo com o veículo utilizado em cada simulação. As distâncias foram calculadas de acordo com as medidas de cada carro, tomando a frente do veículo como ponto inicial e considerando para fins de análise do sistema, uma distância inicial de mais 10 m do veículo ao ponto de referência (dispositivo oscilador) e no caso das composições uma distância de 1 m entre o acoplamento de um carro e outro, como representado na Figura 13.

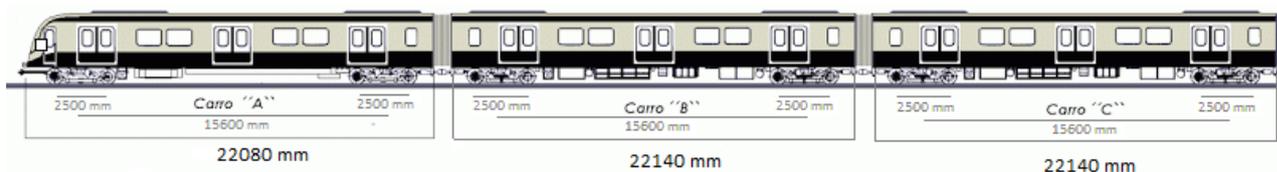


Figura 13 - Metade de uma Composição – Fonte: nossotransporte website com modificações baseadas em dados MetrôRio.

### 6.2.1.1. Análise de uma roda do carro C

Primeiramente, será feita uma análise considerando a equação 15 com apenas uma roda do carro C com lotação de  $8 \text{ pax/m}^2$ , onde seu peso será ( $P_C = 87,89 \text{ kN}$ ) para mostrar a curva de deslocamento do trilho decorrente deste carregamento. Nesta análise não serão considerados os efeitos dinâmicos.

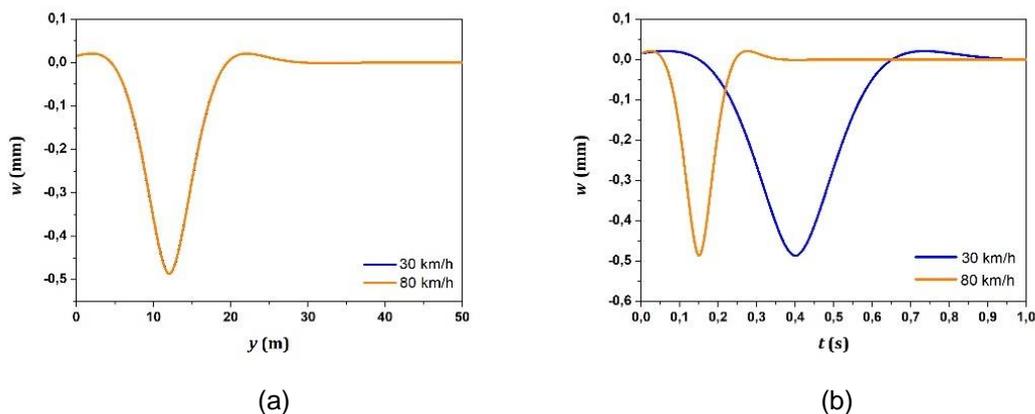


Figura 14 - (a) Deslocamento Trilho x Comprimento (1 roda); (b) Deslocamento Trilho x Tempo (1 roda) – Fonte: Análise Origin.

Os gráficos mostrados na Figura 14 identificam o comportamento da deflexão do trilho para um carregamento móvel em relação à distância percorrida e a um intervalo de tempo, respectivamente. Pelo gráfico (a) da Figura 14, sabendo que a distância da roda ao ponto de referência é de 12,02 m e que a deflexão máxima ocorre no mesmo ponto, pode-se concluir que a deflexão máxima do trilho ocorre exatamente no momento do contato roda-trilho, independente da velocidade de operação do veículo e por este motivo, as curvas se sobrepõem. Observando o gráfico (b) da Figura 14, nota-se que apesar da deflexão ocasionada ter sido causada pelo mesmo carregamento, a velocidade maior faz com que este valor seja atingido em um menor tempo, se comparado à curva de menor velocidade. A partir das análises subsequentes, será analisada como a deflexão do trilho influencia na captação de energia pelo sistema de geração de energia.

### 6.2.1.2. Análises de quatro rodas

Para as próximas análises foram considerados um único carro, levando em conta o apoio de 4 rodas sobre um trilho da via. Neste caso além de variar as velocidades e o carregamento, realizaram-se parametrizações em função da rigidez e coeficiente de amortecimento do dispositivo.

Para demonstrar a situação onde o ganho energético é menos efetivo, foi considerado o carro A, sem a presença de passageiros, ou seja,  $0 \text{ pax/m}^2$  ( $P_A = 49,66 \text{ kN}$ ) e onde o ganho energético é mais efetivo, foi considerado o carro C, com lotação de  $8 \text{ pax/m}^2$  ( $P_C = 87,89 \text{ kN}$ ) e com as velocidades de  $30 \text{ km/h}$  e  $80 \text{ km/h}$  para cada caso. A massa do dispositivo, sua rigidez e coeficiente de amortecimento tem valores de acordo com a Tabela 5 e as distâncias das rodas ao ponto de referência (dispositivo oscilador) para carro A e C encontram-se nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 - Distâncias das rodas à referência (Carro A)

<b>D1</b>	11,99 m
<b>D2</b>	14,49 m
<b>D3</b>	27,59 m
<b>D4</b>	30,09 m

Fonte: MetrôRio.

Tabela 8 - Distâncias das rodas à referência (Carro C)

<b>D1</b>	12,02 m
<b>D2</b>	14,52 m
<b>D3</b>	27,62 m
<b>D4</b>	30,12 m

Fonte: MetrôRio

Os gráficos de deslocamento vertical do trilho e energia em função do tempo são mostrados para os carros A sem passageiros ( $0 \text{ pax/m}^2$ ) e C em lotação máxima ( $8 \text{ pax/m}^2$ ) na Figura 15:

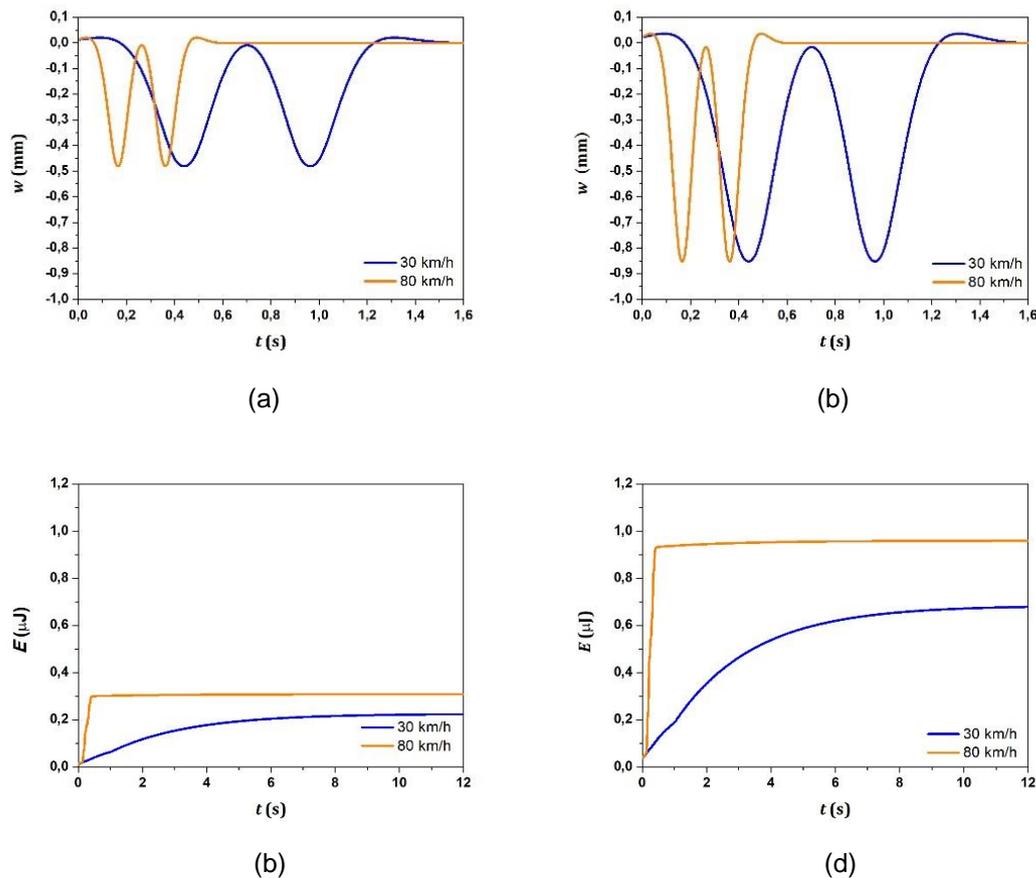
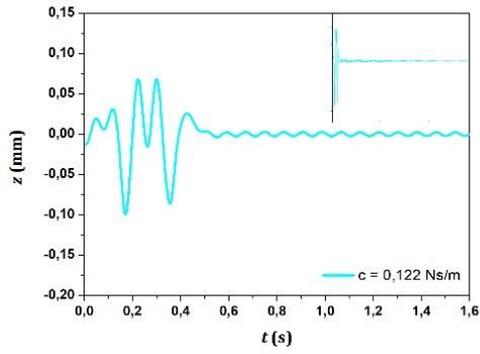
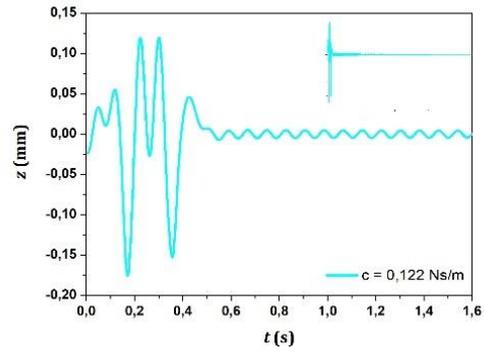


Figura 15 - (a) Deslocamento Trilho x Tempo (carro A); (b) Deslocamento Trilho x Tempo (carro C); (c) Energia x Tempo (carro A); (d) Energia x Tempo (carro C) – Fonte: Análises Origin.

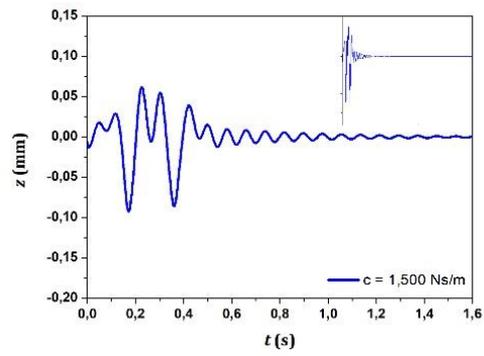
O comportamento do trilho nos casos expostos se fazem de maneira semelhante ao caso de uma roda, entretanto, apresentam apenas dois picos de deflexão iguais para o mesmo carro ( $\vartheta_A = 0,48 \text{ mm}$  ;  $\vartheta_C = 0,85 \text{ mm}$ ) devido a proximidade entre duas rodas de um mesmo truque e que elas se dão nos tempos ( $t_{AC1} = 0,44 \text{ s}$ ;  $t_{AC2} = 0,97 \text{ s}$ ) para 30 km/h e ( $t_{AC1} = 0,16 \text{ s}$ ;  $t_{AC2} = 0,36 \text{ s}$ ) para 80 km/h e para o primeiro e segundo truque dos carros A e C. Observando a variação da velocidade na geração de energia, verifica-se que na velocidade máxima de operação a captação de energia é maior, cerca de  $0,3 \mu\text{J}$  e  $0,9 \mu\text{J}$  para os carros A e C, respectivamente. Devido a esse fato, para as próximas análises paramétricas será considerada apenas a velocidade máxima de operação da via (80 km/h). Os valores de rigidez e coeficiente de amortecimento das parametrizações são baseados nas referências Paquin S. (2011) e Ghandchi Therani M. et al. (2013), conforme Tabela 6.



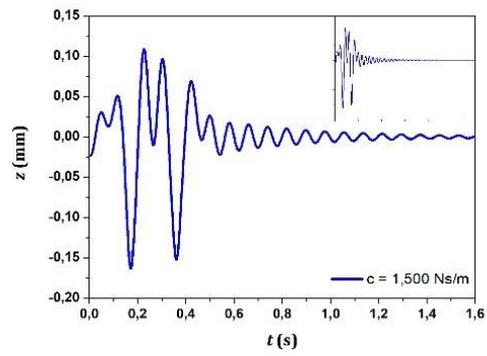
(a)



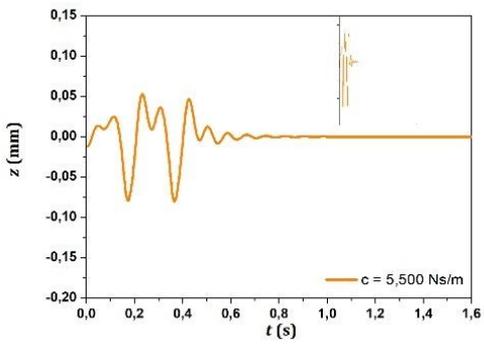
(b)



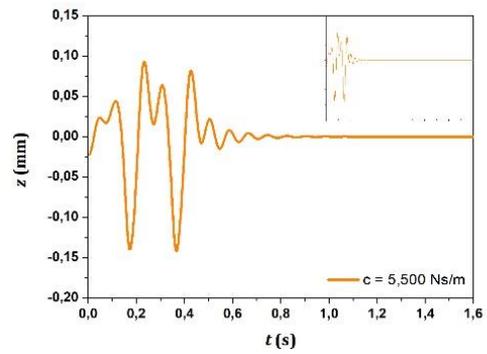
(c)



(d)



(e)



(f)

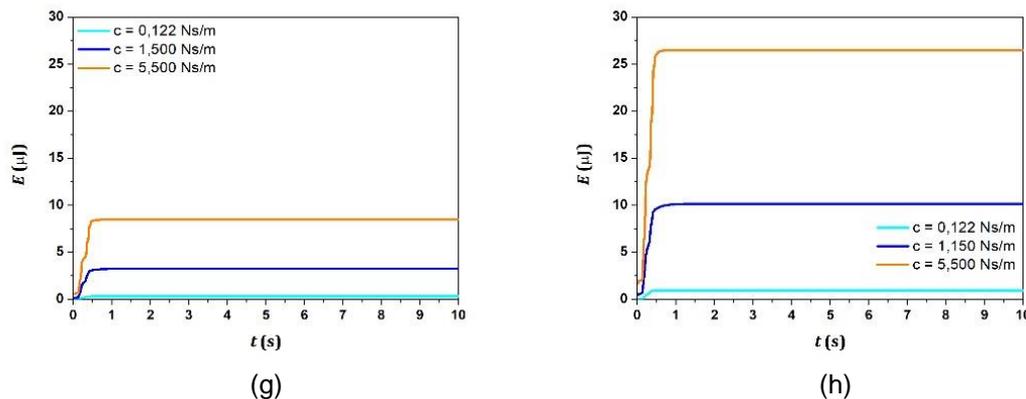
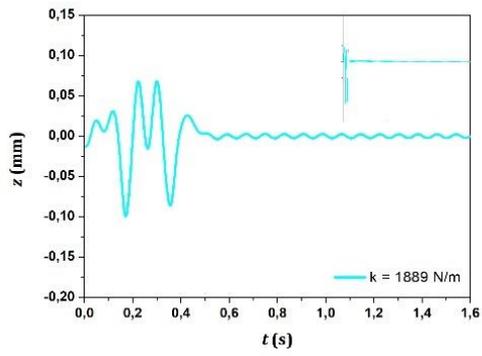


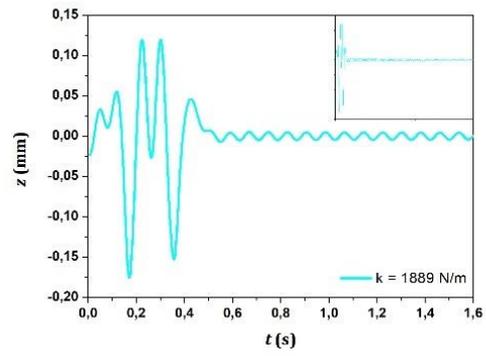
Figura 16 - (a) Deslocamento gerador x Tempo (carro A –  $c = 0,122 \text{ Ns/m}$ ); (b) Deslocamento gerador x Tempo (carro C –  $c = 0,122 \text{ Ns/m}$ ); (c) Deslocamento gerador x Tempo (carro A –  $c = 1,500 \text{ Ns/m}$ ); (d) Deslocamento gerador x Tempo (carro C –  $c = 1,500 \text{ Ns/m}$ ); (e) Deslocamento gerador x Tempo (carro A –  $c = 5,500 \text{ Ns/m}$ ); (f) Deslocamento gerador x Tempo (carro C –  $c = 5,500 \text{ Ns/m}$ ); (g) Energia x Tempo (carro A); (h) Energia x Tempo (carro C) – Fonte: Análises Origin.

Para a análise paramétrica do coeficiente de amortecimento para os carros A e C, os gráficos de deflexão do gerador e energia por tempo são representados na Figura 16 e por estes conclui-se que os deslocamentos máximos obtidos para o dispositivo gerador são de  $\delta_{\text{gerador}} = 0,09 \text{ mm}$  para o carro A e  $\delta_{\text{gerador}} = 0,18 \text{ mm}$  para o carro C considerando  $c = 0,122 \text{ Ns/m}$  coincidem com os tempos onde ocorrem as deflexões máximas no trilho e que as curvas de menor amplitude são respostas à vibração gerada pelo carregamento móvel no entorno do contato roda-trilho.

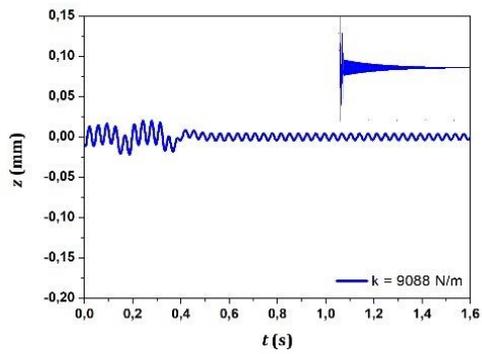
Observando os resultados presentes em (g) e (h) na Figura 16, é possível mostrar, para este sistema, que variando os valores de coeficiente de amortecimento do dispositivo, varia também a energia absorvida pelo mesmo. Quanto maior o coeficiente, maior será a energia captada, já que a energia “dissipada” pelo amortecimento do sistema é a mesma que será absorvida pelo piezelétrico sujeito à vibração do trilho. Para  $c = 5,5 \text{ Ns/m}$  foram obtidos  $8,42 \mu\text{J}$  para o carro A e  $26,4 \mu\text{J}$  para o carro C.



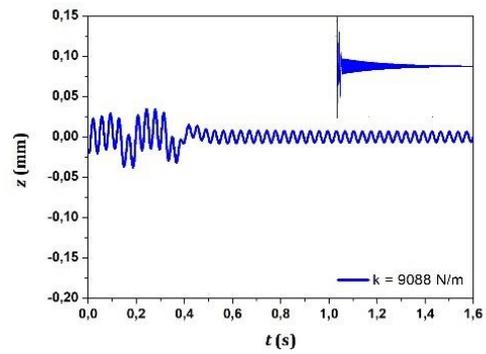
(a)



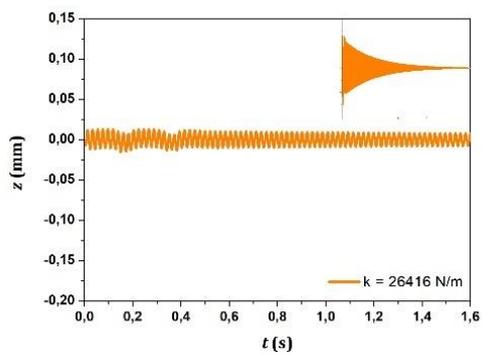
(b)



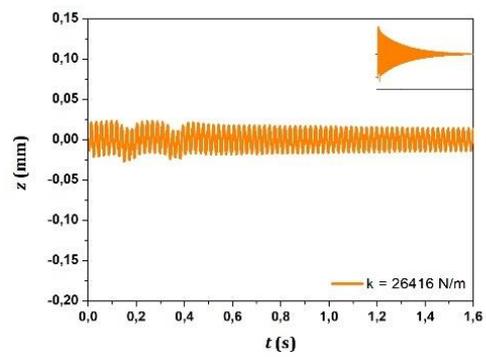
(c)



(d)



(e)



(f)

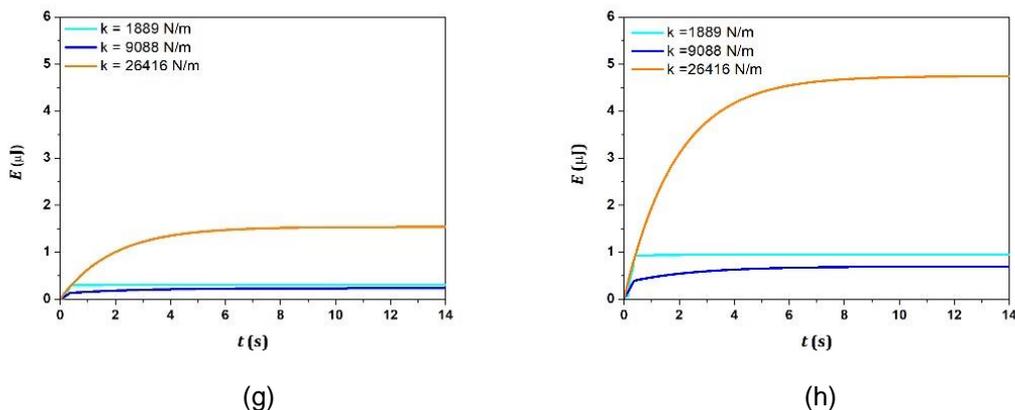


Figura 17 - (a) Deslocamento gerador x Tempo (carro A –  $k = 1889$ ); (b) Deslocamento gerador x Tempo (carro C –  $k = 1889$ ); (c) Deslocamento gerador x Tempo (carro A –  $k = 9088$  N/m); (d) Deslocamento gerador x Tempo (carro C –  $k = 9088$  N/m); (e) Deslocamento gerador x Tempo (carro A –  $k = 26416$ ); (f) Deslocamento gerador x Tempo (carro C –  $k = 26416$ ); (g) Energia x Tempo (carro A – variação de rigidezes); (h) Energia x Tempo (carro C – variação de rigidezes) - Fonte: Análises Origin.

Para a análise paramétrica de rigidez, no caso do carro A, os gráficos de deflexão do gerador e energia por tempo são representados pela Figura 17 e por estes nota-se que as curvas de energia apresentam um comportamento não linear, sendo este dependente da amplitude de deslocamento e do tempo de oscilação do gerador.

Para a curva de menor  $k$ , o deslocamento do gerador é maior durante a passagem do carro, entretanto, a amplitude do deslocamento após a sua passagem é baixa. Para o caso intermediário, tanto o deslocamento quanto a amplitude da vibração após a passagem são baixas, o que justifica este ser o menor ganho energético dos três casos. Por fim, a maior rigidez apresenta um deslocamento inicial baixo, mas este possui uma amplitude de deslocamento muito maior do que os anteriores até que este seja amortecido, o que faz com que este caso seja aquele onde há o maior ganho energético, de  $4,76 \mu\text{J}$ , dentre as situações simuladas.

### 6.2.1.3. Análises de 24 rodas

Para uma análise mais próxima de uma situação real, consideraram-se composições de carros A+B+C+C+B+A (seis carros) - de acordo com a Figura 12. Foram simuladas a composição sem passageiros (0 pax/m<sup>2</sup>) e com lotação máxima de passageiros (8 pax/m<sup>2</sup>). A massa do dispositivo, sua rigidez e coeficiente de amortecimento tem valores de acordo com a Tabela 5 e as distâncias das rodas ao ponto de referência (dispositivo oscilador) encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Distâncias referência até rodas da composição

D1	11,99 m	D13	79,36 m
D2	14,49 m	D14	83,88 m
D3	27,59 m	D15	101,05 m
D4	30,09 m	D16	121,62 m
D4	35,10 m	D17	124,64 m
D6	37,60 m	D18	129,16 m
D7	50,70 m	D19	146,78 m
D8	53,20 m	D20	166,90 m
D9	58,24 m	D21	169,89 m
D10	60,74 m	D22	174,38 m
D11	73,84 m	D23	191,97 m
D12	76,34 m	D24	212,06 m

Fonte: MetrôRio.

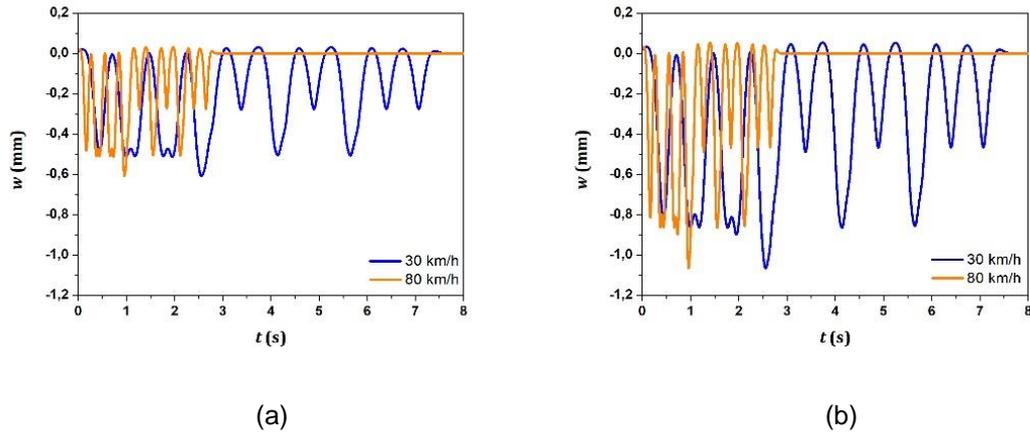
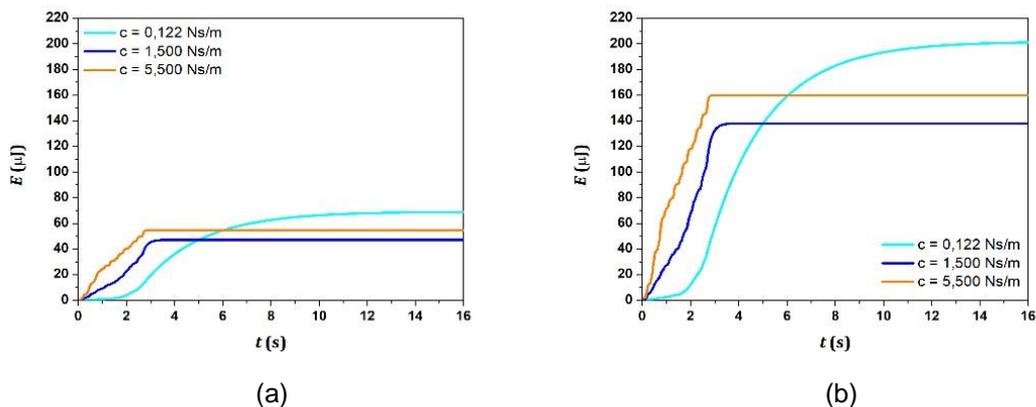


Figura 18 - (a) Deslocamento Trilho x Tempo - trem vazio; (b) Deslocamento Trilho x Tempo - Trem lotação máxima. Fonte: Análise Origin.

Assim como nos casos anteriores as curvas de deslocamento do trilho retratam as passagens de cada uma das rodas para cada uma das velocidades utilizadas e estas ondas se sobrepõem gerando os padrões mostrados na Figura 18. Como esperado também pode-se perceber que os deslocamentos ocorrem em tempos inversamente proporcionais a suas velocidades, se forem comparados os tempos onde os deslocamentos ocorrem para as curvas de velocidade mostradas. Realizando a parametrização do coeficiente de amortecimento, tem-se:



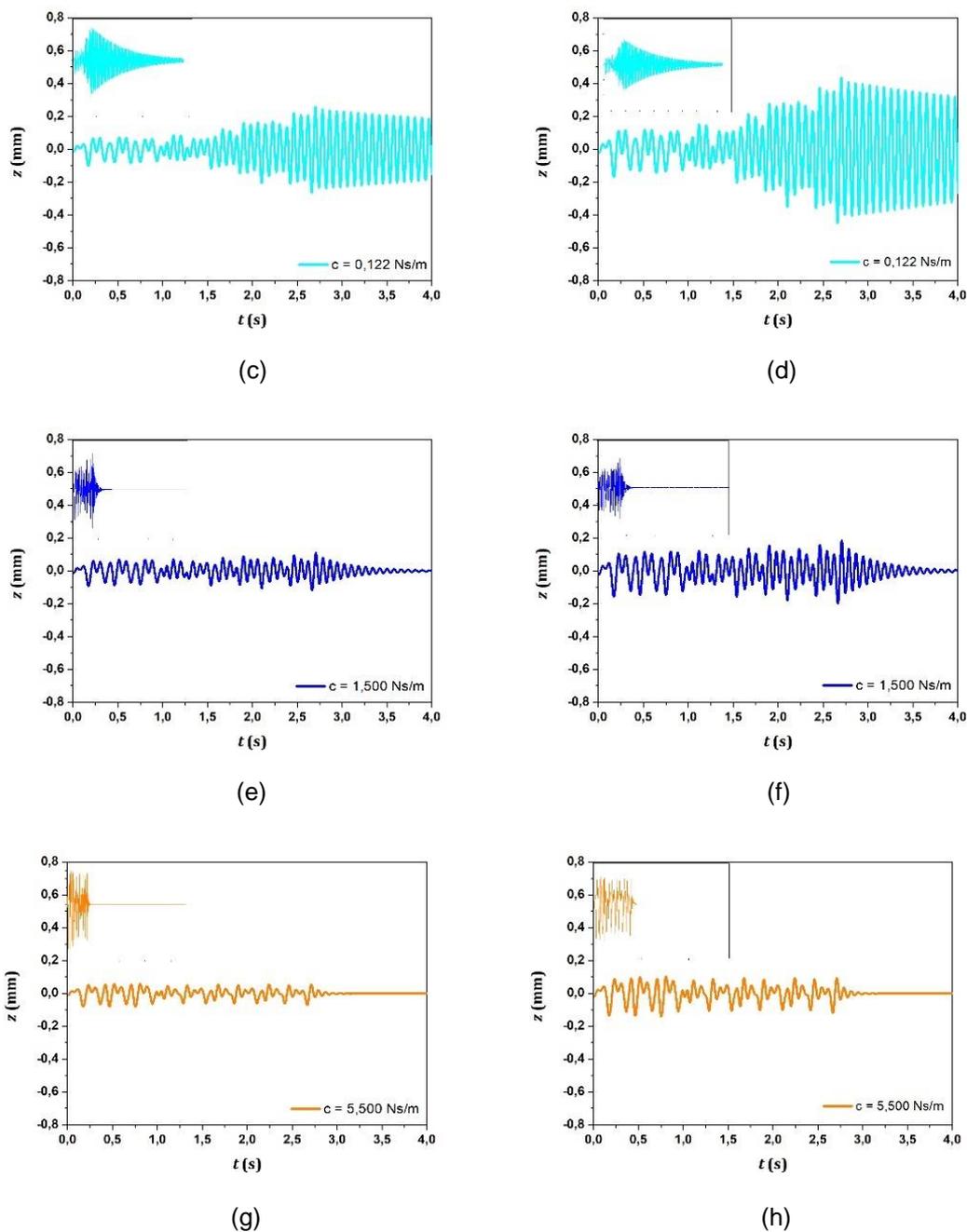


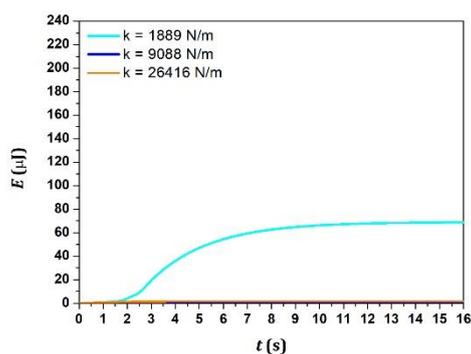
Figura 19 - (a) Energia x Tempo - trem vazio; (b) Energia x Tempo – trem lotação máxima; (c) Deslocamento gerador x Tempo  $c = 0,122$  N/m – trem vazio; (d) Deslocamento gerador x Tempo  $c = 0,122$  N/m – trem lotação máxima; (e) Deslocamento gerador x Tempo  $c = 1,5$  N/m – trem vazio; (f) Deslocamento gerador x Tempo  $c = 1,5$  N/m – trem lotação máxima; (g) Deslocamento gerador x Tempo  $c = 5,5$  N/m – trem vazio; (h) Deslocamento gerador x Tempo  $c = 5,5$  N/m – trem lotação máxima. Fonte: Análises Origin.

A Figura 19 apresenta os resultados para a análise de composição completa, na qual a energia atinge o seu maior valor (201,3  $\mu$ J) considerando os

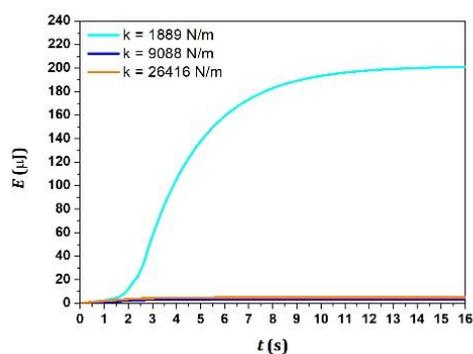
seguintes fatores: Lotação máxima com 8 passageiros por metro quadrado e coeficiente de amortecimento de 0,122 Ns/m.

Pode-se notar que, para este caso, diferentemente da energia obtida apenas para um carro, a energia obtida inicialmente é maior para o caso de maior amortecimento, entretanto, este atinge a estabilização mais rápido (próximo do tempo de 3 segundos), como pode ser visto pelos gráficos de deslocamento do sistema e, em um certo momento, o sistema com menor amortecimento iguala e ultrapassa a energia total dos outros dois sistemas e continua gerando energia até o momento em que o seu movimento é totalmente amortecido.

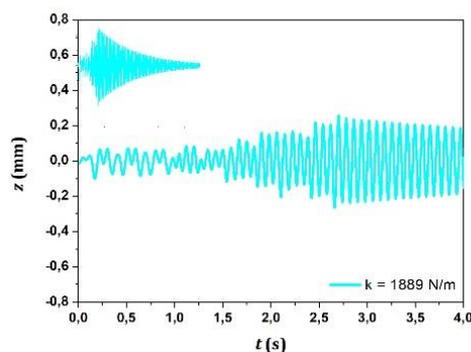
Para a parametrização da rigidez, são apresentados os seguintes resultados:



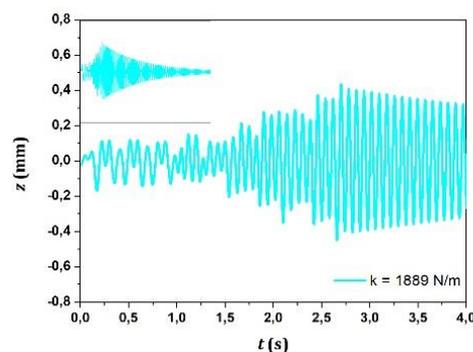
(a)



(b)



(c)



(d)

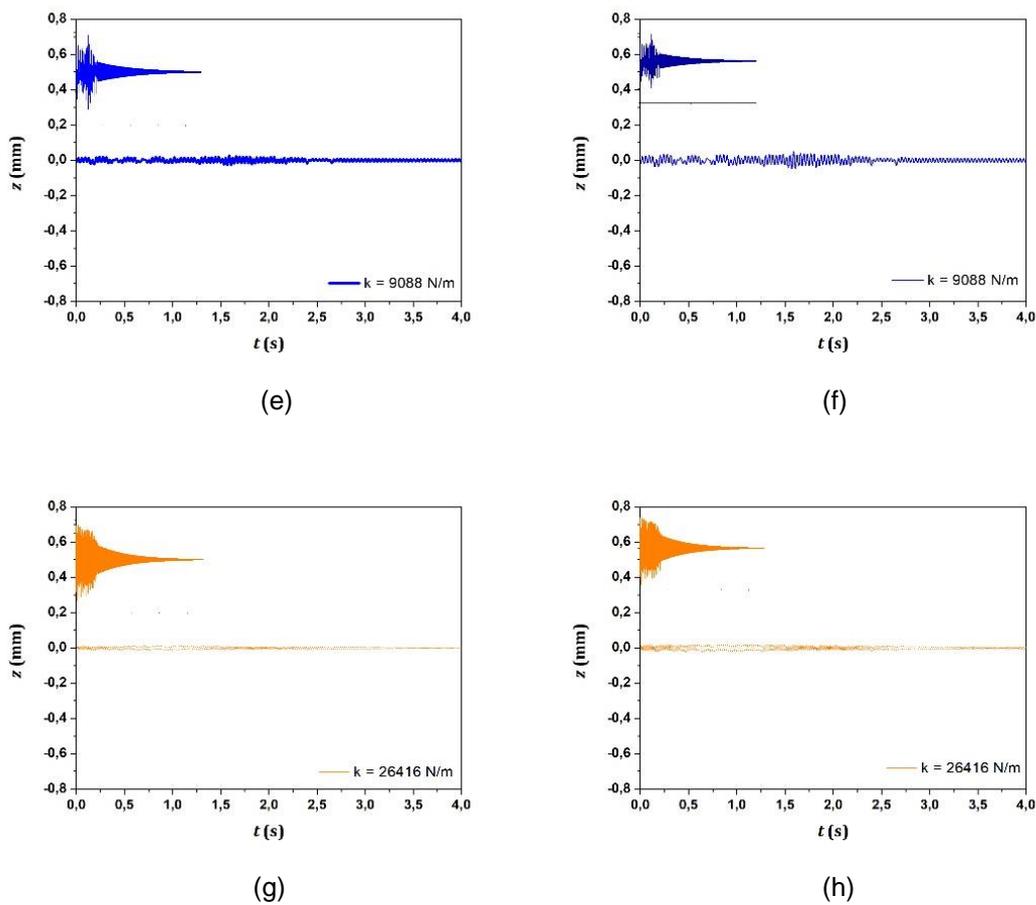


Figura 20 - (a) Energia – trem vazio; (b) Energia – trem lotação máxima. (c) Deslocamento do gerador – trem vazio  $k = 1889$  N/m; (d) Deslocamento do gerador – trem lotação máxima  $k = 1889$  N/m; (e) Deslocamento do gerador – trem vazio  $k = 9088$  N/m; (f) Deslocamento do gerador – trem lotação máxima  $k = 9088$  N/m; (g) Deslocamento o gerador – trem vazio  $k = 26416$  N/m; (h) Deslocamento do gerador – trem lotação máxima  $k = 26416$  N/m; Fonte: Análises Origin.

Para a análise paramétrica de rigidez, os gráficos de deflexão do gerador e energia por tempo são representados pela Figura 20, nota-se que tanto para o trem com  $0$  pax/m<sup>2</sup> quanto para o trem com  $8$  pax/m<sup>2</sup> as curvas de energia apresentam um comportamento não linear.

Pela equação 17 é possível ver a influência da rigidez no valor do deslocamento do sistema que, assim como o intervalo de tempo, será usado na equação 18 para a determinação da energia gerada. Partindo dessas constatações, verifica-se que para a curva de menor  $k$ , além da amplitude do deslocamento do gerador ser grande, este é totalmente amortecido no tempo  $t = 38,4$  s para  $0$  pax/m<sup>2</sup> e  $t = 35,6$  s para  $8$  pax/m<sup>2</sup>, de ordem três e dez vezes maior

que o tempo levado para a estabilização dos casos com rigidezes de  $9088 N/m$  e  $26416 N/m$ , respectivamente. Por fim, a menor rigidez é responsável pelo maior ganho energético obtido e para o caso de lotação máxima obteve-se o valor de  $201,3 \mu J$ .

### **6.3. Monitoramento da lotação**

A logística de operação de um sistema metroviário baseia-se na demanda da sua utilização e atender ao cliente da melhor maneira, satisfazendo a necessidade de locomoção do cidadão de maneira confortável é objetivo da empresa responsável por esse sistema de transporte.

Nesse intuito, ter o controle da lotação de forma momentânea auxiliaria a operação na decisão de injeção de trens nas linhas e poderia servir também ao cliente em sua tomada de decisão sobre usar ou não o sistema ou a qual hora se dirigir a plataforma. Dentro desse contexto o uso do piezolétrico permite esse monitoramento através da relação entre lotação e deslocamento relativo do sistema.

#### **6.3.1. Parâmetros utilizados**

Conforme dados da Tabela 3 (tópico 5.1), sabe-se que a lotação máxima ( $8 \text{ pax/m}^2$ ) dos carros A e B é de 350 pessoas e do carro C de 385 pessoas. Mantendo a consideração de  $80 \text{ kg}$  por pessoa, gravidade de  $9,81 \text{ m/s}^2$ , o dispositivo oscilador e trilho com parâmetros apresentados na Tabela 6 (tópico 6.2) e a velocidade de operação de  $80 \text{ km/h}$ , variou-se a lotação do trem, considerando ( $0 \text{ pax/m}^2$ ;  $2 \text{ pax/m}^2$ ;  $4 \text{ pax/m}^2$ ;  $6 \text{ pax/m}^2$ ;  $8 \text{ pax/m}^2$ ) e encontraram-se os deslocamentos relativos do sistema de acordo com a Figura 21:

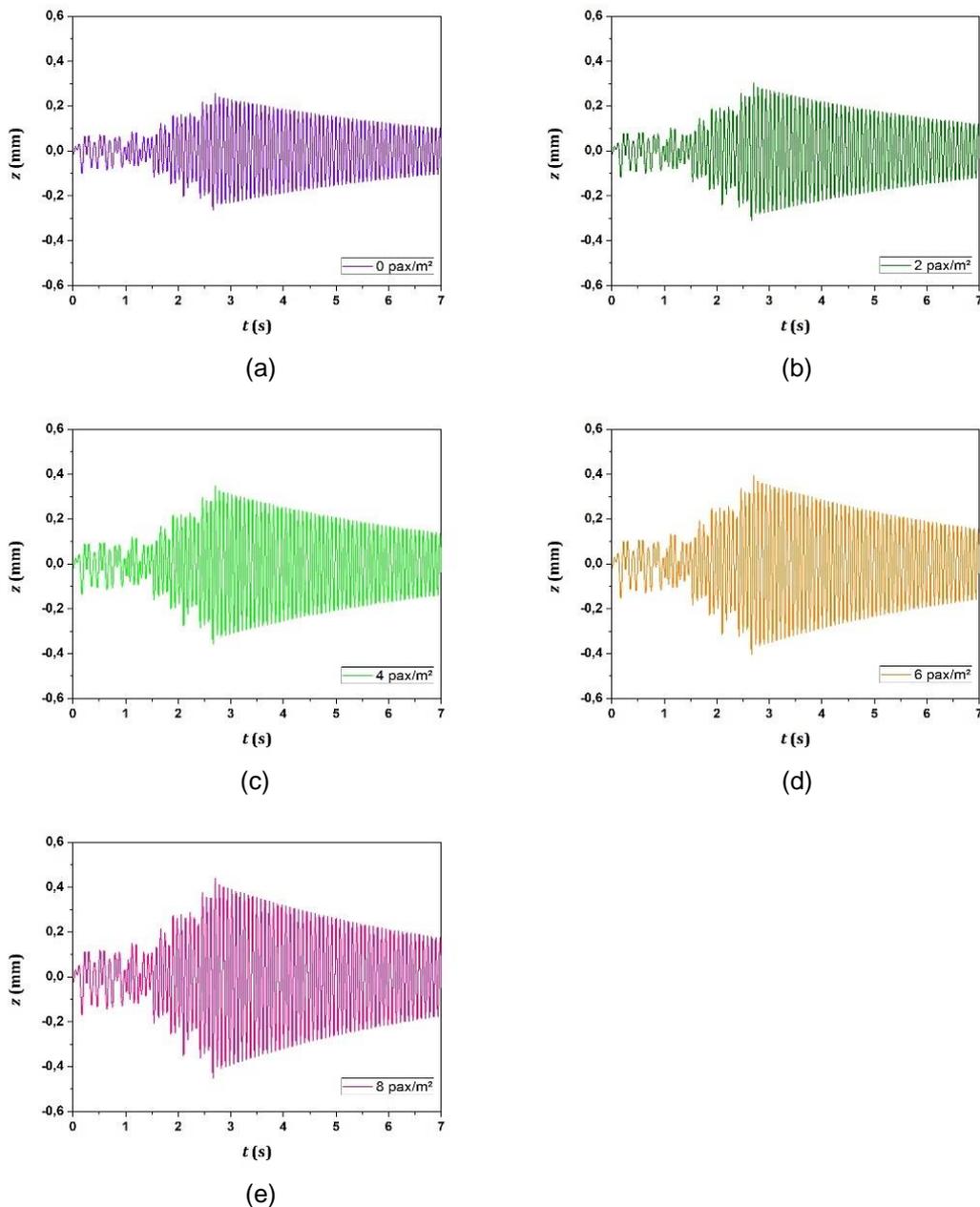


Figura 21 - (a) Deslocamento relativo sistema – 0 pax/m<sup>2</sup>; (b) Deslocamento relativo sistema – 2 pax/m<sup>2</sup>; (c) Deslocamento relativo sistema – 4 pax/m<sup>2</sup>; (d) Deslocamento relativo sistema – 6 pax/m<sup>2</sup>; (e) Deslocamento relativo sistema – 8 pax/m<sup>2</sup>. Fonte: Análises Origin

Com os gráficos é possível obter o valor máximo do deslocamento para cada caso e este valor ocorre no tempo  $t = 2,7025$  s. Na Tabela 10 é possível ver o valor desses deslocamentos para cada lotação:

Tabela 10 - Valores de deslocamento relativo do sistema

<b>Lotação (pax/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Deslocamento relativo sistema (mm)</b>
<b>8</b>	0,4392640
<b>6</b>	0,3938877
<b>4</b>	0,3485114
<b>2</b>	0,3031351
<b>0</b>	0,2577588

Fonte: Análises Origin.

A partir dos dados apresentados na Tabela 10, observa-se uma tendência linear das correspondências obtidas entre lotação ( $L$ ) e deslocamento relativo do sistema ( $z$ ). Essa relação permite uma estimativa da quantidade de pessoas no trem que pode ser obtida pela equação linear (equação 19):

$$L = \frac{(z - 0,2577588)}{0,02268885} \quad (19)$$

## Capítulo 7

### 7. Considerações Finais

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões a respeito da viabilidade técnica do estudo proposto e sugestões para trabalhos futuros.

#### 7.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo mostrar a implementação de um elemento piezelétrico sob uma via de modo a aproveitar a energia proveniente da vibração da passagem dos trens. Pôde-se concluir que a energia gerada para o caso de lotação máxima, situação semelhante aos horários de pico de operação é de cerca de 200  $\mu J$ , o suficiente, por exemplo, para a alimentação de sistemas de sensoriamento da via, que requerem pouca energia para seu funcionamento ou sistemas auxiliares como: iluminação de estações e aparelhos de transporte (escadas rolantes, esteiras, plataformas verticais e inclinadas).

De modo a suprir esses componentes é necessário o armazenamento dessa energia. Para esse fim uma bateria de íon-lítio junto a um controlador de cargas entre o gerador e a mesma apresenta-se como uma melhor opção devido a ausência de efeito memória e por dispensarem ciclos completos de cargas, o que é bastante importante visto que o número de ciclos de carga e descarga vai ser alto e não serem tóxicas como o níquel, mantendo o propósito sustentável. No entanto, outras tecnologias podem ser empregadas como a bateria recarregável de hidreto metálico de níquel que dispensam o uso de controlador de carga usada por Sodano et al. (2014) em um estudo de também aproveitamento de vibrações mecânicas em energia elétrica. Ou capacitores usados por Clementino M. (2013) e supercapacitores utilizados por Pörhönen et al. (2014) que tem a capacidade de serem carregados e oferecerem energia de forma muito rápida o que pode ser útil dependendo do sistema a ser alimentado e da frequência de trens. Além disso, a implantação do circuito elétrico pode

exigir retificadores e capacitores que vão transformar a corrente alternada em contínua e adequar sua amplitude a finalidade, respectivamente.

Apesar do alto custo e do pouco uso, se comparado com outras matrizes energéticas, esta tecnologia vem ganhando espaço e hoje em dia já está presente em uma série de equipamentos e dispositivos. Com os avanços tecnológicos será possível reduzir o preço e aumentar a captação de energia, tornando a piezeletricidade uma real alternativa às maiores fontes de geração de energia atuais, entretanto com maior versatilidade e menores impactos ao meio ambiente.

## **7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Para o prosseguimento dos estudos a respeito do assunto, seria válido, explorar o modelo considerando as variáveis citadas anteriormente, como os amortecedores dos truques, o amortecimento de cada uma das camadas da via e sua influência e fazer a parametrização do módulo de via, a fim de se averiguar o impacto do estado da via para a geração de energia. Uma outra alternativa seria testar diferentes tipos de piezelétricos e diferentes localizações para a sua instalação para selecionar a opção que possua um maior desempenho dentre as testadas. Analisar a viabilidade econômica do sistema para saber a quantidade de energia gerada para múltiplos geradores em comparação com os gastos com energia para o fornecimento do serviço, que hoje é o segundo maior gasto da companhia. E propor como sistema de redundância para monitoramento de localização e velocidade do trem.

## Referências Bibliográficas

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION; **“Practical guide to railway engineering”**, 2003.

ANTUNES E.; SOUSA M.; SCHERTEL M. **“Piso que transforma energia mecânica em eletricidade”**, Fevereiro 2014.

ASTUDILLO-BAZA Y.; ZAPEDA M.; SABINO M. **“Getting electric power for piezoelectricity”**, The International Journal of Engineering and Science (IJES), Dezembro 2016.

BBC; **“A history of the london underground”**. Disponível em: <https://www.bbc.com/timelines/zxkrb82>. Acesso em: 10 set. 2018.

BBC.; **“Trevithick the railway pioneer”**, 2009. Disponível em: [http://newsrss.bbc.co.uk/rss/local/southeastwales/people\\_and\\_places/history/rss.xml](http://newsrss.bbc.co.uk/rss/local/southeastwales/people_and_places/history/rss.xml). Acesso em: 9 set. 2018.

BEHERA M. **“Piezoelectric energy harvesting from vehicle wheels”**, International Journal of Engineering Research & Technology, Maio 2015.

BOBAN B.; BABU S. K.; SATHEESH U.; DEVAPRAKASAM D. **“Energy harvesting by optimized piezo transduction mechanism”**, 2014.

BRASIL FERROVIÁRIO; **“A via permanente”**, 2018. Disponível em: <http://www.brasilferroviario.com.br/via-permanente/>. Acesso em: 17 out. 2018.

BRINA H. L. **“Estradas de ferro – Volume 1 – Via permanente”**, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979.

BYRN E. **“The Progress of Invention in the Nineteenth Century”**. Nova York: Editora Munn & Co, 1900. Disponível em: <http://www.gutenberg.org/files/41538/41538-h/41538-h.htm>. Acesso em 10 set. 2018.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY; **“The world factbook – railways”**. Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/fields/384.html>. Acesso em 15 out. 2018.

CHO J. Y.; JEONG S.; JABBAR H.; SONG Y.; AHN J. H.; KIM J. H.; SUNG T-H. **“Piezoelectric energy harvesting system with magnetic pendulum movement for self-powered safety sensor of trains”**, 2016.

CLEMENTINO M. **“Análise numérica e experimental de geradores piezelétricos de energia”**, Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Oeste do Paraná, Brasil, 2013.

COSTA E SILVA A. **“Uma introdução à engenharia ferroviária”**, Editora Clube de Autores, 2018.

CREMINS M. **“Fault detection in railway track using piezoelectric impedance”**, Tese de mestrado, Julho 2014.

CURY M. V. **“Escolha entre a bitola larga brasileira e a bitola internacional padrão para a linha 4 do metrô do Rio de Janeiro”**, 2011.

ELHALWAGY A.; MAHMOUD G.; MOHAMED E. **“Feasibility study for using piezoelectric energy harvesting floor in buildings interior spaces”**, International Conference – Alternative and Renewable Energy Quest, Fevereiro 2017.

ESVELD C. **“Modern Railway Track”**, MRT Productions, 2001.

GAO M. Y.; WANG P.; CAO Y.; CHEN R.; LIU C.; **“A rail-borne piezoelectric transducer for energy harvesting of railway vibration”**, Agosto 2016.

GERICK G. **“1863: Londres inaugura o primeiro metrô do mundo”**, 2018. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/1863-londres-inaugura-o-primeiro-metr%C3%B4-do-mundo/a-297312>. Acesso em: 10 set. 2018.

GOWENS WHYTE A. **“Electricity in Locomotion - An Account of its Mechanism, its Achievements, and its Prospects”**. Cambridge: University Press, 1911. Disponível em: <http://www.gutenberg.org/files/51242/51242-h/51242-h.htm>. Acesso em: 10 set. 2018.

H. C. KNIGHT. **“The Rocket - The Story of the Stephensons, Father and Son”**. Londres: T. Nelson And Sons, Paternoster Row, 1897. Disponível em: <http://www.gutenberg.org/files/50119/50119-h/50119-h.htm>. Acesso em 9 set. 2018.

HIBBELER R. C. **“Resistência dos Materiais”**, Pearson Education, 2015.

HILTON G. **“A history of track gauge”**, Maio 2016. Disponível em: <http://trn.trains.com/railroads/abcs-of-railroading/2006/05/a-history-of-track-gauge>. Acesso em 10 set. 2018.

PRIYANSHU K.; **“Piezo-Smart Roads”**, International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, ISSN: 2319-7463 Vol. 2 Tópico 6, pp: (65-70), Junho 2013.

LAE-HYONG K. **“Vibration and impact monitoring of a composite-wing model using piezoelectric paint”**, 2014.

LAUMANN F.; SØRENSEN M.; LINDEMANN R.; HANSEN T.; TAMBO T. **“Energy harvesting through piezoelectricity – technology foresight”**, 9th International Conference on Applied Energy, Agosto 2017.

LEO D.J.; **“Engineering Analysis of Smart Material Systems”**, John Wiley & Sons, 2007.

LICHTBERGER, B. **“Track Compendium – Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics”**, Eurail Press, 2005.

MARQUI F.; OKI N. **“Sistema De Geração E Armazenamento De Energia Elétrica Utilizando Transdutor Piezelétrico Na Forma Pulsada”** – UNESP, Iha Solteira, Brasil, 2015.

MATSUDA H.; TANAKA Y.; PATEL R.; DOI Y.; MORIYAMA Y.; UMINO Y. **“A painting type of flexible piezoelectric device for ocean energy harvesting”**, Applied Ocean Research 68, 2017.

NABAIS R. J. S. **“Manual básico de engenharia ferroviária”**, Oficina de Textos, 2015.

NETO C. **“Manual didático de ferrovias”**, 2018.

PÖRHÖNEN J.; RAJALA S.; LEHTIMÄKI S.; TUUKKANEN S. **“Flexible Piezoelectric Energy Harvesting Circuit With Printable Supercapacitor and Diodes”**, IEEE Transactions On Electron Devices, Vol. 61, No. 9, Setembro 2014.

PRAUSE R.; MEACHAM H. **“Assessment of design tools and criteria for urban rail track structures”**, Março 1974.

REZENDE S. **“Materiais e Dispositivos Eletrônicos”**, Livraria da Física, 2004.

RIBEIRO F. **“Proposta de metodologia para estudos geotécnicos em projetos de pavimentos ferroviários”**, 2012.

RICCI T.; **“Richard Trevithick”**, 2012. Disponível em: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/transportation/richard-trevithick>. Acesso em: 9 set. 2018.

SADEGUI J. **“Investigation of characteristics and modelling of railway track system”**, 1997.

SANTOS S. **“Transporte Ferroviário: História e Técnicas”**, Cengage Learning, 2011.

SELIG E. T.; WATERS J. M. **“Track Geotechnology and Substructure Management”**, Thomas Telford, 2000.

SGAVIOLI RIBEIRO, F. **“Proposta de metodologia para estudos geotécnicos em projetos de pavimentos ferroviários”**. 2012. 196f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – Brasil, 2012.

SILVA M. “**Análise das tensões no patim do trilho na via férrea carregada**”, 2016.

SODANO H. A.; INMAN D.; PARK G. “**Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries**”, Journal of intelligent material systems and structures, Vol. 16, Outubro 2005.

SONG D.; YANG C. H.; HONG S. K.; KIM S. B.; WOO M. S.; SUNG T-H. “**Study on application of piezoelectricity to korea train express (KTX)**”, 2013.

THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA; “**Stockton & Darlington Railway**”. Disponível em: <https://www.britannica.com/topic/Stockton-and-Darlington-Railway>. Acesso em: 9 set. 2018.

TRAIN HISTORY; “**Richard Trevithick and his Invention**”. Disponível em: <http://www.trainhistory.net/train-invention/richard-trevithick/>. Acesso em: 9 set. 2018.

TZANAKAKIS K. “**The Railway Track and Its Long Term Behaviour**”, Editora Springer-Verlag, 2013.

WANG J.; SHI Z.; XIANG H.; SONG G. “**Modeling on energy harvesting from a railway system using piezoelectric transducers**”, Smart materials and structures, 2015.

XU X.; CAO D.; YANG H.; HE M. “**Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement**”, International journal of pavement research and technology, Novembro 2011.

YANG H.; WANG L.; ZHOU B.; WEI Y.; ZHAO Q. “**A preliminary study on the highway piezoelectric power supply system**”, International journal of pavement research and technology, 2018.

## Anexo I

Tabela A.1

<b>ESTAÇÕES E SUAS SIGLAS</b>	
<b>SIGLA</b>	<b>ESTAÇÃO</b>
CTR	CENTRAL
PVG	PRESIDENTE VARGAS
URG	URUGUAIANA
CRC	CARIOCA
CNL	CINELÂNDIA
GLR	GLÓRIA
CTT	CATETE
LMC	LARGO DO MACHADO
FLA	FLAMENGO
BTF	BOTAFOGO

## Anexo II

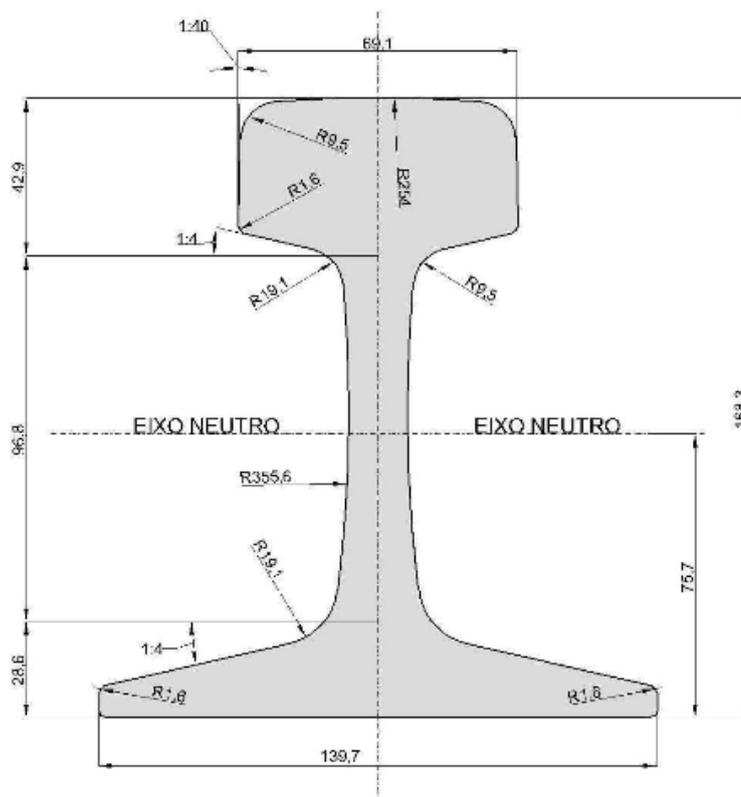
### GENERAL CHARACTERISTICS

	Navy Type I (PZT-4)	Navy Type II (PZT-5A)	Navy Type VI (PZT-5H)	Navy Type III (PZT-8)
<b>Coupling Coefficients</b>				
$k_{33}$	.700	.710	.750	.640
$k_{31}$	.330	.340	.390	.300
$k_{15}$	.710	.690	.680	.550
$k_p$	.580	.600	.650	.510
<b>Piezoelectric Constants</b>				
$d_{33}$ ( $\times 10^{-12}$ m/V)	295	374	585	225
$d_{31}$	-122	-171	-265	-97
$d_{15}$	500	585	730	330
$g_{33}$ ( $\times 10^{-3}$ Vm/N)	24.9	24.8	19.7	24.0
$g_{31}$	-10.6	-11.4	-8.5	-10.9
$g_{15}$	39.0	38.2	29.0	-28.9
<b>Free Dielectric Constant</b>				
$K_{33}^T$	1300	1700	3400	1000
$K_{11}^T$	1475	1730	3130	1290
<b>Elastic Constants</b>				
$S_{33}^E$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N)	15.5	18.8	20.0	13.5
$S_{11}^E$	12.3	15.0	15.6	10.0
<b>Physical Properties</b>				
Density (Kg/m <sup>3</sup> )	7600	7500	7500	7500
$Q_M$	400	100	65	1000
$Q_E$	250	50	40	250
Youngs Modulus ( $\times 10^{10}$ M/m <sup>2</sup> ) Poisson ratio ( $\nu$ ) is approx. 0,31 for all ceramics	7.8	6.6	6.4	9.9
Curie Point (°C)	325	350	195	300
<b>Frequency Constants</b>				
$N_t$ (Hz-m) thickness	2000	1800	1765	2180
$N_s$ (Hz-m) shear	1300	1080	1100	1400
$N_r$ (Kz-m) radial	2150	2000	1950	2310

## Anexo III



Figura 3.4 – Trilho tipo TR 57



ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (cm <sup>2</sup> )	72,58
MOMENTO DE INÉRCIA (cm <sup>4</sup> )	2730,5
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO BOLETO (cm <sup>3</sup> )	294,80
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO PATIM (cm <sup>3</sup> )	360,70
PESO POR METRO (kg/m)	56,90