

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SEM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROJETO E ANÁLISE DE VIABILIDADE DE COLETORES
PIEZELÉTRICOS DE ENERGIA EM FERROVIAS**

Aluno: Denys Eduardo Teixeira Marques
Orientação: Prof. Dr. Marcelo Areias Trindade

São Carlos, Dezembro de 2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SEM

Projeto e Análise de Viabilidade de Coletores Piezelétricos de Energia em Ferrovias

Aluno: Denys Eduardo Teixeira Marques
Orientação: Prof. Dr. Marcelo Areias Trindade

Trabalho de Conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica, da Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos necessários para a
conclusão do curso de Graduação em
Engenharia Mecânica.

São Carlos, Dezembro de 2013.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M357p Marques, Denys Eduardo Teixeira
Projeto e análise de viabilidade de coletores
Piezelétricos de energia em ferrovias / / Denys Eduardo
Teixeira Marques; orientador Prof Marcelo Areias
Trindade. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2013.

1. Energy harvesting. 2. Vibrações mecânicas. 3.
Materiais Piezelétricos. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Denys Eduardo Teixeira Marques

Título: Projeto e Análise de Viabilidade de Coletores Piezelétricos de Energia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira

Nota atribuída: 9,5 (nove e meia)

(assinatura)

Prof. Dr. Paulo Sérgio Varoto

Nota atribuída: 9,5 (nove e cinco)

(assinatura)

Prof. Dr. Marcelo Areias Trindade (Orientador)

Nota atribuída: 9,5 (NOVE E MEIO)

(assinatura)

Média: 9,5 (NOVE E MEIO)

Resultado: APROVADO

Data: 04/12/2013

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM ☒

NÃO ☐

Visto do orientador

(assinatura)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo apoio e amor incondicionais. Pela luta e esforço que sempre dedicaram aos seus filhos, e pelo exemplo que são para minha vida.

Agradeço aos meus irmãos e irmãs, por sua prontidão para me ajudar sempre que necessário, e pela companhia durante todos esses anos.

Por fim agradeço aos amigos que fiz durante esta jornada, cuja presença era sempre certa nas longas noites de estudo, mas também nos momentos de alegria e diversão.

“Quero saber o que é o mundo e por que estou aqui e para onde estou indo... Quero saber também como voar sem um avião, se assim o desejar.”

Richard Bach

RESUMO

O presente estudo se dedicou à análise do potencial de geração de energia através das vibrações induzidas nos trilhos de uma ferrovia durante a passagem de trens. Para tanto, foram utilizados geradores piezoelétricos inseridos sob os trilhos, a fim de realizarem a conversão entre energia mecânica e elétrica. O estudo insere-se na área conhecida como *Energy Harvesting*, que consiste no processo de aproveitamento de energias normalmente dissipadas para o ambiente na forma de calor, vibrações ou ruídos. Foi construído um modelo simplificado para a representação do conjunto pista/piezo, tornando possível a análise das deformações a que o elemento piezoelétrico estaria sujeito e a diferença de potencial gerada pelo mesmo, permitindo assim o cálculo estimado da energia que pode ser obtida de tal aplicação.

Palavras-chave: *Energy Harvesting*, Vibrações Mecânicas, Materiais Piezoelétricos.

ABSTRACT

The research was dedicated to find the potential energy generation through the vibrations inducted into the rail trains when it deforms. In order to convert the mechanical energy, from the rail train vibration, into electrical energy, it was used piezoelectric generators, installed over the rail train. The research has focused into the field known as "*Harvesting Energy*", which consists in reusing the dissipated energy from heat, vibrations, or even noise. Moreover, it was created simplified assembly models of piezoelectric/train rail, making possible the piezoelectric displacement analysis. As result, the research could estimate the electricity energy generated for this application.

Key Words: Harvesting Energy, Mechanical Vibration, Piezoelectric Materials.

Índice de Figuras

Figura 1: Dipolos elétricos que conduzem o acoplamento eletromecânico em materiais piezelétricos.	13
Figura 2: Processo de polarização dos materiais piezelétricos.	14
Figura 3: Estação de monitoramento de ferrovia wireless.	17
Figura 4: Elemento piezelétrico trabalhando sob flexão em um trilho de trem.	17
Figura 5: Esquema de montagem da bobina de indução no trilho.	18
Figura 6: Configuração do sistema de <i>Energy Harvesting</i> desenvolvido por Nelson <i>et al.</i>	19
Figura 7: Montagem de geradores piezelétricos sob uma camada de asfalto.	20
Figura 8: Configuração da montagem dos assentos piezelétricos dos trilhos.	21
Figura 9: Assentos piezelétricos conectados a uma estação de monitoramento.	21
Figura 10: Configuração dos dispositivos piezelétricos estudada neste trabalho.	23
Figura 11: Principais componentes de uma ferrovia.	24
Figura 12: Construção simplificada da ferrovia.	25
Figura 13: Dimensões principais de um dormente.	25
Figura 14: Perfil de um trilho de estrada de ferro.	27
Figura 15: Atuador piezelétrico composto por n camadas de material com espessura " t " cada uma.	28
Figura 16: Modelo da ferrovia.	29
Figura 17: Carga dinâmica no dormente no ponto de assento do trilho.	33
Figura 18: Vagão de carga do tipo fechado.	34
Figura 19: Força impulsiva que atua no elemento piezelétrico.	35
Figura 20: Deslocamento $u(t)$ (mm) x t (s) para o modelo com PZT-5A.	37
Figura 21: Deslocamento $z(t)$ (mm) x t (s) para o modelo com PZT-5A.	38
Figura 22: Potencial elétrico gerado pelo elemento piezelétrico de PZT-5A, em Volts x s.	38
Figura 23: Potência obtida a partir de uma resistência de 1000 Ω para o PZT-5A.	39
Figura 24: Deslocamento $u(t)$ (mm) x t (s) para o modelo com Titanato de Bário.	40
Figura 25: Deslocamento $z(t)$ (mm) x t (s) para o modelo com Titanato de Bário.	40
Figura 26: Potencial elétrico gerado pelo elemento piezelétrico de Titanato de Bário, em Volts x s.	41
Figura 27: Potência obtida a partir de uma resistência de 1000 Ω para o Titanato de Bário.	41

Sumário

1. Introdução	11
2. Revisão Bibliográfica	12
2.1. Piezeletricidade e Materiais Piezelétricos	12
2.2. Aplicações de Materiais Piezelétricos	14
2.3. Energy Harvesting em Ferrovias.....	15
2.4. Viabilidade de Geradores Piezelétricos	19
3. Objetivos.....	22
4. Metodologia	23
4.1. Construção de um modelo simplificado de ferrovia.....	23
4.2. Dimensões do Piezo	26
4.3. Modelagem do Gerador Piezelétrico	28
4.4. Força no Dormente	32
4.5. Energia Gerada	35
5. Resultados	36
5.1. Parâmetros dos Materiais Piezelétricos.....	36
5.2. Resposta da Pista (PZT-5A).....	37
5.3. Resposta da Pista (Titanato de Bário).....	39
5.4. Energia Total Obtida.....	42
6. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	43
7. Referências Bibliográficas.....	44

1. Introdução

Durante os últimos anos tem havido um crescente interesse em soluções de engenharia que privilegiem a sustentabilidade, seja a partir de produtos mais eficientes, ou através do reaproveitamento de energias outrora dissipadas para o meio, tais como calor, ondas sonoras e vibrações. Esta energia presente no ambiente pode ser convertida em energia elétrica com o auxílio de materiais que apresentem propriedades piezelétricas, piroelétricas ou fotovoltaicas, por exemplo. A transformação da energia perdida em um sistema em energia elétrica é conhecida como *Energy Harvesting*.

Neste contexto, vem ganhando destaque a utilização de materiais piezelétricos, capazes de converter energia mecânica em elétrica. A conversão de energia a partir de vibrações pode ser realizada em qualquer lugar onde haja movimento (Camara, 2012). Nos conversores piezelétricos, utiliza-se a capacidade que esses materiais apresentam de gerar um potencial elétrico quando deformados. Esta propriedade tem ganhado grande importância visto que os mesmos podem ser usados como sensores, atuadores e mais recentemente como coletores de energia para o funcionamento de elementos remotamente operados.

No presente estudo, será investigada a viabilidade de um sistema de captação de energia baseado em geradores piezelétricos instalados sob os trilhos de uma ferrovia, com o objetivo de verificar a quantidade de energia gerada de modo que a mesma possa ser utilizada para a alimentação de sensores de monitoramento da própria estrutura ferroviária.

2. Revisão Bibliográfica

A presente revisão introduz os conceitos de piezeletricidade, bem como as principais características dos materiais piezelétricos e suas aplicações, focando em seu uso para *Energy Harvesting*.

2.1. Piezeletricidade e Materiais Piezelétricos

A piezeletricidade é uma propriedade exibida por alguns materiais cerâmicos capazes de gerar uma resposta elétrica à aplicação de uma pressão mecânica. O termo *piezo* vem do grego e significa pressão. Deste modo, um material piezelétrico, quando submetido a uma tensão mecânica, produz uma diferença de potencial, o chamado efeito piezelétrico. Da mesma forma, quando uma diferença de potencial é aplicada ao material, este se deforma, no chamado efeito piezelétrico inverso (Donald J. Leo, 2007).

O efeito piezelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie. Pierre Curie já havia previamente estudado o fenômeno da piroeletricidade. Este estudo levou os irmãos não somente a notar o efeito de geração de um potencial elétrico devido à pressão, mas também a prever em qual direção a pressão deveria ser aplicada. (Lagoin, 2011). Somente alguns anos depois foi descoberto que o efeito inverso também ocorria.

O interesse em materiais piezelétricos começou a aumentar quando, durante a primeira guerra mundial, o francês Langevin utilizou um cristal piezelétrico para criar um dispositivo capaz de detectar a presença de submarinos na costa britânica, em uma das primeiras aplicações práticas dos materiais piezelétricos. (Donald J. Leo, 2007)

Durante muitos anos os únicos materiais piezelétricos que foram estudados eram cristais naturais que apresentavam um fraco efeito piezelétrico. Foi somente em meados do século XX que surgiram os primeiros materiais piezelétricos sintéticos, com propriedades de acoplamento mais forte e que permitiram mais aplicações práticas. (Donald J. Leo, 2007)

Os materiais piezelétricos pertencem à classe dos ferroelétricos, que são materiais que apresentam uma separação de carga local, conhecida como dipolo elétrico, como pode ser visto na Figura 1 abaixo:

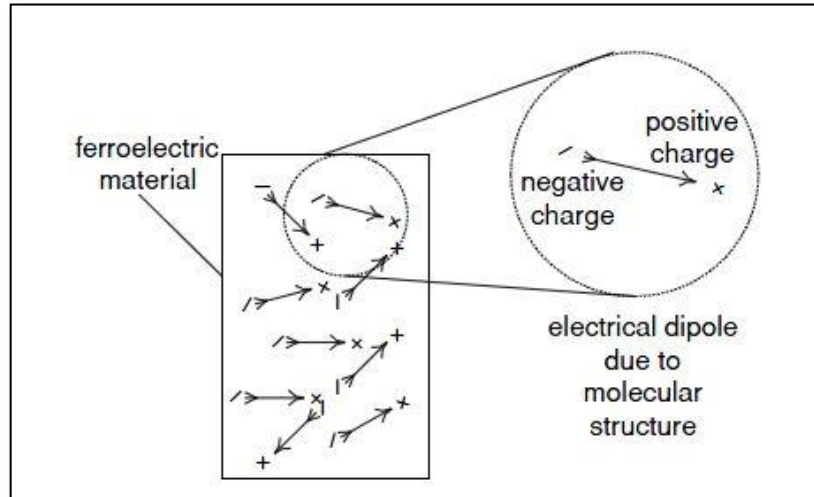


Figura 1: Dipolos elétricos que conduzem o acoplamento eletromecânico em materiais piezelétricos.
Fonte: Donald J. Leo, 2007.

Para a síntese dos materiais sintéticos é utilizada uma técnica chamada de *pooling*. Isto porque durante a composição do material os dipolos elétricos ficam orientados de forma aleatória, mas quando o material é aquecido acima de certo ponto, a chamada temperatura de Curie, e um forte campo elétrico é aplicado ao mesmo, os dipolos elétricos se reorientam em relação ao campo elétrico, e este processo é denominado *pooling*, conforme pode ser visto na Figura 2 a seguir. Uma vez que o material é resfriado, os dipolos mantêm a sua orientação. Depois que o processo é completado, o material irá apresentar o efeito piezelétrico (Sodano et al, 2004).

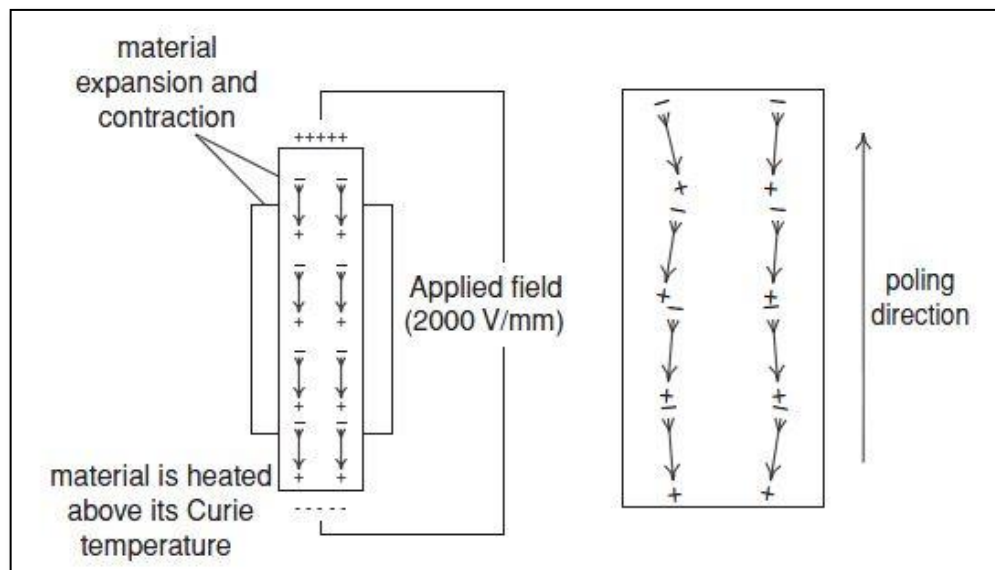


Figura 2: Processo de polarização dos materiais piezelétricos.

Fonte: Donald J. Leo, 2007

Os materiais cerâmicos são os mais utilizados atualmente para a síntese de dispositivos piezelétricos devido à sua capacidade de adaptação para satisfazer as exigências de um propósito específico. Atualmente o PZT (titanato zirconato de chumbo) é o material mais empregado na fabricação dessas cerâmicas. O PZT foi desenvolvido por cientistas do Instituto de Tecnologia de Tóquio por volta de 1952, e em comparação com os outros materiais utilizados até então, o PZT exibia maior sensibilidade e também uma temperatura de funcionamento mais elevada (www.americanpiezo.com).

2.2. Aplicações de Materiais Piezelétricos

Existem hoje vários métodos e materiais utilizados para aplicações de extração e armazenamento de energia do meio ambiente (*Energy Harvesting*), e um fator importante a se observar é a densidade de energia capaz de ser fornecida por cada um deles, de modo a compará-los. Neste quesito destaca-se a energia solar ao ar livre, que tem a capacidade de fornecer uma densidade de potência de 15 000 W/cm³, que é cerca de duas ordens de grandeza superior à de outras fontes. No entanto, a energia solar não é uma atraente fonte de energia para ambientes internos, onde sua densidade de potência cai para a ordem de 10 a 20 W/cm³.

Assim, as vibrações mecânicas (300 W/cm^3) e o fluxo de ar (360 W/cm^3) tornam-se alternativas mais atraentes a serem analisadas (Priya e Inman, 2009).

Embora as magnitudes de tensões, deslocamentos ou forças sejam normalmente pequenas em materiais piezelétricos, e muitas vezes necessitem de amplificação (um disco típico de cerâmica piezelétrica irá aumentar ou diminuir de espessura por apenas uma pequena fração de milímetro, por exemplo) estes materiais foram adaptados a uma grande variedade de aplicações. O efeito piezelétrico é utilizado em aplicações de detecção, como por exemplo, em sensores de força ou de deslocamento, podendo ser usado também como acionador em dispositivos que controlem o posicionamento e também empregados na geração de sinais ultrassônicos (www.americanpiezo.com).

Uma aplicação prática que vem sendo bastante estudada envolve sistemas de monitoramento da integridade estrutural (Structural Health Monitoring), que são instalados em regiões de difícil acesso como pontes, oleodutos e gasodutos, ou mesmo em veículos autônomos. Estes sistemas são normalmente alimentados por baterias, o que causa o incômodo de substituí-las uma vez que a sua carga acabe. Assim, a possibilidade de alimentar os componentes eletrônicos de baixo consumo destes sistemas, recarregar suas baterias ou até mesmo torná-los autônomos energeticamente é o principal objetivo de estudos que envolvem os materiais piezelétricos, buscando formas de maximizar a quantidade de energia mecânica que pode ser convertida em eletricidade através destes materiais. (Camara, 2012)

2.3. Energy Harvesting em Ferrovias

O transporte ferroviário é um sistema altamente eficiente, tanto para o transporte de cargas como para o de passageiros, e é predominante em regiões altamente industrializadas, como por exemplo em países europeus.

Embora no Brasil o transporte ferroviário tenha desempenhado sempre um papel secundário, devido principalmente a uma malha pouco desenvolvida, ultimamente tem havido um crescente interesse do governo em sanar tal deficiência do transporte brasileiro. Assim, em agosto de 2012 o governo federal lançou o “Programa de Investimento em Logística: Rodovias e Ferrovias”, que prevê um

investimento de 91 bilhões de reais na construção de 10 mil km de ferrovias para o transporte de carga até o ano de 2025 (ANTF). Existem ainda vários projetos em andamento na construção de metrô, VLT, monotrilho e trens regionais, os quais estima-se que até 2018 dobrem a atual malha ferroviária para o transporte de passageiros.

Embora o transporte ferroviário seja muito seguro, ainda hoje ocorrem acidentes como colisões, descarrilamentos, etc. Diante desta situação, foram propostos vários modelos de dispositivos que funcionem remotamente e monitorem tanto a integridade estrutural, como o fluxo de trens em uma ferrovia (Tan et al. 2009).

Uma parcela significativa da infraestrutura ferroviária pode vir a existir em áreas relativamente remotas. Nesses locais, devido à inexistência de redes elétricas, as passagens de nível são normalmente assinaladas apenas com sinalização reflexiva e não existem sistemas de alerta com luzes ou cancelas (Nelson et al, 2009). O uso de dispositivos de monitoramento nessas regiões fica então comprometido. Algumas soluções utilizam então bateria para o fornecimento de energia, o que exige certa frequência em sua manutenção para a troca constante das baterias, reduzindo sua viabilidade. Tal situação motivou a busca por soluções para o fornecimento de energia, e estudos recentes têm se dedicado a desenvolver dispositivos de *Energy Harvesting* capazes de gerar energia suficiente para garantir o funcionamento dos sensores e reduzir a frequência de suas manutenções.

A fim de garantir a segurança e agilizar o processo de gestão do sistema ferroviário, muitas construções modernas possuem uma série de pequenas estações de monitorização à beira do caminho. Além do monitoramento do tráfego ferroviário, essas estações à beira do caminho também podem ser usadas para verificar as condições do trilho e até mesmo condições meteorológicas, bem como controlar a lubrificação da pista e outras funções. Uma estação de monitoramento típica (Figura 3) inclui sensores para monitorar a velocidade do trem, os níveis de tráfego, controladores de trilho do tipo aberto/fechado, condições de uso de pista e gelo, além de câmeras de segurança e outros dispositivos para garantir a segurança dos trilhos (www.wti.com).

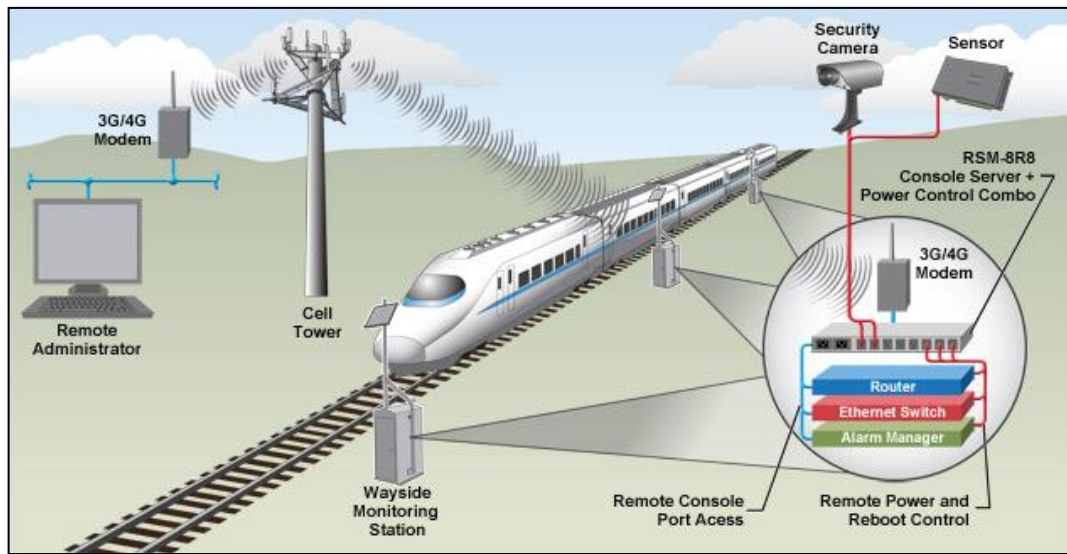


Figura 3: Estação de monitoramento de ferrovia wireless.

Fonte: www.wti.com

Em 2008, Nelson *et al* estudaram a geração de energia em ferrovias baseados na deflexão sofrida pelo trilho durante a passagem de um trem. O estudo aplicou e comparou dois princípios diferentes para a conversão de energia: geradores piezelétricos e uma bobina de indução.

O gerador piezelétrico foi colado do lado de baixo do trilho, no espaço entre dois dormentes, de modo a estar sujeito à flexão do trilho devido ao peso do trem, e a partir da deformação sofrida gerar eletricidade, conforme Figura 4 a seguir.

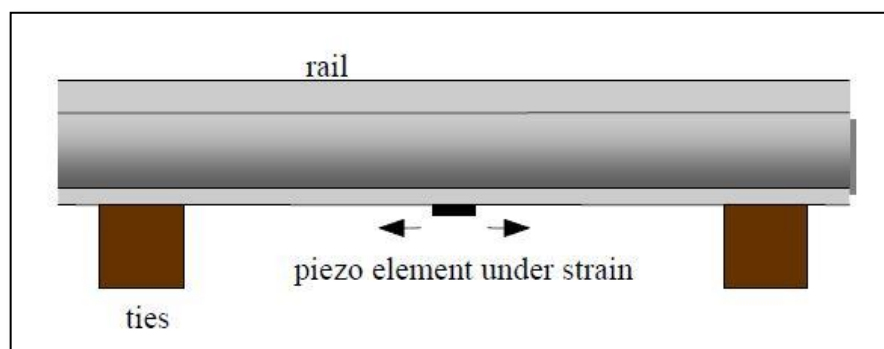


Figura 4: Elemento piezelétrico trabalhando sob flexão em um trilho de trem.

Fonte: Nelson *et al*, 2008.

Já a bobina de indução foi acoplada lateralmente ao trilho (Figura 5), de modo que o movimento vertical do trilho durante a passagem do trem fosse o mesmo da bobina, e a partir da variação do fluxo magnético em seu interior, era gerada energia elétrica.

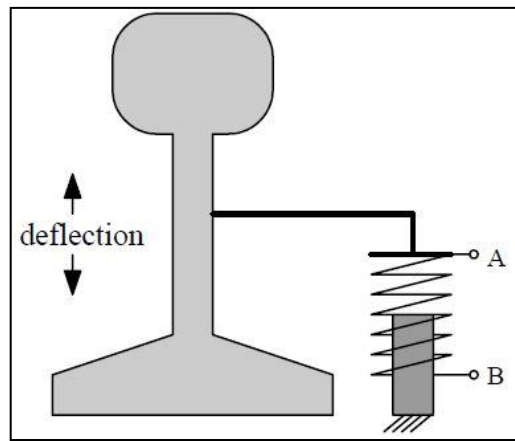


Figura 5: Esquema de montagem da bobina de indução no trilho.
Fonte: Nelson *et al*, 2008.

Ambas as técnicas de reaproveitamento de energia produziram aproximadamente 1 mW de potência, mostrando que ambas possuem potencial para alimentar sensores de monitoramento de ferrovias que consumam pouca energia, como é o caso de sensores de temperatura ou *strain gauges*, capazes de operar com apenas alguns miliwatts.

Em 2009, Nelson *et al* estudaram a viabilidade de um sistema de *Energy Harvesting* em linhas férreas. O objetivo do estudo era o de criar um dispositivo capaz de gerar 9 W de potência, o necessário para manter um sistema de luzes de alerta durante a passagem do trem. Foi utilizado um gerador elétrico de ímã permanente, que ficava apoiado entre dois dormentes do trilho, e um mecanismo acoplado ao gerador que convertia o deslocamento vertical do trilho em movimento rotacional para acionar o gerador. Foi utilizado também um redutor planetário para ampliar o movimento rotacional que movia o gerador. Um desenho de todo o conjunto pode ser visto na Figura 6 abaixo:

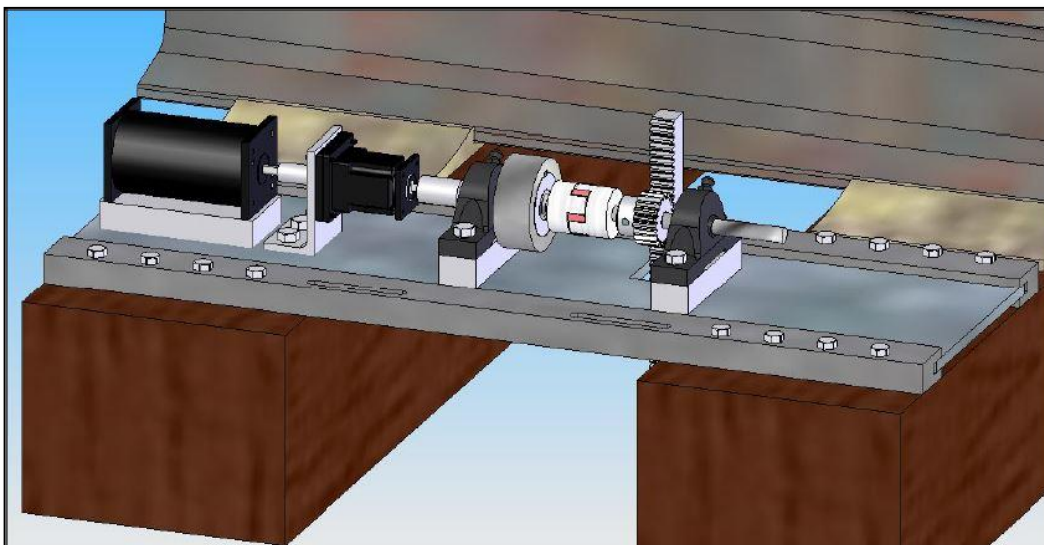


Figura 6: Configuração do sistema de *Energy Harvesting* desenvolvido por Nelson *et al.*
Fonte: Nelson *et al*, 2009.

Foram feitas simulações do funcionamento do dispositivo admitindo-se deslocamentos do trilho de 6,35 mm, 12,7 mm e 19,05 mm, e com um trem viajando à velocidades de 5 km/h e 12 km/h, e conseguiu-se obter do dispositivo uma potência média de até 4 W.

2.4. Viabilidade de Geradores Piezelétricos

Um caso muito conhecido de aplicação dos conceitos de *Energy Harvesting* através de geradores piezelétricos é o da empresa israelense Innowattech. Esta empresa se especializou em soluções que aproveitam a energia mecânica desperdiçada durante a passagem de veículos, trens e até mesmo pedestres para a geração de eletricidade.

Em um projeto piloto implantado em Israel, uma camada de geradores piezelétricos foi inserida debaixo de um trecho asfaltado de uma rodovia. O peso dos veículos durante sua passagem pela rodovia causa uma deformação tanto na camada de asfalto que cobre os geradores como nos próprios geradores, que atuam então de forma semelhante à deformação típica de uma coluna piezelétrica sob carga axial (Figura 7).

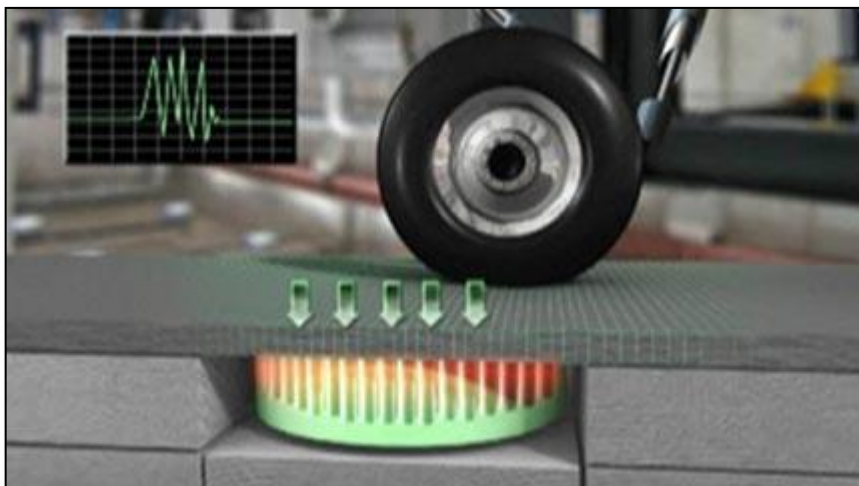


Figura 7: Montagem de geradores piezelétricos sob uma camada de asfalto.
Fonte: Innowattech.

A deformação das colunas piezelétricas é então responsável pela geração de energia elétrica, que pode ser utilizada, por exemplo, na iluminação da própria rodovia.

Os experimentos realizados em Israel mostram que um quilômetro de pista rodoviária de movimento intenso com material piezelétrico pode gerar 200 kW (da Silveira, 2010).

Outro projeto desenvolvido pela empresa Innowattech refere-se à construção de estações de monitoramento de linhas férreas. O projeto substitui os assentos de plástico que são colocados sob os trilhos para ajudar no amortecimento das vibrações por assentos que possuem uma camada de geradores piezelétricos, como pode ser visto na Figura 8 abaixo.

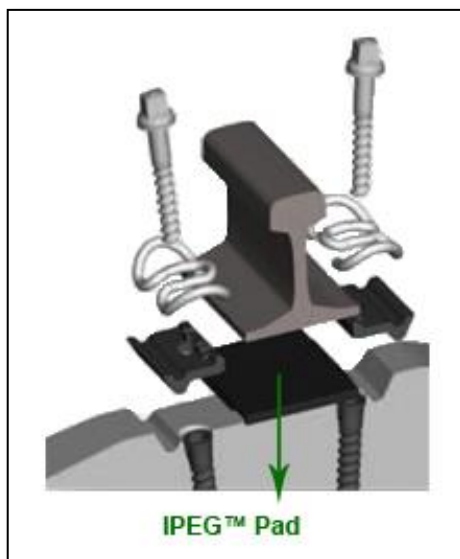


Figura 8: Configuração da montagem dos assentos piezelétricos dos trilhos.

Fonte: Innowattech.

Como os materiais piezelétricos contidos no assento são capazes de transformar tensões mecânicas em potência elétrica (voltagem), torna-se possível através deles inferir o número de rodas do trem, o peso dinâmico e estático em cada roda e a posição da roda. Além disso, a velocidade do comboio e o diâmetro da roda também podem ser mensurados, uma vez que os assentos estão espaçados entre si por uma distância conhecida. Deste modo, a energia da estação de monitoramento (Figura 9) pode ser fornecida pelo próprio sistema.

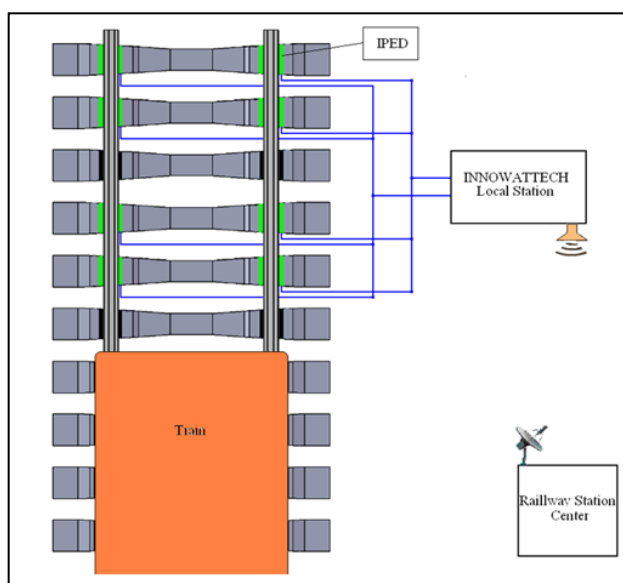


Figura 9: Assentos piezelétricos conectados a uma estação de monitoramento.

Fonte: Innowattech.

3. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o de analisar a viabilidade de estruturas piezelétricas na geração de energia através das vibrações induzidas em ferrovias durante a passagem de trens. O estudo irá se concentrar em geradores piezelétricos que trabalhem sob compressão quando inseridos dentro de dormentes, sob o trilho.

O estudo insere-se na área de *Energy Harvesting*, que trata da geração e captação de energia normalmente perdida no ambiente através de calor, vibrações, ruídos, etc. Embora se utilizem no *Energy Harvesting* diversas formas de conversão de energia, como a piezelétrica, a fotovoltaica, a termoelétrica e a eletromagnética, foi realizada uma revisão bibliográfica abordando o princípio piezelétrico, pertinente sobre o foco deste trabalho, bem como sobre a utilização de dispositivos de *Energy Harvesting* em linhas férreas.

Através da construção de um modelo simplificado que represente as interações do elemento piezelétrico com a pista durante o movimento do trem nos trilhos, espera-se obter uma estimativa da quantidade de energia que pode ser obtida através do método descrito no estudo.

4. Metodologia

No estudo de nosso gerador piezelétrico, vamos adotar uma configuração na qual o gerador se encontra inserido dentro do dormente, abaixo do trilho, como ilustrado na Figura 10 abaixo:

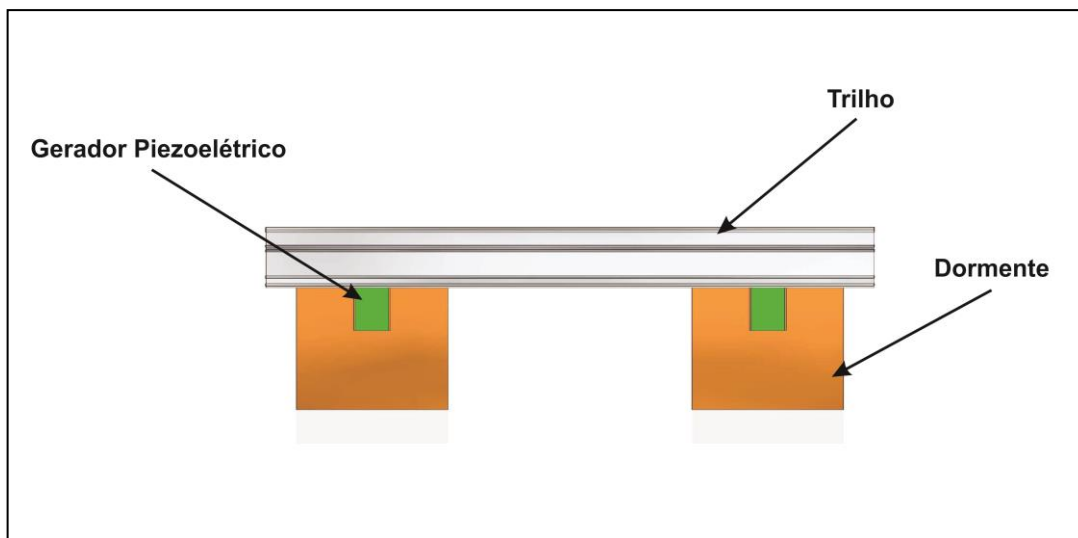


Figura 10: Configuração dos dispositivos piezelétricos estudada neste trabalho.

Para determinar a quantidade de energia que pode ser gerada nesta situação, um modelo de dois graus de liberdade da condição ilustrada acima será construído. Será necessário também conhecer os esforços aos quais o conjunto dormente/gerador estão sujeitos durante a passagem de um vagão pelos trilhos.

Uma vez conhecido o comportamento dinâmico do gerador, será possível determinar a potência que o mesmo é capaz de gerar.

4.1. Construção de um modelo simplificado de ferrovia

A composição típica de uma ferrovia inclui os seguintes elementos: o trilho de ferro, que é suportado pelos dormentes, uma camada de cascalho sob os dormentes (lastro), uma segunda camada de cascalho, e por fim o chão (Figura 11).

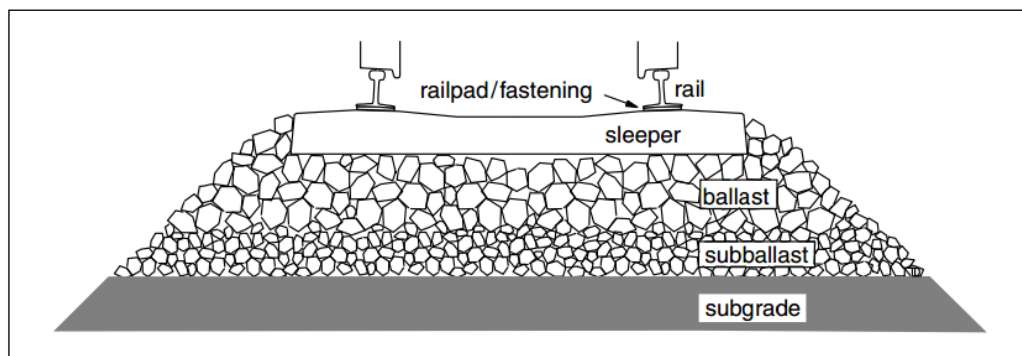


Figura 11: Principais componentes de uma ferrovia.

Fonte: http://sci-lib.org/books_1/l/iwnicki_01_06.pdf

Os trilhos (rail) são os responsáveis por guiar o caminho a ser seguido pelo trem, e são discretamente apoiados por dormentes (sleepers), igualmente espaçados entre si. Os dormentes por sua vez repousam sobre uma camada de cascalho (ballast), cuja função é manter os trilhos nivelados e também suportar a carga transmitida pelos trilhos. Normalmente utilizam-se pedras como granito ou calcário para esta função. Abaixo desta camada é depositada uma segunda camada de cascalho (subballast), mais fina do que a primeira, cuja função é impedir a penetração do cascalho superior no chão (subgrade).

Nosso objetivo é o de construir um modelo simplificado que represente as interações entre dormente e cascalho durante a passagem do trem, a fim de determinarmos as deformações às quais o nosso elemento piezo estará sujeito durante esta condição. Desta forma, uma primeira simplificação será a de considerarmos o dormente como um elemento rígido e, além disso, vamos assumir que apenas uma camada de cascalho separa o dormente do solo, que será considerado como uma base fixa, como pode ser visto na Figura 12.

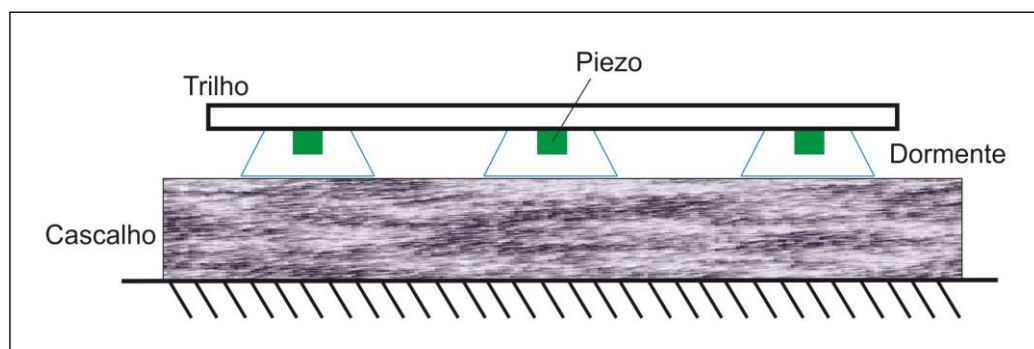


Figura 12: Construção simplificada da ferrovia.

Em um estudo de vibrações em ferrovias, Lombaert *et al* (2006) criaram um modelo complexo de ferrovia para prever as vibrações induzidas na mesma durante a passagem de um trem. No estudo, os dormentes foram assumidos como elementos rígidos, apoiados em todo seu comprimento pelo cascalho, sendo este modelado então como uma série de molas e amortecedores independentes entre si. O modelo construído por Lombaert *et al* incluía ainda assentos elásticos instalados entre o trilho e o dormente, e uma interface de contato entre o cascalho e o solo. Na ferrovia analisada por para a construção deste modelo, eram utilizados dormentes com as seguintes dimensões (Figura 13):

Altura no ponto de apoio do trilho (h_1): 205 mm.

Largura na base (W): 235 mm.

Comprimento total (L): 2500 mm.

Massa: 300 kg.

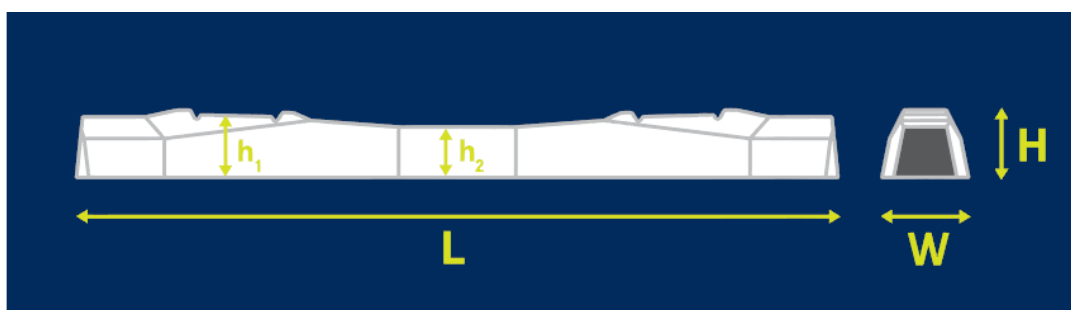


Figura 13: Dimensões principais de um dormente.

Fonte: www.railone.com

No estudo em questão, os dormentes são suportados por uma camada de cascalho de altura $h = 0.35$ m e densidade $\rho = 1700$ kg/m³. Sabendo qual é a área da base do dormente que está apoiada sobre o cascalho, e conhecendo a altura e densidade do último, podemos determinar a massa de cascalho que está acoplada entre o dormente e o solo a partir da seguinte verificação:

$$m = W.L.h.\rho \quad (1)$$

Assim, encontramos uma massa de cascalho de 349,563 kg por dormente. As características de rigidez elástica e amortecimento do cascalho foram obtidas através de um teste de receptância do trilho. O teste foi realizado em uma condição de trilho carregado, através de uma excitação aplicada ao trilho no ponto de apoio do mesmo sobre um dormente. Os resultados encontrados por Lombaert *et al* indicaram uma rigidez elástica para o cascalho de $920,7 \times 10^6$ N/m por dormente, e um amortecimento de $16,6 \times 10^3$ Ns/m por dormente. Iremos utilizar estes mesmos parâmetros para a análise de nosso modelo simplificado das interações entre dormente e cascalho.

Nossa análise, no entanto, irá contemplar apenas metade de um dormente, pois iremos focar o local onde um dos trilhos estará apoiado. Sendo assim, nossos valores de rigidez elástica e amortecimento do cascalho corresponderão à metade do valor encontrado por Lombaert *et al*, bem como a massa de cascalho que estará acoplada ao nosso modelo deverá ser metade da encontrada previamente.

4.2. Dimensões do Piezo

Como o elemento piezelétrico deve estar inserido no interior do dormente, as dimensões deste último acabam por limitar também as dimensões do piezo. O elemento piezelétrico também não deve ser muito grande para que não interfira na integridade estrutural do dormente. Assim, a princípio foi adotado que o elemento piezelétrico possuirá um terço da largura do dormente, e um terço de sua altura.

As dimensões do dormente, como passadas anteriormente, são as seguintes:

Altura no ponto de apoio do trilho (h_1): 205 mm.

Largura na base (W): 235 mm.

Comprimento total (L): 2500 mm.

Desta forma, nosso elemento piezelétrico deve possuir uma largura de 78 mm, e uma altura de 68 mm.

Além disso, vamos assumir que o trilho utilizado é o de perfil de estrada de ferro (Vignole) TR 25 (Figura 14), cuja largura na base é de 98,4 mm.

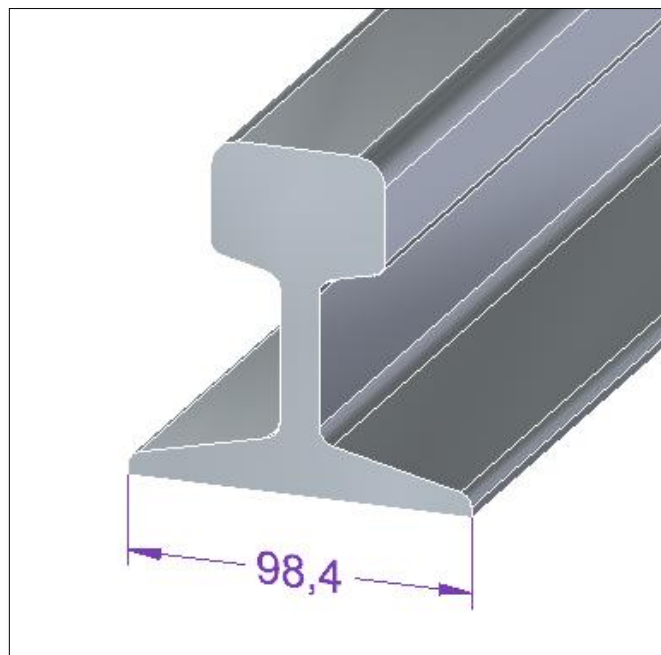


Figura 14: Perfil de um trilho de estrada de ferro.

Assim, o nosso elemento vai possuir uma área de seção transversal de 78 mm x 98 mm, ou seja, 7644 mm², e uma altura total de 68 mm.

Os atuadores piezelétricos são normalmente fornecidos como uma pilha de várias camadas de material piezelétrico. Feenstra *et al* (2007) utilizaram em seus estudos um atuador piezelétrico que apresentava uma altura de 16 mm e era composto por 130 camadas de material ligadas em paralelo. Vamos assumir a mesma proporção de camadas no nosso atuador, que deve então ser formado por 550 camadas de material piezelétrico ligadas entre si em paralelo (Figura 15).

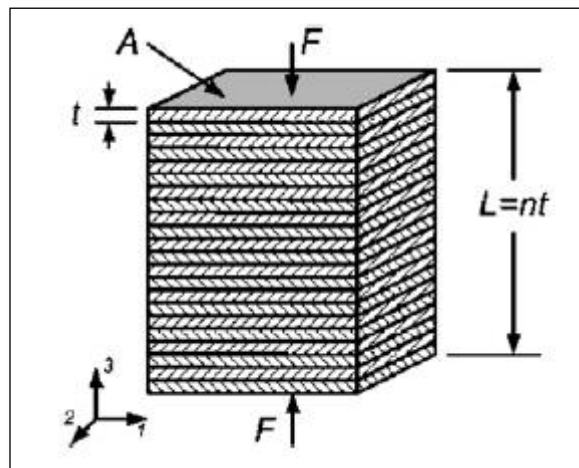


Figura 15: Atuador piezelétrico composto por n camadas de material com espessura “ t ” cada uma.

Fonte: Feenstra *et al* (2007).

4.3. Modelagem do Gerador Piezelétrico

A vibração de um corpo rígido pode ser causada por diversos fatores, tais como uma massa girando excentricamente, imperfeições ou desgaste de materiais, e pode ocorrer em quase todos os sistemas dinâmicos. As características mais importantes para a descrição um sistema vibratório são a sua frequência natural e seu fator de amortecimento (Priya e Inman, 2009). A fim de encontrar uma equação que descreva o comportamento do corpo, podemos simplificá-lo para um modelo de um grau de liberdade, que consiste em tratar o corpo rígido como uma massa apoiada por uma mola e amortecedor perfeitos. O modelo de um grau de liberdade é muito utilizado para estudar as características dinâmicas em um sistema de *Energy Harvesting*.

Uma vez que o domínio elétrico de um material piezelétrico utilizado na captação de energia consiste de parâmetros concentrados (a capacitância interna do material e uma resistência externa), representar o domínio mecânico com parâmetros concentrados (como um sistema massa-mola-amortecedor) tem se mostrado uma útil abordagem na compreensão fundamental da dinâmica do sistema (Erturk e Inman, 2008).

Na construção de nosso modelo, como dito anteriormente, o dormente foi considerado como um corpo rígido. Sendo assim, o conjunto dormente e piezo serão representados por um corpo de massa M e uma mola de constante elástica K_{pe} , onde a massa M corresponde à massa do piezo mais metade da massa do dormente, e a constante K_{pe} é a rigidez do elemento piezelétrico. O conjunto piezo/dormente por sua vez está apoiado sobre o cascalho, que em nosso modelo será representado por um bloco de massa M_2 , constante elástica K e amortecimento c . A Figura 16 abaixo representa a construção esquemática de nosso modelo:

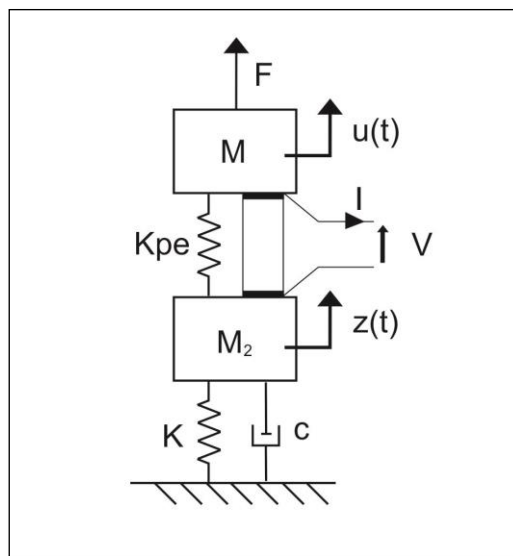


Figura 16: Modelo da ferrovia.

No modelo considerado na imagem acima, atua sobre o corpo de massa M uma força F , que é a força que é transmitida pelo trilho do trem ao dormente durante a passagem dos vagões. O deslocamento da massa M é indicado por $u(t)$, e I e V são, respectivamente, a corrente de saída e a voltagem através dos eletrodos de gerador piezelétrico. A variável $z(t)$ indica o deslocamento sofrido pelo corpo de massa M_2 .

Quando definindo as equações constituintes de um material piezelétrico, é típico definir a carga aplicada ao mesmo na direção 3 (Feenstra et al, 2008). Para um material piezelétrico trabalhando sob compressão, as equações que relacionam tensão, deformação, campo elétrico e indução elétrica podem ser escritas como sendo:

$$T_3 = c_{33}^E \cdot S_3 - e_{33} \cdot E_3 \quad (2)$$

$$D_3 = e_{33} \cdot S_3 + \varepsilon_{33}^S \cdot E_3 \quad (3)$$

Onde T_3 é a tensão, c_{33}^E é a rigidez elástica do piezo em curto circuito, S_3 é a deformação, e_{33} é o coeficiente piezelétrico, E_3 o campo elétrico, D_3 a indução elétrica e ε_{33}^S a permissividade, e os índices subscritos indicam a direção de cada propriedade. A primeira equação define a resposta mecânica do material piezelétrico, e a segunda sua resposta elétrica. Lembrando que estamos definindo estas equações para um elemento piezelétrico composto por várias camadas, temos:

Utilizando as seguintes aproximações:

$$E = -\frac{V}{L} \quad (4)$$

$$S = \frac{u - z}{L} \quad (5)$$

$$I = A \frac{dD}{dt} \quad (6)$$

$$F_p = AT \quad (7)$$

Podemos reescrever as equações (2) e (3) relacionando agora as variáveis elétricas e mecânicas da seguinte maneira:

$$F_p = K_{PE}(u - z) + \alpha \cdot V \quad (8)$$

E podemos reescrever a equação (2):

$$I = \alpha \cdot (\dot{u} - \dot{z}) - C_0 n \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

Onde n corresponde ao número de camadas do piezo e também:

$$K_{PE} = \frac{c_{33}^E \cdot A}{L} \quad (10)$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{33}^S \cdot A}{L} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{e_{33} \cdot A}{L} \quad (12)$$

Sabemos da lei de Ohm que:

$$V = R.I \quad (13)$$

Entrando com a equação (13) na equação (9) obtemos:

$$V = R \left(\alpha.(\dot{u} - \dot{z}) - C_0 n \frac{dV}{dt} \right) \quad (14)$$

Aplicando a segunda lei de Newton ao corpo de massa M encontramos a seguinte equação:

$$M.\ddot{u} + K_{PE}(u - z) + \alpha.V = F \quad (15)$$

Aplicando a segunda lei de Newton ao corpo de massa M_2 encontramos a seguinte equação:

$$M_2.\ddot{z} + c.\dot{z} + (K + K_{PE})z - K_{PE}.u - \alpha.V = 0 \quad (16)$$

Em geral, a máxima potência obtida do sistema ocorre quando a resistência R do sistema é a mesma que a impedância do elemento piezelétrico (Sodano et al, 2005). Assim, vamos assumir que é isso o que ocorre em nosso modelo, embora tal condição não seja facilmente atingida em um sistema real, dado que a impedância do elemento piezelétrico varia com a frequência.

A impedância do elemento piezelétrico é definida como:

$$Z = \frac{t}{j\omega n \epsilon_{33}^s A} \quad (17)$$

Onde j representa a variável complexa que define a impedância capacitiva do elemento piezelétrico, n corresponde ao número de camadas que compõem o atuador piezelétrico e t corresponde à espessura de cada camada, e ω é a frequência de atuação da força F .

As equações (14), (15) e (16) definem o seguinte sistema de equações diferenciais ordinárias:

$$\begin{cases} M.\ddot{u} + K_{PE}(u - z) + \alpha.V = F \\ C_0.R.n.\dot{V} + V - R.\alpha.(\dot{u} - \dot{z}) = 0 \\ M_2.\ddot{z} + c.\dot{z} + (K + K_{PE})z - K_{PE}.u - \alpha.V = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Onde nossas incógnitas são as funções deslocamento $u(t)$ e $z(t)$ e a função que descreve variação do potencial elétrico $V(t)$.

4.4. Força no Dormente

Para obtermos a resposta do sistema modelado acima, precisamos conhecer o comportamento da força à qual o gerador piezelétrico estará sujeito durante a passagem do trem pelos trilhos.

Kumaran et al, (2003) estudaram essa interação entre dormentes de concreto e o trilho tanto no ponto onde se assenta o trilho como no centro do dormente, com o objetivo de obter parâmetros que permitissem melhorar o projeto dos dormentes, tornando-os mais racionais.

A fim de analisar o comportamento dos dormentes na estrutura férrea, Kumaran et al, (2003) desenvolveram um modelo envolvendo tanto os parâmetros da pista como os do veículo, considerando a condição do sistema de suspensão, a velocidade do veículo, o contato entre roda e trilho e suas irregularidades. A interação entre o veículo e a pista foi realizada utilizando o software de elementos finitos MSC / NASTRAN.

Entre os resultados obtidos no estudo está variação ao longo do tempo da força que age no dormente no ponto de assento do trilho, como podemos ver na Figura 17 abaixo:

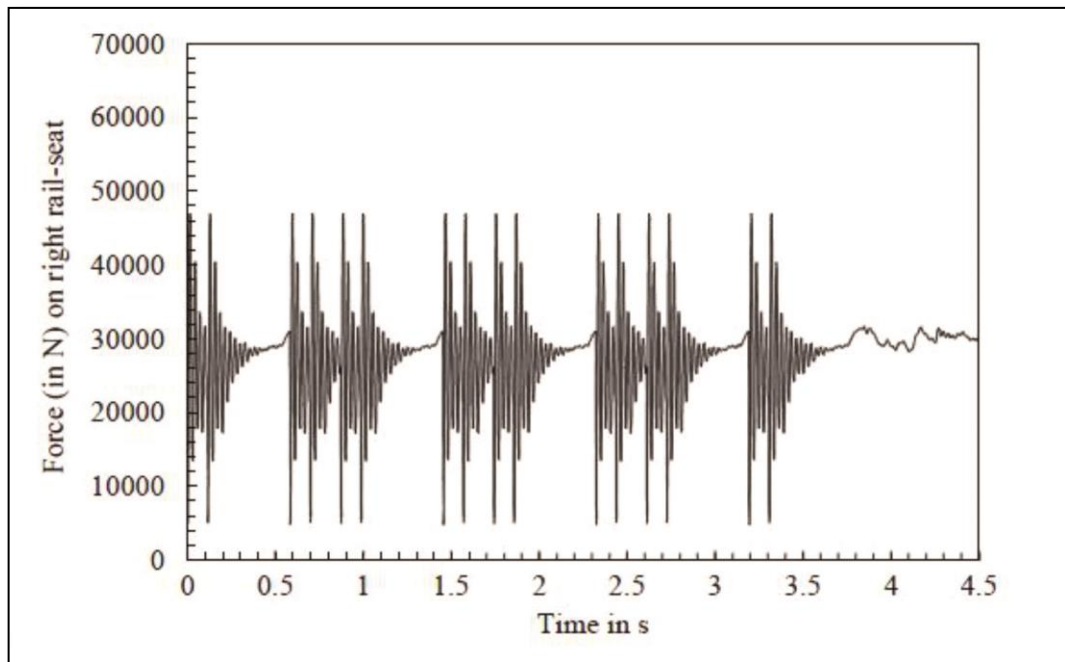


Figura 17: Carga dinâmica no dormente no ponto de assento do trilho.
Fonte: Kumaran et al, (2003).

Observando-se a figura 12 podemos notar que cada pico de força indicado no gráfico corresponde à passagem de uma roda sobre o dormente. E cada conjunto de quatro picos corresponde então a um vagão do trem.

De modo a simplificar nossa análise, vamos considerar que a força aplicada ao dormente será simplesmente uma força impulsiva para cada passagem da roda sobre o mesmo, onde o valor máximo do impulso será de 48000 N, o mesmo valor máximo obtido na simulação de Kuraman *et al*, e a duração do impulso será dada em função do comprimento do piezo e da velocidade do trem. Vimos anteriormente que o nosso piezo vai possuir um comprimento total de 78 mm, e, além disso, sabemos que a velocidade média dos trens de carga no Brasil é de 29 km/h (<http://economia.estadao.com.br/noticias/economia-brasil,ferrovia-tem-velocidade-pre-privatizacao,67017,0.htm>). Portanto o sinal do impulso terá uma duração de:

$$\Delta t = \frac{x}{v} = \frac{0,078}{8,056} = 9,683 \times 10^{-3} \text{ s} \quad (19)$$

Para determinar o intervalo de tempo entre cada impulso, vamos considerar as dimensões de um vagão de carga do tipo fechado usado pela empresa ALL (América Latina Logística), ilustrado na Figura 18 abaixo:

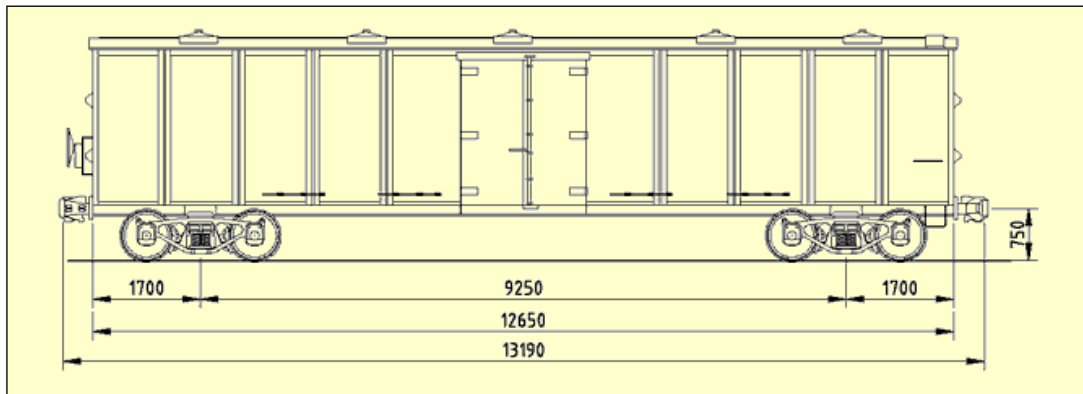


Figura 18: Vagão de carga do tipo fechado.

Fonte: <http://vfco.brazilia.jor.br/vag/vagALL/fec.shtml>

A distância entre as rodas do truque do vagão é de 1549,4 mm, o que nos permite calcular o intervalo de tempo entre a passagem das rodas do truque como segue:

$$t = \frac{1,549}{8,056} = 0,192 \text{ s} \quad (20)$$

A distância entre as rodas internas do vagão (de um truque ao outro) é de 7700,6 mm, e da mesma forma como temos feito, podemos verificar que o tempo de deslocamento entre uma roda e outra será então de 0,956 s.

Por fim, a distância entre a última roda de um vagão com a primeira do vagão seguinte é de 2390,6 mm, o que implica em um intervalo de tempo igual a 0,297 s.

Podemos agora construir o gráfico da força que atuará nos dormentes durante a passagem do trem para o nosso modelo, conforme Figura 19 a seguir:

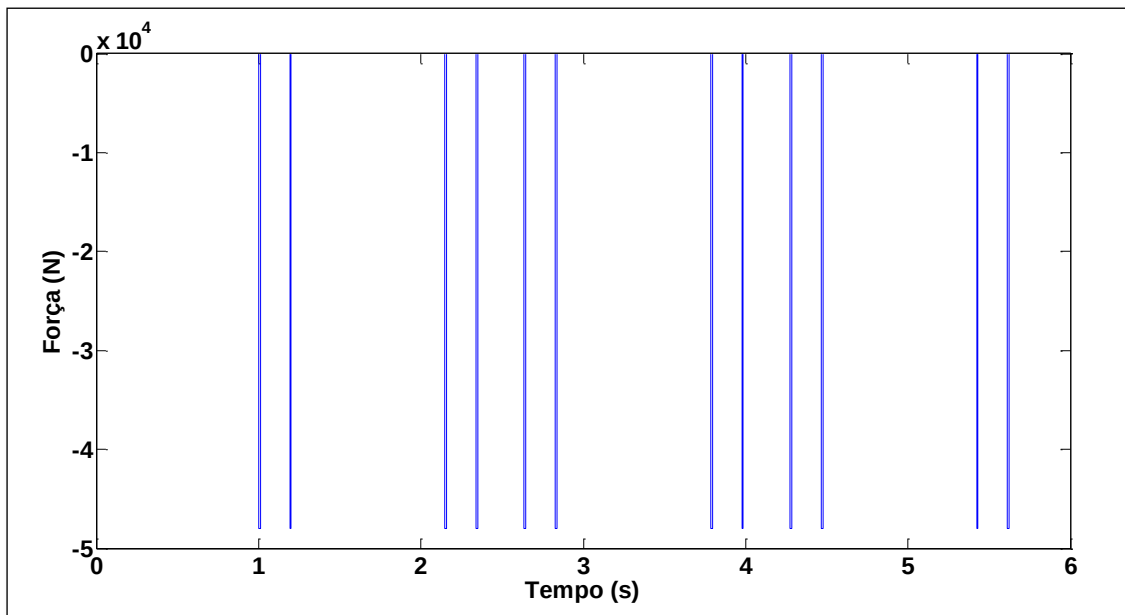


Figura 19: Força impulsiva que atua no elemento piezelétrico.

4.5. Energia Gerada

Uma vez conhecida a resposta do gerador piezelétrico, podemos calcular a energia gerada pelo mesmo da seguinte forma:

$$E = \int P dt \quad (21)$$

Onde P é a potência gerada em um dado intervalo de tempo “t”, e que pode ser calculada como segue:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (22)$$

Desta forma poderemos então determinar se a energia gerada é suficiente para ser utilizada na prática, como por exemplo, para alimentar algum dispositivo de monitoramento de pista.

5. Resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para o nosso modelo de acoplamento entre piezo, dormente e cascalho. Resolvendo o sistema de equações diferenciais ordinárias encontrado no item 4.2. deste relatório, foi possível obter os deslocamentos a que estão sujeitos o elemento piezo e sua base de cascalho, e assim determinar a diferença de potencial gerada no piezo.

Para a resolução do sistema de EDOs foi utilizado o software Simulink®, que é uma ferramenta bastante utilizada para a modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. O software apresenta uma interface gráfica de programação baseada em blocos, facilitando a construção do código para a resolução do nosso problema, tornando-o até mesmo visualmente fácil de interpretar.

5.1. Parâmetros dos Materiais Piezelétricos

Para realizarmos a análise da quantidade de energia possível de ser obtida na aplicação ferroviária escolhemos dois diferentes materiais piezelétricos, a fim de compararmos seus resultados. O primeiro material analisado foi o PZT-5A, cujas propriedades estão indicadas na tabela a seguir:

Tabela 1: Propriedades do material PZT-5A:

Propriedade	Valor
Densidade (ρ)	7750 kg/m ³
Complância (s_{33}^E)	$18,8 \times 10^{-12}$ m ² /N
Coefficiente de Deformação (d_{33})	374×10^{-12} C/N
Permissividade (ϵ_{33}^T)	$1,5 \times 10^{-8}$ F/m

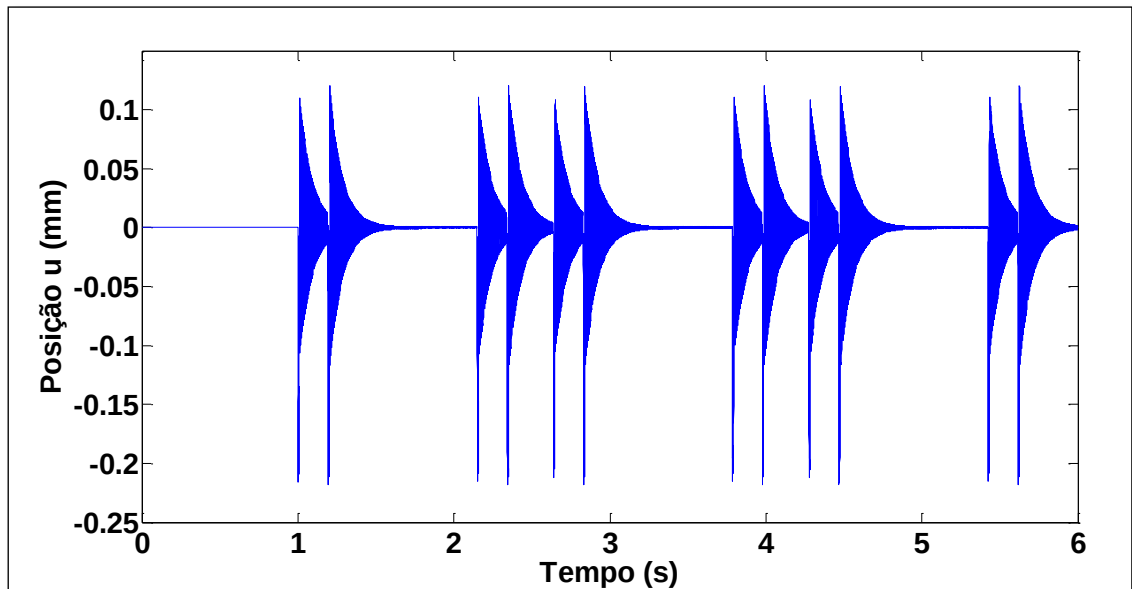
Como segundo material a ser analisado em nossa modelagem foi escolhido o Titanato de Bário, que possui as seguintes propriedades:

Tabela 2: Propriedades do material Titanato de Bário:

Propriedade	Valor
Densidade (ρ)	6020 kg/m ³
Complância (s_{33}^E)	$15,7 \times 10^{-12}$ m ² /N
Coeficiente de Deformação (d_{33})	$85,6 \times 10^{-12}$ C/N
Permissividade (ϵ_{33}^T)	$1,5 \times 10^{-9}$ F/m

5.2. Resposta da Pista (PZT-5A)

Resolvendo então as equações que regem o nosso modelo a partir da entrada impulsiva descrita no item 4.4., para o material piezelétrico PZT-5A, e assumindo que o sistema apresenta uma resistência elétrica de 1000 Ω , obtivemos o seguinte comportamento para o deslocamento $u(t)$, (Figura 20), que representa o deslocamento sofrido pelo bloco de massa M :

**Figura 20:** Deslocamento $u(t)$ (mm) x t (s) para o modelo com PZT-5A.

E o seguinte comportamento para o deslocamento $z(t)$, (Figura 21), que representa a resposta do bloco de massa M_2 :

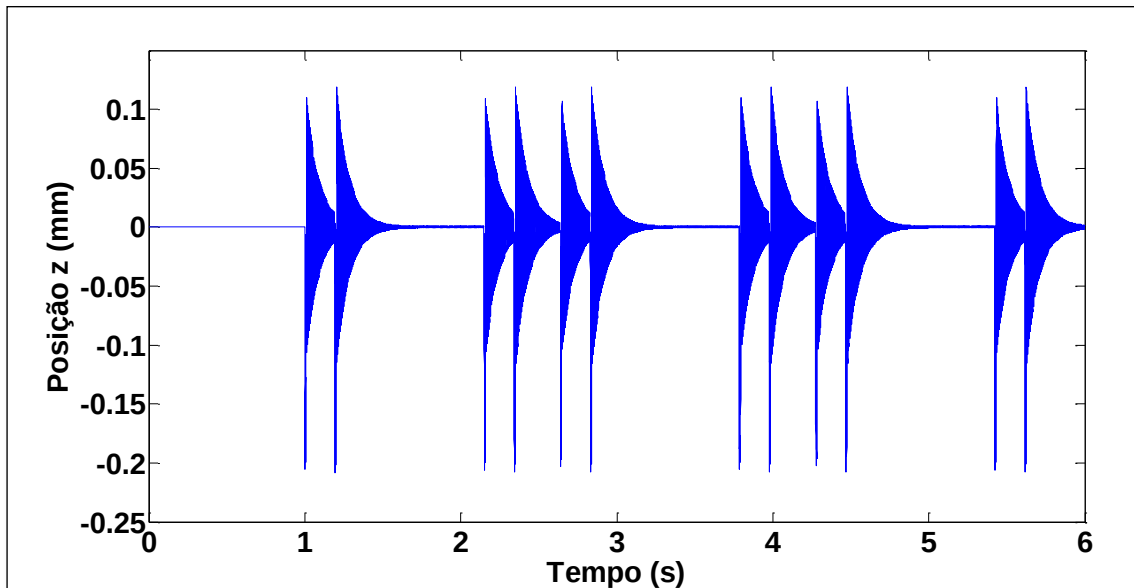


Figura 21: Deslocamento $z(t)$ (mm) x t (s) para o modelo com PZT-5A.

O potencial elétrico gerado pelo elemento piezelétrico, resultante das deformações por este sofrida (que no nosso modelo podem ser calculadas através da diferença entre os deslocamentos $u(t)$ e $z(t)$), apresenta a seguinte configuração:

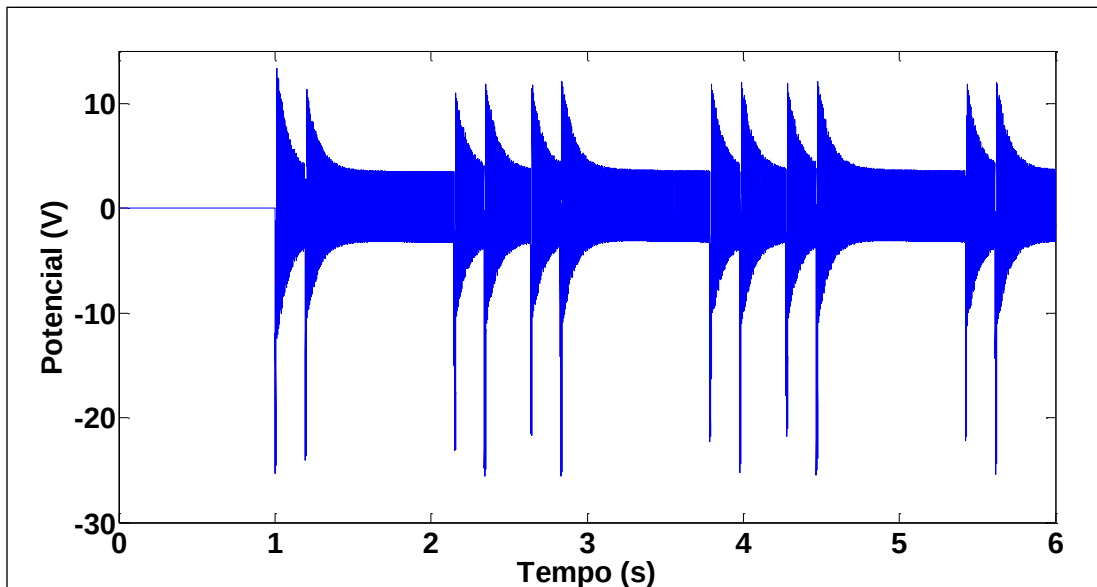


Figura 22: Potencial elétrico gerado pelo elemento piezelétrico de PZT-5A, em Volts x s.

E a potência gerada pelo sistema, com uma resistência de $1000\ \Omega$, está ilustrada no gráfico abaixo:

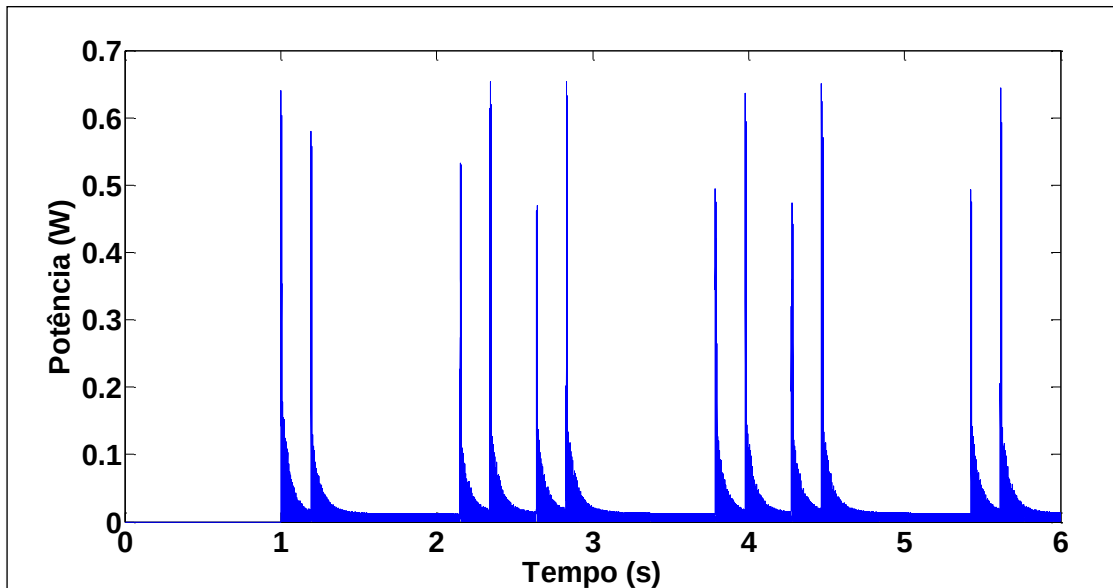


Figura 23: Potência obtida a partir de uma resistência de $1000\ \Omega$ para o PZT-5A.

Através destes resultados, podemos então calcular a quantidade de energia que pode ser obtida durante a passagem de cada vagão, conforme descrito no item 4.5. deste trabalho. Assim, encontramos uma quantidade de energia de 0,0222 Joules produzida durante a passagem de um vagão.

A fim de comparação, variamos a resistência do sistema para $2000\ \Omega$, e foi obtida uma energia de 11,2 mJ. E quando variamos a resistência para $5000\ \Omega$, foi possível obter uma energia de 4,5 mJ por vagão.

5.3. Resposta da Pista (Titanato de Bário)

Os resultados obtidos quando trocamos a matéria prima do elemento piezelétrico por Titanato de Bário, também considerando a princípio uma resistência do sistema de $1000\ \Omega$, são os seguintes para o deslocamento $u(t)$, Figura 24, do bloco de massa M :

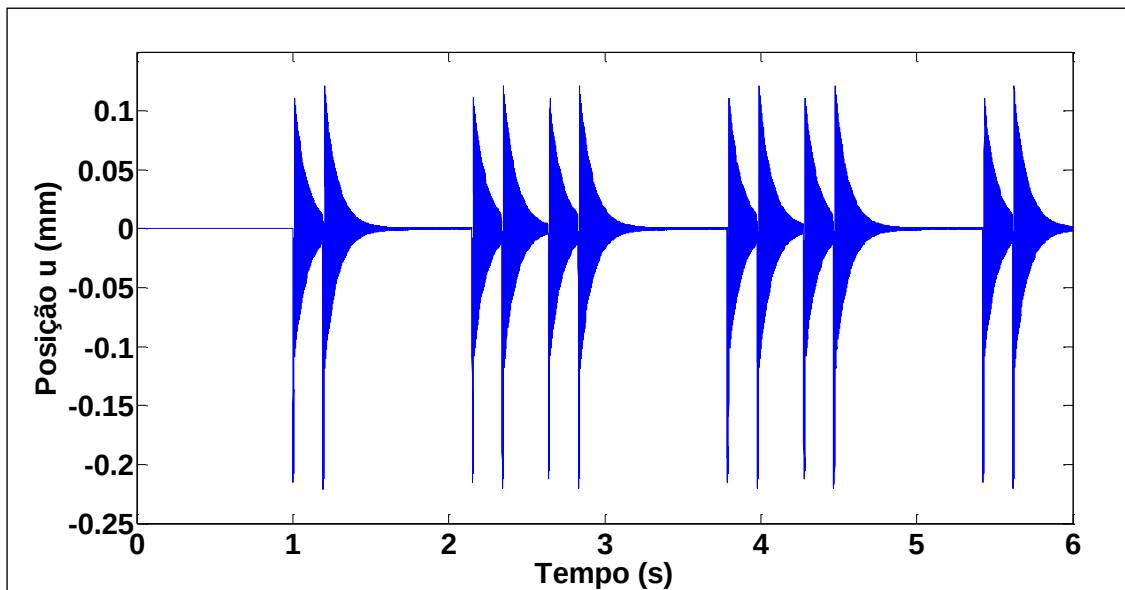


Figura 24: Deslocamento $u(t)$ (mm) x t (s) para o modelo com Titanato de Bário.

E para o bloco de massa M_2 obtivemos a seguinte resposta:

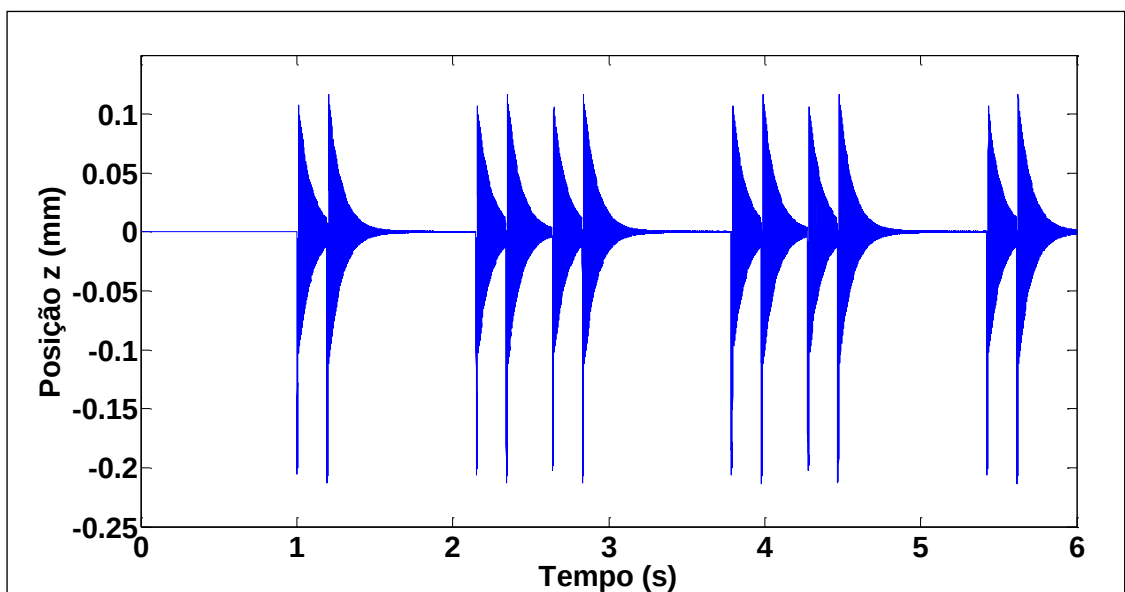


Figura 25: Deslocamento $z(t)$ (mm) x t (s) para o modelo com Titanato de Bário

E assim podemos então calcular o potencial gerado pelo Titanato de Bário em função do tempo, conforme pode ser visto na Figura 26 abaixo:

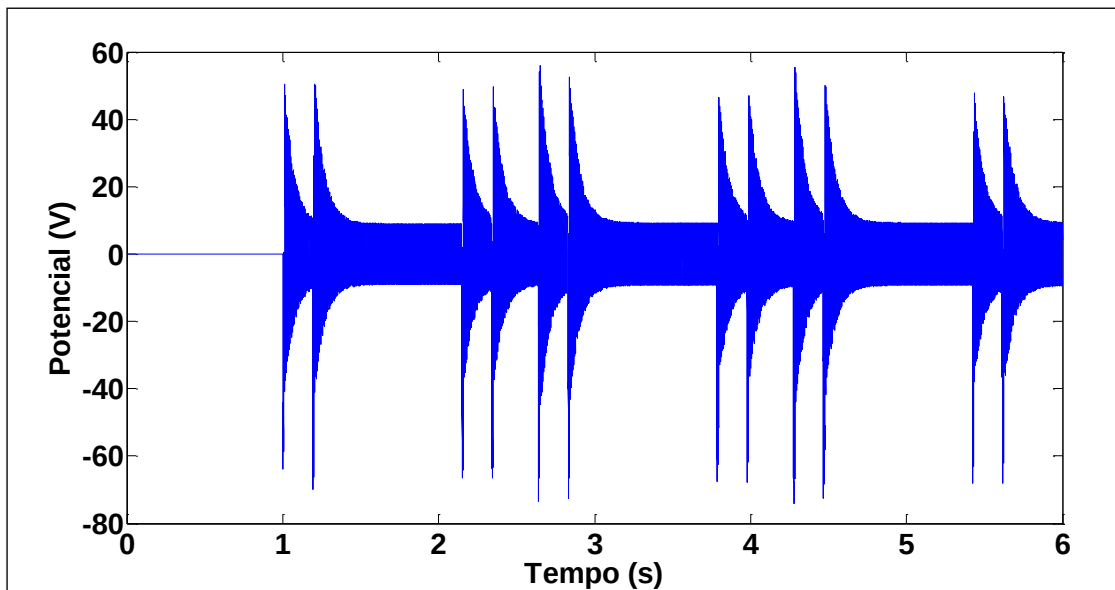


Figura 26: Potencial elétrico gerado pelo elemento piezoeletrico de Titanato de Bário, em Volts x s.

E a potência gerada pelo sistema, com uma resistência de $1000\ \Omega$, está ilustrada no gráfico abaixo:

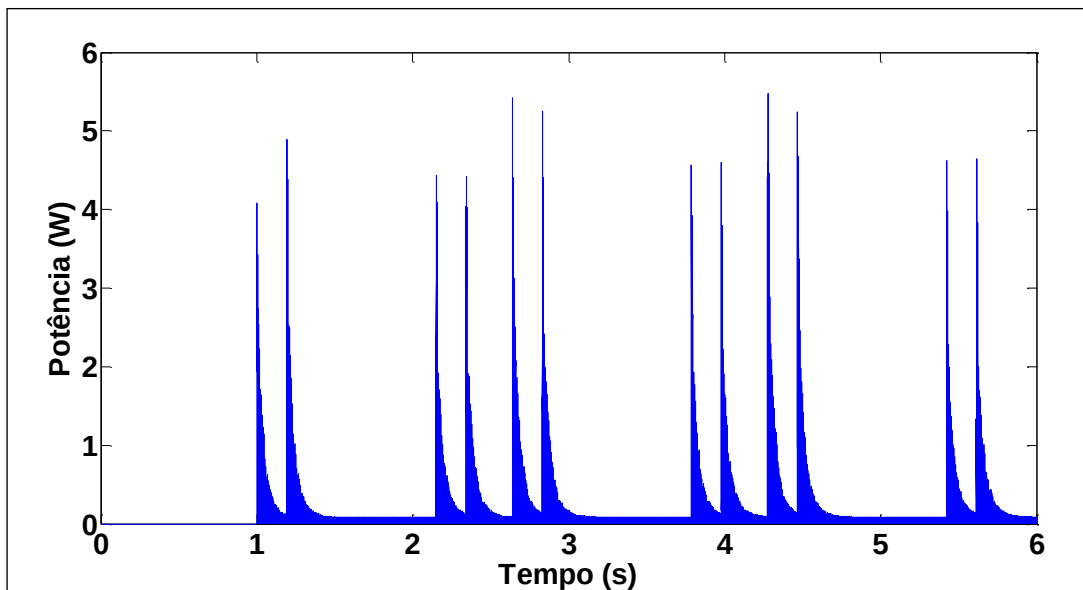


Figura 27: Potência obtida a partir de uma resistência de $1000\ \Omega$ para o Titanato de Bário.

Através destes resultados, podemos mais uma vez calcular a quantidade de energia que pode ser obtida durante a passagem de cada vagão. Assim, encontramos uma quantidade de energia de 221 mJ produzida durante a passagem de um vagão.

Também a fim de comparação, variamos a resistência do sistema para 2000 Ω , e foi obtida uma energia de 130,7 mJ. E quando variamos a resistência para 5000 Ω , foi possível obter uma energia de 57,7 mJ por vagão.

5.4. Energia Total Obtida

Os valores de energia obtidos nas seções anteriores se referiam à utilização de apenas um gerador piezelétrico em um dos lados do dormente, e durante a passagem de apenas um vagão. Este valor pode ser facilmente multiplicado se considerarmos que exista um gerador em cada ponto de apoio do trilho no dormente (ou seja, de ambos os lados do dormente), e que esta montagem dos dormentes se repita ao longo de certo comprimento da ferrovia, e podemos contarmos ainda a passagem de vários vagões em seguida.

Supondo que esta configuração da pista seja aplicada em 20 metros de comprimento da ferrovia, assumindo um espaçamento de 1 metro entre cada dormente, vamos ter um total de 40 geradores distribuídos. Caso consideremos a passagem de um trem com 20 vagões, a energia final que pode ser armazenada será 800 vezes maior do que a calculada nos itens anteriores. Desta forma, os seguintes valores podem ser obtidos de cada aplicação:

Tabela 3: Energia (J) obtida para cada aplicação.

Resistência (Ω)	Energia (J) - PZT-5A	Energia (J) - Barium Titanate
1000	17,76	176,80
2000	8,96	104,56
5000	3,60	46,16

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho de conclusão de curso se dedicou à análise da utilização de materiais piezelétricos para a geração de energia a partir das vibrações geradas em ferrovias durante a passagem de trens de carga.

Foi construído um modelo simplificado para determinar a resposta do elemento piezelétrico à força a que ele está sujeito quando posicionado no interior dos dormentes, sob os trilhos da ferrovia. Assim, obtiveram-se as deformações às quais o elemento piezelétrico está sujeito durante a passagem do trem.

Ao final, determinou-se que é possível obter até 22,2 mJ de energia em um gerador deste tipo na passagem de cada vagão do trem, quando o material piezelétrico utilizado na confecção do gerador é o PZT-5A. Quando trocamos o material piezelétrico por Titanato de Bário, foi possível obter até 221 mJ durante a passagem de cada vagão.

Observou-se que a quantidade de energia gerada no sistema depende diretamente da quantidade de coletores piezelétricos instalados na ferrovia. Assim, uma rede de geradores feitos de Titanato de Bário, instalados ao longo de 40 metros de ferrovia (assumindo-se uma resistência elétrica de 1000 Ω), já seriam suficientes para alimentar um sistema de luzes de alerta durante a passagem de um trem, um dispositivo com um consumo aproximado de 9 Watts.

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se investigar mais a fundo o comportamento da força que de fato atua entre os trilhos e dormentes durante a passagem do trem, dado que neste projeto simplificou-se esta força a um comportamento impulsivo, quando na verdade a força exibe um comportamento bem mais complexo, o que pode até mesmo aumentar a quantidade de energia a ser coletada.

7. Referências Bibliográficas

Camara, Fernando Henrique de Oliveira - Análise de uma Piezoestrutura (PZT) Multifrequência para Geração, Extração e Armazenamento de Energia - Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Dezembro de 2012.

Da Silveira, Evanildo – Eletricidade do aperto – Revista Pesquisa Fapesp 171 maio DE 2010.

Donald J. Leo - Engineering Analysis Of Smart Material Systems – Ed: John Wiley & Sons, Inc. 2007.

Erturk, A. And Inman, D. J. - Issues In Mathematical Modeling Of Piezoelectric Energy Harvesters - Smart Materials And Structures – 2008.

Feenstra, Joel; Granstrom, Jon; Sodano, Henry - Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack - Mechanical Systems and Signal Processing 22 (2008) 721–734.

Kumaran, G.; Menon, Devdas and Nair, K. Krishnan. - Dynamic studies of railtracksleepers in a trackstructure system - Journal of Sound and Vibration 268 (2003) 485–501.

Lagoi, Thiago Galbiati - Utilização de Materiais Piezelétricos (PZTs) para Coleta e Armazenamento de Energia - Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Setembro 2011.

Lefeuvre, E.; Badel, A.; Richard, C.; Petit, L. and Guyomar, D. - A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems - Sensors and Actuators A 126, 405-416. 2006.

Nelson, Carl A.; Platt, Stephen R.; Albrecht, Dave; Kamarajugadda, Vedvyas and Fateh, Mahmood - Power Harvesting for Railroad Track Health Monitoring using Piezoelectric and Inductive Devices - Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, vol 6928, 2008.

Nelson, Carl A.; Platt, Stephen R.; Hansen, Sean E. and Mahmood Fateh - Power Harvesting for Railroad Track Safety Enhancement using Vertical Track Displacement - Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, vol 7288. 2009.

Priya, Shashank and Inman, Daniel J. - Energy Harvesting Technologies – Ed: Springer. 2009.

Sodano, H. A., Inman, D. J. and Park, G. - A review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials, The Shock and Vibration Digest, Vol. 36, 197–205, 2004.

Sodano, H. A., Inman, D. J. and Park, G. - Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices, Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, Vol. 16—January 2005.

Tan, Hwee-Pink; Lee, Pius W. Q.; Seah, Winston K. G. and Eu, Zhi Ang - Impact of Power Control in Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) for Railroad Health Monitoring - International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. 2009

<http://www.americanpiezo.com/> , Acesso em: 05 de Julho de 2013.

<http://www.antf.org.br/index.php> , Acesso em: 13 de Julho de 2013.

<https://www.wti.com/t-wti-white-paper-using-3g-4g-for-out-of-band.aspx> ,
Acesso em: 12 de Julho de 2013.

<http://www.innowattech.co.il/> , Acesso em: 29 de Junho de 2013.

<http://economia.estadao.com.br/noticias/economia-brasil,ferrovia-tem-velocidade-pre-privatizacao,67017,0.htm> , Acesso em 17 de Setembro de 2013.

http://www.railone.com/fileadmin/dateien/03_Broschueren/EN/Schwellenbro_EN_2011_ebook.pdf , Acesso em 01 de Outubro de 2013.