

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e  
Infraestrutura**

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM PAVIMENTOS:  
ESTUDO DE CASO DE UM GERADOR PIEZOELÉTRICO  
INSTALADO EM UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

Lucas Fraporti Heller

Porto Alegre  
2019

LUCAS FRAPORTI HELLER

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM PAVIMENTOS:  
ESTUDO DE CASO DE UM GERADOR PIEZOELÉTRICO  
INSTALADO EM UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

**Prof. Washington Peres Núñez**  
Doutor pela UFRGS, Brasil  
Orientador

**Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito**  
PhD pela University of Nottingham, Inglaterra  
Coorientador

Porto Alegre  
2019

**LUCAS FRAPORTI HELLER**

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM PAVIMENTOS:  
ESTUDO DE CASO DE UM GERADOR PIEZOELÉTRICO  
INSTALADO EM UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Infraestrutura e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 17 de maio de 2019.

**Prof. Washington Peres Núñez**  
Doutor pela UFRGS, Brasil  
Orientador

**Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito**  
PhD pela University of Nottingham, Inglaterra  
Coorientador

**Prof<sup>a</sup>. Angela Borges Masuero**  
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)**  
Doutor pela UFRJ, Brasil

**Prof. Glicério Trichês (UFSC)**  
Doutor pelo ITA, Brasil

**Dr. Luis Alberto Herrmann do Nascimento**  
Doutor pela North Carolina State University, EUA

Dedico este trabalho a meus pais,  
minha irmã e à Ana Carolina por terem me  
acompanhado durante esta etapa.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o apoio, amor, aprendizado e incentivo durante esta etapa, e pelas oportunidades que me proporcionaram.

Agradeço à Ana Carolina, minha namorada pelo amor, companhia, paciência e apoio nos momentos difíceis e alegres desta jornada.

Ao meu orientador Professor Washington Peres Núñez pelo conhecimento compartilhado durante estes 2 anos, com muita paixão pela pesquisa.

Ao meu coorientador Professor Lélío Brito pela amizade, confiança e apoio durante o trabalho e pelas oportunidades proporcionadas desde os tempos de graduação até agora.

Ao Laboratório de Pavimentação pelo suporte na realização desta pesquisa e as pessoas que fazem parte desta equipe. Agradecimentos à Marlova Johnston, à Natália Mensch, ao Mateus e ao Everaldo Ritter pelo auxílio em campo e laboratório.

À Triunfo|Concepa pela oportunidade de realização deste trabalho, pelo fornecimento de materiais e equipamentos necessários e pelas ideias compartilhadas durante o desenvolvimento, e à ANTT pelo suporte à pesquisa realizada através de recursos RDT.

Ao Gabriel da Delmaq pela parceria no desenvolvimento dos protótipos utilizados.

Ao Valner Brusamarello pela parceria no desenvolvimento desta pesquisa. Ao Marcos Coelho pela parceria e dedicação durante o desenvolvimento, instalação e análise dos Geradores e pelo auxílio necessário para o trabalho.

À Petrobrás pelo apoio e parceria através do projeto de Microgeração.

Aos amigos de UFRGS pelos momentos de brincadeiras durante esta etapa.

Ao Celso Romeiro e ao Gabriel Grassioli pelos momentos de apoio, frustração, conquistas e muito trabalho durante este último ano.

Ao Professor Jorge Ceratti, ao Dr. Luis Nascimento e ao Professor Glicério Trichês pela disponibilidade em colaborarem e participar da banca desta dissertação.



## RESUMO

HELLER, L. F. **Microgeração De Energia Em Pavimentos: Estudo de Caso de um Gerador Piezoelétrico Instalado em um Pavimento Rodoviário**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

As vastas áreas pavimentadas recebem diariamente uma grande quantidade de energia térmica e mecânica, que acaba desperdiçada. Essa energia dissipada pode ser reaproveitada, o que permitiria a instalação de equipamentos eletrônicos sem a necessidade da rede primária e, com o aumento desse potencial, uma fonte renovável de energia. Painéis fotovoltaicos, materiais piezoelétricos, geradores termoelétricos, coletores térmicos e geradores eletromagnéticos são tecnologias com possibilidade de aplicação na infraestrutura viária para essa geração. Neste trabalho, além de uma conceituação sobre a microgeração de energia a partir de pavimentos – uma nova tecnologia em crescimento –, é apresentado um estudo sobre o funcionamento de um gerador de energia Piezoelétrico proposto e instalado no quilômetro 77 da rodovia BR-290/RS, no pavimento da praça de pedágio do município de Gravataí, RS. O Gerador Piezoelétrico desenvolvido utilizou vigas em balanço de PZT, funcionando em vibração livre. Os transdutores escolhidos permitiram a geração de energia através da passagem de veículos sobre o sistema instalado na pista de cobrança automática da Praça de Pedágio. A utilização de um sistema de vibração livre visou a durabilidade do sistema, fornecendo baixa energia, porém virtualmente infinita, por evitar a fadiga nos geradores. A estrutura externa do sistema foi desenvolvida para fornecer proteção aos elementos piezoelétricos e eletrônicos. O sistema se manteve funcional durante os 30 dias previstos para o experimento. A ponta livre dos transdutores recebeu diferentes corpos de massa (6,1g e 16g) para aumentar a capacidade de geração. Na primeira configuração de massas de ponta foi obtido uma média diária de 300 mJ para as condições de tráfego da rodovia. A segunda configuração teve uma geração estimada de energia diária de aproximadamente 0,360 Joule para um transdutor, ou 5,76 Joule considerando os dezesseis na mesma eficiência. O sistema demonstrou, adicionalmente, potencial adequado para a utilização na categorização de veículos, com boas relações entre a resposta elétrica gerada e os eixos passantes.

Palavras-chave: Microgeração de Energia; Energy Harvesting; Piezoelétrico; Sensores de tráfego.

## ABSTRACT

HELLER, L. F. **Micro Energy Harvesting from Pavements: Case Study of an In-service Piezoelectric Harvester Built in a road pavement.** 2019. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

Large paved areas receive a large amount of wasted thermal and mechanic energy. The dissipated energy can be harvested, allowing electronic equipment installation away from the power grid and a renewable energy source with the advance of the technology. Photovoltaic panels, piezoelectric materials, thermoelectric generators, thermal collectors and electromagnetic generators are technologies within the realm of application in the road infrastructure for such generation. This work, in addition to detail the concept involved in energy harvesting from pavements – a novel growing technology –, studies the functioning of a piezoelectric energy harvesting generator, proposed and installed in kilometer 77 of the BR-290/RS highway, at the toll plaza's pavement in Gravataí, RS. The piezoelectric generator developed used PZT cantilever beams, working in free vibration. The transducers chosen allowed the generation of energy through the passage of vehicles on the system installed on the fast lane of the toll plaza. The use of a free vibration system aimed at the durability of the system, supplying low but virtually infinity energy, by avoiding fatigue in the sensors. The external structure of the system has been designed to provide protection to the piezoelectric and electronic elements. The system remained functional during the 30 days planned for the experiment. The free tip of the transducers has received different mass bodies (6,1g & 16g) to increase power generation. The first configuration of tip of mass obtained a daily average of 300 mJ for traffic conditions of the highway. The second configuration had an estimated generation of daily energy of approximately 5.76 Joule. The system demonstrated an additional potential for use in the vehicle categorization, with good correlations between generated electrical response and passing axles.

Keywords: Energy Harvesting, Piezoelectric, Traffic Sensors

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....	17
1.2	OBJETIVO GERAL .....	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1	PIEZOELETRICIDADE .....	19
2.1.1	Utilização do efeito piezoelétrico em pavimentos.....	22
2.1.2	Custos da energia piezoelétrica .....	32
2.2	SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PAVIMENTOS.....	34
2.2.1	Painéis Fotovoltaicos .....	34
2.2.2	Coletores Térmicos.....	37
2.2.3	Geradores Termoelétricos .....	40
2.2.4	Geradores Eletromagnéticos .....	43
2.3	RODOVIAS INTELIGENTES.....	44
2.4	ANÁLISE CRÍTICA DOS SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO .....	45
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
3.1	ESCOLHA DOS TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS .....	48
3.2	COLETA DE DADOS .....	51
3.3	LOCAL DE IMPLANTAÇÃO.....	53
3.4	PROPOSIÇÃO DO GERADOR PIEZOELÉTRICO DE ENERGIA .....	54
3.5	UTILIZAÇÃO DE MASSAS DE PONTAS.....	59
3.5.1	Configuração A .....	59
3.5.2	Configuração B.....	60
3.6	CÁLCULO DA ENERGIA COLETADA .....	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
4.1	INSTALAÇÃO EM CAMPO.....	64
4.1.1	Resultados na Configuração A (com massa nas pontes de 6,1g/sensor) .....	66
4.1.2	Resultados na Configuração B (com massas de ponta de 16,7g/sensor) .....	74
4.2	ANÁLISE CRÍTICA DO EXPERIMENTO .....	82
4.3	CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS .....	84

<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>90</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	90
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	91
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE A – ENSAIOS EM LABORATÓRIO .....</b>	<b>98</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do efeito piezoelétrico. (a) Material Piezoelétrico sem carregamento; (b) Material piezoelétrico gerando um diferencial de tensão elétrica em resposta a um esforço de tração; (c) Material Piezoelétrico gerando uma resposta elétrica contrária sob um esforço de compressão. FONTE: Wang et al. (2018).....	20
Figura 2 - Formatos de transdutores piezoelétricos. (a) Bridge; (b) Címbalo; (c) Bridge Multicamadas; (d) Viga. FONTE: Wang et al. (2018). ....	21
Figura 3 - Formatos de transdutores piezoelétricos. (a) Moonie; (b) Macro-Fiber Composite (MFC) ; (c) Multicamadas; (d) RAINBOW. FONTE: Li (2015).....	21
Figura 4 - Exemplo de conversor apresentado. FONTE: Zhao et al. (2014) .....	23
Figura 5 - Protótipo desenvolvido com placas de cobre. FONTE: Roshani et al. (2016) .....	25
Figura 6 - Protótipo de discos de PZT e caixa de proteção para aplicação. FONTE: Roshani et al. (2018) .....	26
Figura 7 - Protótipo de Coletor, com caixa metálica para proteção de múltiplos conversores Bridge. FONTE: Yesner et al. (2016).....	27
Figura 8 - Protótipo em escala reduzido testado. FONTE: Song et al. (2016).....	29
Figura 9 - Exemplo de transdutor com Filme de PVDF. FONTE: Jung et al. (2017).....	29
Figura 10 - Protótipo de Coleta de Energia (PEH) testado em trecho experimental. FONTE: Xiong e Wang (2016).....	30
Figura 11 - Gerador utilizado para os testes. FONTE: Yang et al. (2017) .....	31
Figura 12 - Gerador Piezoelétrico com vigas bi-apoiadas FONTE: Cho et al. (2019).....	32
Figura 13 - Ciclovia Solar instalada em Krominie. FONTE: CleanTechnica.....	35
Figura 14 - Exemplo dos painéis <i>WattWay</i> aplicados na França. FONTE: Website da empresa COLAS.....	35
Figura 15 - Reparos na Ciclovia Solar em Krominie.....	37
Figura 16 - Sistema coletor para utilização para climatização. FONTE: Sullivan et al. (2007). .....	38
Figura 17 - Sistema coletor térmico com ar proposto. FONTE: Garcia e Partl (2014).....	39
Figura 18 - Sistema de geração Termoelétrico montado. FONTE: Datta et al. (2017). ....	41
Figura 19 - Sistema Termoelétrico Otimizado. FONTE: Tahami et al. (2019). ....	42
Figura 20 - Sistema Termoelétrico com função de redução de temperatura. FONTE: Jiang et al. (2018).....	42

Figura 21 - Exemplo do gerador eletromagnético para veículos. FONTE: Duarte et al. (2015)	43
.....	
Figura 22 - Transdutor Piezoelétrico PPA-1014, escolhido para o experimento.....	49
Figura 23 - Esquemático do circuito de retificação.....	50
Figura 24 - Representação da retificação dos sinais gerados.....	50
Figura 25 - Esquemático de armazenamento.....	51
Figura 26 - <i>FieldLogger</i> , da fabricante Novus, utilizado para as coletas de dados.....	52
Figura 27 - Local de instalação do Gerador Piezoelétrico.....	53
Figura 28 - Avaliação computacional da deformação do conjunto.....	54
Figura 29 – Representação gráfica da caixa aberta com os transdutores posicionados.....	55
Figura 30 - Prensa-cabos posicionado no sistema garantindo a estanqueidade da caixa.....	56
Figura 31 – Detalhe da drenagem e ancoragem das caixas.....	56
Figura 32 - Caixa finalizada antes da instalação.....	57
Figura 33 - Instalação dos corpos metálicos na Rodovia. (a) Preparação na via para instalação;	
(b) Colocação das caixas e eletrodutos nos cortes; (c) Nivelamento das caixas com o pavimento;	
(d) Preenchimento com graute acelerado (e) Colocação dos transdutores no local; (f)	
Impermeabilização das caixas com adesivo; (g) Caixas Finalizadas na via; (g) Fieldlogger	
configurado para recepção dos dados. ....	58
Figura 34 - Corpos de massa na configuração A.....	60
Figura 35 - Corpos de Massa da configuração B.....	61
Figura 39 - (a) Corpos metálicos instalados na rodovia; (b) Transdutores Piezoelétricos sem	
corpos de massa; (c) teste dos sensores ao toque para verificação do cabeamento; (d) passagem	
de veículo sobre o sistema.....	64
Figura 40 - Distribuição das caixas na pista.....	65
Figura 41 - Detalhamento das distâncias do sistema na pista.....	65
Figura 42 - Relação de veículos iniciais da rodovia – registros no dia 04/06/2018.....	67
Figura 43 - Geração horária da Configuração A (Caixas 1 a 4 – massa de ponta 6,1g); dia 04/06	
a 08/06/2018).....	68
Figura 44 - Somatório da Geração Horária entre caixas e comparativo com os eixos comerciais.	
.....	69
Figura 45 - Junta de material Elastomérico em contato com a parede dos suportes dos	
Transdutores.....	71
Figura 46 - Passagem de um veículo de 7 eixos sobre o sistema (data: 04/06/2018).....	72
Figura 47 - Diferença dos Picos em cada caixa.....	72

Figura 48 - Pico resultante na potência máxima da configuração A. ....	74
Figura 49 - Comparativo dos elementos da caixa 1 (P1 e P2 conectados a 22 $\mu$ F e P3 conectado a 120 k $\Omega$ e P4 conectado ao <i>FieldLogger</i> – canal 1,1M $\Omega$ ) – dia 17/06/2018.....	75
Figura 50 - Comparativo do elemento piezoelétrico 3 da caixa 1 com as demais caixas.....	75
Figura 51 - Comparativo dos elementos piezoelétricos 1 e 2, em condições semelhantes e diferentes corpos de massa.....	76
Figura 52 - Geração horária da Configuração B (Caixa 1 – massa de ponta de 16,7g); dia 16/06 a 30/06/2018.....	78
Figura 53 – Geração Horária do total do teste da Caixa 1 comparada aos Eixos Pesados .....	79
Figura 54 - Pico do transdutor na configuração B.....	81
Figura 55 - Potência Máxima Relatada Por Transdutor Piezoelétrico.....	82
Figura 58 - Passagem de diversos veículos sobre o Transdutor com a massa de 16,7 g nas pontas .....	86
Figura 59 - Veículo de cinco eixos pertencente a categoria 7.....	87
Figura 60 - Passagem de um veículo com Eixo Simples e 3 Eixos Tandem Duplo (data: 05/06/2018) .....	87
Figura 61 - Passagem de um veículo com Eixo Simples, 1 Eixo Tandem Duplo e 2 Eixos Tandem Triplo (data 04/06/2018).....	88
Figura 62 - Diferentes magnitudes de passagens de veículos de categoria 11 (7 eixos) Data: 04/06/2018.....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Significado dos estágios de TRL - FONTE: Adaptado de Mankins (1995).....	45
Tabela 2 - TRL das tecnologias de MicroGeração em pavimentos. FONTE: Adaptado de Wang et al. (2018).....	46
Tabela 3 - Dados fornecidos pelo fabricante dos Transdutores (data base: abril de 2018) .....	49
Tabela 4 - Datas das modificações do sistema .....	59
Tabela 5 - Relação dos Veículos Iniciais no sistema.....	66
Tabela 6 - Correlação de Pearson entre as caixas e eixos. ....	70
Tabela 7 - Categorias de Pedágio utilizadas pela Concepa. FONTE: ANTT .....	85



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A: Amperes

ANTT: Agência Nacional de Transporte Terrestres

APA: *Asphalt Pavement Analyzer*

C: Capacitância

C°: Grau Celsius

cm: Centímetros

E: Energia Elétrica

F: Faraday

g: gramas

kWh: quilowatt-hora

i: Corrente Elétrica

J: Joule

m: Metros

mm: Milímetros

P: Potência Elétrica

PVDF: Fluoreto de Polivinidileno

PZT: Titanato Zirconato de Chumbo

R: Resistência Elétrica

s: Segundos

t: Tempo

TRL: *Technology Readiness Level*

VDM: Volume Diário Médio

U: Tensão Elétrica

V: Volt

W: Watt

$\Omega$ : Ohm



## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de aparelhos eletrônicos tem se tornado cada vez mais presente na vida urbana. Esses aparelhos afetam diversos pontos estratégicos da sociedade como comunicação, segurança e transporte e tendem a ampliar ainda mais a dependência dos usuários com o surgimento de novas tecnologias a exemplo dos smartphones, tecnologias vestíveis, carros elétricos e autônomos, domótica. A evolução tecnológica nas rodovias tende a acompanhar este cenário, tornando-as cada vez mais inteligentes, no que hoje é conhecido como “*smartroads*”.

No entanto, se a utilização de aparelhos eletrônicos é cada vez mais habitual e a sociedade mais interconectada, o acesso instantâneo à energia elétrica se torna uma necessidade. A utilização de sistemas de acúmulo de energia é a principal alternativa, porém são insuficientes para jornadas longas ou aparelhos com alto consumo. Essa insuficiência gera uma limitação, que pode ser contornada com sistemas mais eficientes, consumindo menos energia, ou com a possibilidade de coletar a energia do ambiente, possibilitando que as baterias possam ser carregadas a qualquer momento, ou virtualmente as dispensando.

Esse último conceito de aproveitar a energia disponível no ambiente circundante, conhecido como colheita de energia, numa tradução direta da expressão mais conhecida pelo inglês *Energy Harvesting*, tem sido motivo de atenção de pesquisadores e cientistas. A possibilidade de converter a energia do ambiente para uso humano é antiga e conta com grandes aplicações comerciais, como moinhos, hidrelétricas, painéis fotovoltaicos e geradores eólicos.

No setor de transporte, essa geração de energia pode ser aplicada em pavimentos, onde existe uma grande quantidade de energia desperdiçada, como a energia mecânica dos veículos gerada pelos carros e ventos e a energia térmica e a irradiação solar incidente. A energia convertida poderia então abastecer sensores, balanças, câmeras e iluminação ao longo da rodovia, sem a necessidade de rede de fornecimento, com possibilidades futuras de carregar veículos elétricos ao longo das rodovias.

Os principais métodos de geração de energia em pavimentos considerados são painéis fotovoltaicos, coletores térmicos, transdutores piezoelétricos, geradores eletromagnéticos e conversores termoelétricos. Entre esses, o presente trabalho focou na utilização de transdutores piezoelétricos, por sua versatilidade de uso, potencial de geração e facilidade de aplicação.

Esse trabalho se propôs a investigar o funcionamento em campo de um sistema piezoelétrico de microgeração de energia, através de uma aplicação na rodovia BR-290, no município de Gravataí, analisando os potenciais da tecnologia para aplicações futuras, além de

elencar as dificuldades e desafios encontrados que necessitam ser superados para a utilização mais eficiente do sistema.

### 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Os métodos citados para *Energy Harvesting* em pavimentos possuem poucas aplicações práticas documentadas; destas, várias estão em estágios iniciais de tecnologia, conforme Wang et al. (2018). Os autores atribuíram os “Níveis de Desenvolvimento Tecnológico” (TRL – *Technology Research Level*, em inglês) dos sistemas piezoelétricos e coletores solares em 4 dentro de uma escala de 1 a 9. Esse valor indica que são tecnologias que ainda necessitam estudos complementares para melhoria da eficiência em aplicações comerciais.

A energia fotovoltaica é apresentada pelos autores com um TRL de 9 pelo uso de painéis em grandes usinas, contudo essa energia possui diversos problemas para serem instaladas em pavimentos, como a fragilidade, segurança dos veículos e baixa capacidade de geração dos painéis posicionados sem o grau de elevação adequado.

As tecnologias de coleta de energia necessitam mais estudos para a sua utilização e viabilidade econômica, como relatam Ahmad et al. (2019), focando em estudos em experimentos em rodovias reais, para despertar o interesse de empresas privadas em investir nas tecnologias que se encontram em nível exploratório.

Dawson et al. (2014) relatam que para a aplicação com sucesso de sistemas de coleta de energia, muitas vezes sistemas baratos com menor capacidade de geração podem ser soluções mais adequadas que sistemas caros com alta geração. Os transdutores piezoelétricos são um bom exemplo de sistema mais barato, embora com menor capacidade de geração. Os autores ainda ressaltam que o comportamento, durabilidade e manutenção dos sistemas em pavimentos a longo prazo ainda não são conhecidos, necessitando de estudos para melhor entender esses sistemas.

Em um primeiro momento, a microgeração de energia poderia abastecer sensores, sinalização ou iluminação em rodovias, sem a necessidade da utilização da rede de abastecimento primária. O avanço das tecnologias permitiria que rodovias e avenidas movimentadas se transformassem em fontes limpas de energia elétrica e compensando os impactos negativos causados pela área pavimentada.

Um potencial elevado de microgeração contribuiria para demais tecnologias em desenvolvimento. A disponibilidade energética ao longo de toda a rodovia permitiria uma maior rede de sensores e câmeras, gerando maior controle do tráfego e das condições do pavimento.

A maior quantidade de informações disponíveis para o gerenciamento da estrada forneceria maior segurança e conforto aos motoristas, além de projetos e planos de operação mais adequados.

Outra tecnologia em desenvolvimento é a possibilidade de carregar carros e ônibus elétricos em faixas especiais. Esse sistema poderia ser beneficiado com uma alta capacidade de coleta de energia, utilizando a energia convertida para o carregamento dos veículos elétricos passantes.

As possibilidades da coleta de energia em pavimentos são diversas, gerando ganhos ecológicos e tecnológicos na área de transporte rodoviário. Entretanto, conforme citado, a tecnologia possui poucas aplicações práticas e um grande espaço para crescimento, justificando novos estudos na área.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é avançar no conhecimento de microgeração de energia em pavimentos, através da bibliografia existente e de um estudo de caso de um gerador piezoelétrico em uma rodovia em serviço.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- a) Reunir informações sobre a prática corrente de sistemas de geração de energia empregadas na infraestrutura rodoviária e seus mecanismos de funcionamento;
- b) Propor um Coletor de Energia que possa ser aplicado em uma rodovia, resistindo às cargas e às condições ambientais;
- c) Implantar uma prova de conceito em uma rodovia em serviço, avaliando a durabilidade do gerador, o potencial de geração e a capacidade de armazenamento;
- d) Utilizar os dados da aplicação em campo para comparar, junto à bibliografia, a geração dos transdutores em vibração livre com os outros tipos de sistemas piezoelétricos;
- e) Avaliar a possibilidade de utilização do Gerador Piezoelétrico para categorizar os veículos passantes na rodovia através das respostas elétricas obtidas pelo sistema.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre os principais assuntos que fundamentam a pesquisa. Os mais fundamentais sistemas geradores de energia que vem sendo estudados para aplicações nas rodovias mundialmente podem ser divididos em: piezoelétricos (Ziang et al. 2010; Roshani et al. 2016; Yesner et al. 2016), fotovoltaicos (Dezfooli et al. 2017; Colas), coletores térmicos (Chiarelli et al. 2015, 2017; Bobes-Jesus et al. 2013), termoelétricos (Tahami et al. 2019; Jiang et al. 2018) e eletromagnéticos (Duarte et al. 2013, 2015).

Esta pesquisa terá foco no uso de sensores piezoelétricos, em função de seu caráter inovador e com potencial de assumir funções adicionais ao de geração. Assim, a primeira parte dessa revisão apresenta os conceitos básicos sobre a piezoeletricidade, os principais materiais piezoelétricos utilizados e diferentes modos de utilização desses para a coleta de energia de modo geral.

Após a apresentação dos fundamentos da piezoeletricidade, discorre-se sobre diferentes abordagens relativas à utilização dessa característica para a microgeração de energia em pavimentos. Os parâmetros de influência, diferentes protótipos, custos e resultados prévios são discutidos.

A seguir, no item 2.2, estão discutidos os outros elementos de coleta de energia focados na aplicação na infraestrutura viária. No item 2.3, o conceito de rodovias inteligentes é apresentado, demonstrando rodovias existentes e propostas que se enquadram neste conceito.

No final do capítulo, uma análise crítica sobre a revisão bibliográfica é apresentada, ressaltando as características dos sistemas, desafios e possíveis aplicações para o futuro.

### 2.1 PIEZOELETRICIDADE

A piezoeletricidade é a propriedade presente em certos tipos de materiais, de gerar uma diferença de potencial elétrico quando uma tensão mecânica é aplicada sobre eles, conforme Figura 1. De forma inversa, ao submeter os materiais piezoelétricos a um campo elétrico, esses sofrerão uma deformação mecânica.

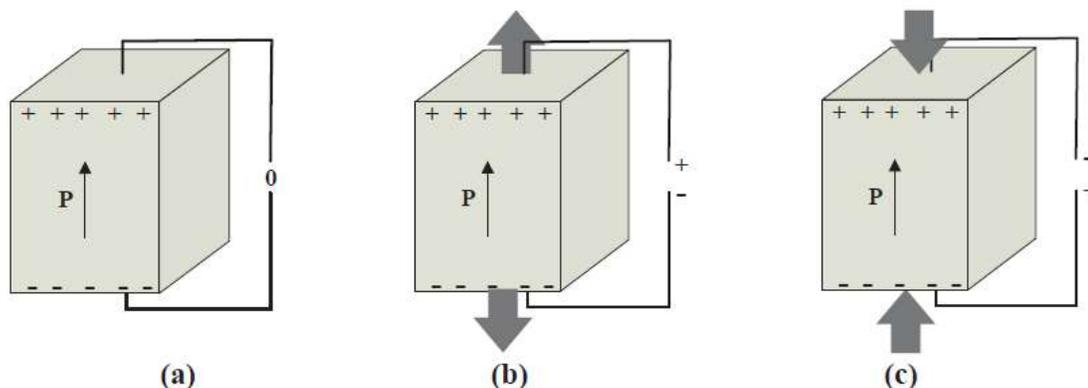


Figura 1 - Representação do efeito piezoelétrico. (a) Material Piezoelétrico sem carregamento; (b) Material piezoelétrico gerando um diferencial de tensão elétrica em resposta a um esforço de tração; (c) Material Piezoelétrico gerando uma resposta elétrica contrária sob um esforço de compressão. FONTE: Wang et al. (2018)

A primeira aplicação prática do efeito piezoelétrico foi o sonar desenvolvido por Paul Langevin em 1917, durante a Primeira Guerra Mundial. O sistema consistia em placas de metais com cristais de quartzo, formando um transdutor capaz de gerar pulsos de alta frequência.

Atualmente, dentre as aplicações práticas de materiais piezoelétricos incluem a microgeração de energia. No setor de transporte rodoviário, a coleta de energia pode ser realizada através de suspensões de veículos adaptadas contendo transdutores piezoelétricos (Li et al. 2013; Zuo e Zhang 2013) ou então aplicando os conversores diretamente no pavimento, transformando a energia mecânica, proveniente das vibrações e deformações causadas pela passagem dos veículos, em energia elétrica.

O sistema piezoelétrico, portanto, gera energia elétrica de maneira variada em função da passagem de veículos e magnitude das cargas da rodovia (Xiong et al. 2014).

Diferentes materiais com características piezoelétricas podem ser usados para a coleta de energia. Wang et al. (2018) listam diversas categorias desses materiais, sendo eles cristais, cerâmicas, semicondutores piezoelétricos, polímeros, compostos piezoelétricos e cerâmicas de vidro.

Atualmente, o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) é uma cerâmica piezoelétrica e um dos principais materiais utilizados pelos autores na busca de um coletor de energia em pavimentos. As piezocerâmicas são materiais com alta conversão elétrica. Contudo, são materiais extremamente rígidos (Xiong et al. 2014; Wang et al. 2018). Essa rigidez torna o material frágil e propenso à fadiga.

Enquanto a cerâmica pode ser utilizada como um elemento monolítico, inclusive, tendo um maior rendimento, conforme Sodano et al. (2005), o PZT pode ser utilizado em conjunto com outros materiais, formando diferentes conversores, como Vigas, Címbalos, Bridges, Moonie, THUNDER, RAINBOW, MFC, demonstrados na Figura 2 e Figura 3.

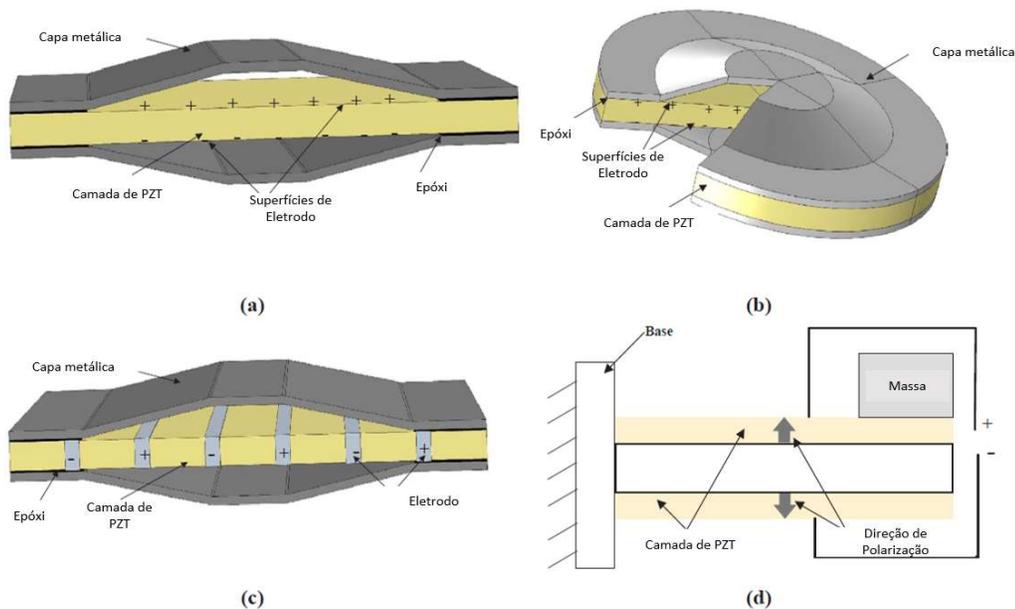


Figura 2 - Formatos de transdutores piezoelétricos. (a) Bridge; (b) Címbalo; (c) Bridge Multicamadas; (d) Viga. FONTE: Wang et al. (2018).

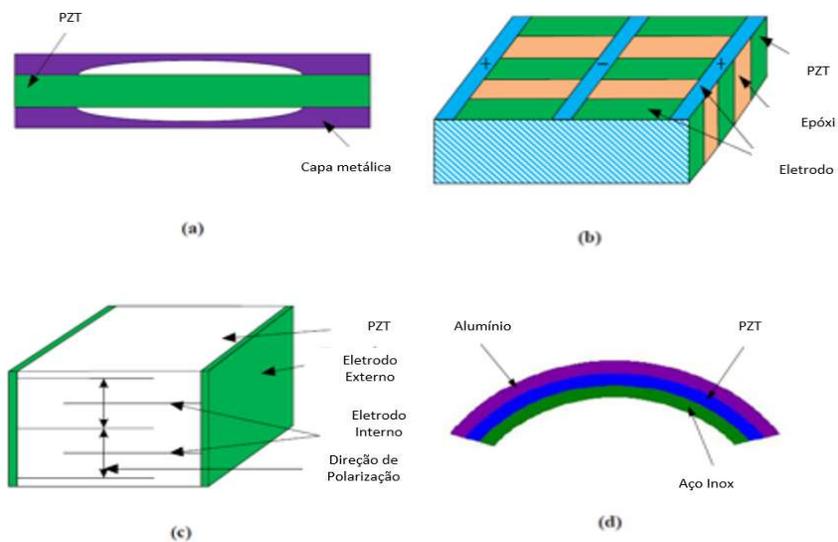


Figura 3 - Formatos de transdutores piezoelétricos. (a) Moonie; (b) Macro-Fiber Composite (MFC) Multicamadas; (d) RAINBOW. FONTE: Li (2015).

Outra possibilidade de material piezoelétrico são os polímeros como o fluoreto de polivinidileno (PVDF). O PVDF foi apresentado por Lee et al. (2005) e possui como vantagem uma maior flexibilidade e maior resistência a cargas e níveis de deformação. Comparado ao PZT, o PVDF possui uma vida de fadiga maior, por ser um material menos rígido.

### 2.1.1 Utilização do efeito piezoelétrico em pavimentos

A possibilidade de uso do efeito piezoelétrico em pavimentos começou a receber grande atenção nos últimos anos. Zhao et al. (2010) estudou a possibilidade da aplicação do modelo címbalo inseridos na camada asfáltica permitindo uma geração de energia.

Nesse estudo, os autores utilizaram análises de elementos finitos para a avaliação do desempenho desses transdutores, além de avaliar as dimensões importantes para a criação do címbalo.

O formato final dos autores foi um disco de 32mm de diâmetro, com 22 mm de cavidade na base e 10 mm de cavidade no topo, uma capa metálica de 0,3mm, 2 mm de altura da cavidade e 2 mm de disco de PZT interno. Esse disco teria a possibilidade de gerar até 97,33V e 0,06J. A potência máxima teórica foi de 1,2mW com uma frequência de carga de 20 Hz.

Zhao et al. (2012) realizaram estudos teóricos para comparar as propostas existentes de transdutores piezoelétricos, pensando em uma futura aplicação em rodovias. Os formatos estudados foram o címbalo, Bridge, MFC, Moonie, multilayer e THUNDER, que já eram utilizados para microgeração de energia.

Os modelos címbalos e Bridge possuem uma alta durabilidade e uma rigidez e eficiências intermediárias comparadas aos outros sensores, permitindo uma melhor compatibilidade com o concreto asfáltico e uma vida útil prolongada. Os modelos THUNDER e MFC possuem uma boa eficiência. Entretanto a baixa rigidez faz com que não seja aconselhável sua utilização. O multilayer também possui uma boa eficiência, porém o seu módulo elevado o torna incompatível com os pavimentos. O Moonie foi descartado, visto que não foi considerado um bom dispositivo para instalação nos pavimentos.

Zhao et al. (2014) realizaram uma proposta de um sistema de geração piezoelétrico, representado na Figura 4, através da utilização de pilhas de PZT, entre placas metálicas. Os autores estimaram que esse protótipo poderia ter uma geração de até 150kW em uma hora, com um volume de 600 caminhões durante esse período. O potencial teórico do protótipo seria de 50kW/h com esses valores, segundo os autores.

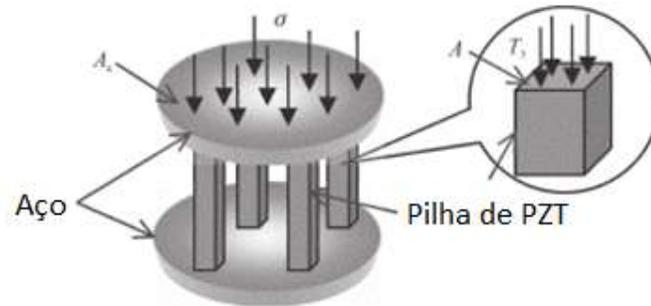


Figura 4 - Exemplo de conversor apresentado. FONTE: Zhao et al. (2014)

A utilização de modelos Bridge também foi investigada por Yao et al. (2011). Em experimentos laboratoriais, testando dois modelos de conversores, o modelo de arco apresentou melhor desempenho elétrico, porém uma menor resistência às cargas. Esse resultado foi corroborado por Li (2015) que indicou que a utilização de um conversor Bridge em arco pode resultar em problemas para o pavimento, por não resistir as altas cargas aplicadas na rodovia.

Chua et al. (2014) estudaram parâmetros para a utilização dos conversores cimbais. Os autores concluíram que seria possível atingir até 0,46 mW de potência elétrica, com a aplicação de uma força de 50 N e uma resistência de carga de 3 MΩ, com um címalo de 32 mm de diâmetro e uma capa de 0,3 mm de aço. Os autores indicam que ao serem embutidos no pavimento, a carga precisa ser estimada com base na pressão de contato do pneu e a localização dos transdutores no pavimento.

Nesse estudo, os autores observaram que o material utilizado para a capa do címalo altera a resposta elétrica do transdutor. Uma capa de aço consegue melhores resultados que uma capa de alumínio. A espessura da capa também possui importância. O mesmo címalo citado anteriormente, possui uma menor resposta elétrica quando utilizada uma capa de aço de 0,4 mm ao invés de 0,3 mm, contudo, a capa mais espessa permite maiores aplicações de cargas, chegando a uma potência superior de 0,90 mW quando a carga aplicada é de 70 N.

Xiang et al. (2013) procuraram identificar os parâmetros do pavimento que afetariam a geração de transdutores piezoelétricos inseridos no mesmo. Esse estudo envolveu análises matemáticas considerando o pavimento como sendo uma viga Bernoulli-Euler infinita sobre uma fundação de tipo Winkler.

Os resultados demonstraram que com o aumento do módulo Winkler da fundação, a geração tende a zero. A carga elétrica resistiva utilizada também interfere na tensão de saída dos materiais piezoelétricos. Por último foi demonstrado que a velocidade dos veículos passando sobre os sensores possui uma grande interferência na possibilidade de geração. A

geração cresce conforme o aumento da velocidade, até uma chamada velocidade crítica. Após passar desse patamar, a geração volta a cair.

A velocidade crítica encontrada por Xiang et al. (2013) foi em torno de 170m/s (612 km/h), valor não realista para as rodovias. O *damping*, ou amortecimento do impacto, abaixo da velocidade crítica possui um efeito quase nulo na tensão elétrica gerada, apenas possuindo interferência próximo a velocidade crítica.

Estimando a energia que poderia ser gerada a partir dos sensores com veículos passando em uma rodovia a 30m/s (108 km/h), a energia atingida seria de, aproximadamente, 8,14 mJ. O módulo de acoplamento que atingiu essa energia foi com a força perpendicular ao sentido de polarização. O modo onde a força é paralela a polarização, possuiu uma geração relativamente baixa conforme os autores, por isso foi desconsiderada.

Em estudo similar, Zhang et al. (2015) consideraram o pavimento sendo uma placa sobre uma fundação Winkler, para melhor demonstrar os resultados para subleitos moles, que as equações de Xiang et al. (2013) não possuíam.

Essa nova abordagem ainda considerou a distribuição de carga como um parâmetro, realizando os estudos para uma carga única ou quatro, representando o veículo. Essa análise demonstrou que existe uma interação das quatro cargas, afetando a geração. Desse modo, a geração de quatro rodas não pode ser considerada como sendo quatro vezes a geração de uma roda simples, variando conforme a velocidade, a condição da fundação e o posicionamento dos sensores em relação às cargas.

Chen et al. (2016) criaram um mecanismo de testes na tentativa de estabelecer um método para avaliação dos parâmetros de influência da geração de energia elétrica através de conversores piezoelétricos. O aparelho desenvolvido era uma réplica em escala reduzida do pavimento com a aplicação de carga rodante. Os autores concluíram que é possível maximizar a geração com a sintonia da geometria e do tamanho dos transdutores piezoelétricos, através desse teste em função das características da rodovia, como a velocidade, frequência e dimensões dos veículos.

Roshani et al. (2016) realizaram ensaios laboratoriais para avaliar a viabilidade da utilização de um sistema de geração piezoelétrico em rodovias. Um protótipo foi criado para a utilização nos ensaios, consistindo em diversos discos monolíticos piezoelétricos, envoltos em capas de poliestireno e cobre. A proteção do sistema é de vital importância para aplicação em rodovias, protegendo os materiais piezoelétricos. O protótipo foi testado com 4, 8 e 16 discos e é demonstrado na Figura 5.

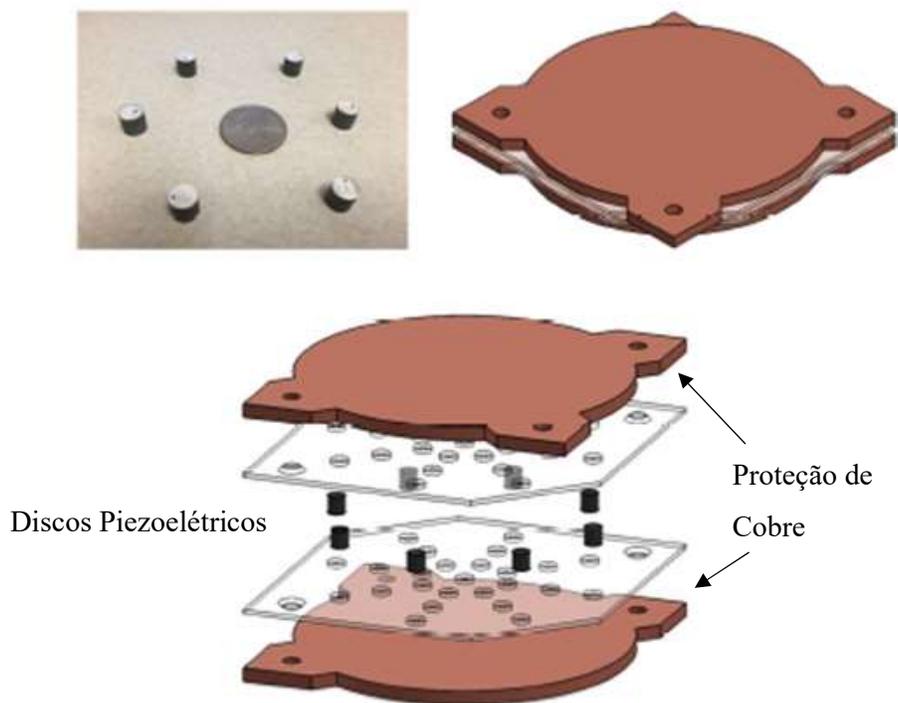


Figura 5 - Protótipo desenvolvido com placas de cobre. FONTE: Roshani et al. (2016)

Ensaio de compressão uniaxial foram realizados com uma *Universal Testing Machine* (UTM) por Roshani et al. (2016), onde a temperatura, frequência e carga foram analisadas. Os testes demonstraram que a presença de 4 discos gerou uma maior tensão elétrica que os protótipos com 8 e 16 discos apresentaram. Essa diferença de geração acontece porque ao adicionar discos o carregamento é dividido entre eles. O aumento da quantidade de discos não compensa a diminuição da carga que cada um deles recebe.

A temperatura teve uma interferência pequena na geração final. Uma pequena diminuição da tensão gerada é esperada com um acréscimo de temperatura, devido ao comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. A geração, portanto, é amenizada porque o material está mais sujeito a deformações, amenizando a tensão recebida pelos discos piezoelétricos, entretanto essa diferença é considerada baixa pelos autores. Os autores concluem que a temperatura ambiente não é um elemento relevante, por ter uma baixa alteração.

Roshani et al. (2016) ainda analisaram a frequência da carga e demonstraram que o aumento da frequência causa um aumento da tensão gerada. Outro ponto ressaltado pelos autores é que a resistência possui interferência na capacidade de geração. Os autores acreditam

que é possível atingir até  $1 \times 10^{-6}$  Wh por eixo de um veículo de passageiros e até  $4.95 \times 10^{-5}$  Wh por eixo comercial.

Outros dois protótipos foram testados na UTM por Roshani et al. (2018). O primeiro protótipo estudado era similar ao do estudo anterior, utilizando 8 discos piezoelétricos. O segundo protótipo, demonstrado na Figura 6, era composto por 11 cilindros de PZT-4, uma variação comercial para aplicações de alta potência, com 50 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. A pilha de cilindros foi colocada no interior de uma caixa metálica para os testes. Além de passar pelos testes de compressão uniaxial, a segunda estrutura passou por testes com uma carga aplicada se movendo horizontalmente sobre a superfície, através de uma *Asphalt Pavement Analyzer* (APA), simulando a passagem de um veículo.



Figura 6 - Protótipo de discos de PZT e caixa de proteção para aplicação. FONTE: Roshani et al. (2018)

Os testes no segundo protótipo com o APA consistiram de 43200 aplicações de carga em um período de 12 horas. Ao final de cada hora de teste, a potência era medida. A estrutura manteve uma geração constante durante todo ensaio.

Os autores concluem que o sistema pode ser utilizado para abastecer pequenas aplicações, ou iluminação em zonas rurais. Além disso, os autores fazem uma ressalva que é necessário cuidado ao colocar uma maior quantidade de material piezoelétrico em um sistema de geração, pois a redistribuição da tensão pode diminuir o potencial elétrico.

Moure et al. (2016) estudaram a utilização de geradores piezoelétricos usando diferentes modelos de címbalos com diâmetro de 29 mm, totalizando  $660 \text{ mm}^2$  de área. As espessuras escolhidas após os testes foram de 0,30 mm para a espessura da capa metálica, 1 mm de altura da cavidade. Os transdutores foram posicionados em uma pista teste. Os sensores foram posicionados em uma camada intermediária de masticado asfáltico composto de betume e sílica. As camadas de suporte e cobertura foram feitas de concreto asfáltico, utilizando 4 cm para a camada inferior e 2 cm para a superior.

Os autores chegaram a um valor máximo de geração de  $16 \mu\text{W}$  por címbalo instalado. Esse potencial de geração significaria uma densidade energética de  $45,29 \text{ MWh/m}^2$  considerando a área de  $660 \text{ mm}^2$  do címbalo apenas. No pavimento, a instalação poderia atingir uma densidade de  $5,18 \text{ kWh/m}^2$  em uma área de 100 metros com 30 mil conversores instalados. O tráfego considerado para esse cálculo foi de diferentes regiões metropolitanas de Madrid.

Em outro estudo baseado em conversores címbalos, Yesner et al. (2016) desenvolveram um novo modelo Bridge. De forma semelhante a outros protótipos, os transdutores foram inseridos dentro de uma caixa metálica, contendo um total de 64 conversores, demonstrada na Figura 7. Essa caixa inserida no pavimento, fornece proteção ao material piezoelétrico e os circuitos elétricos.

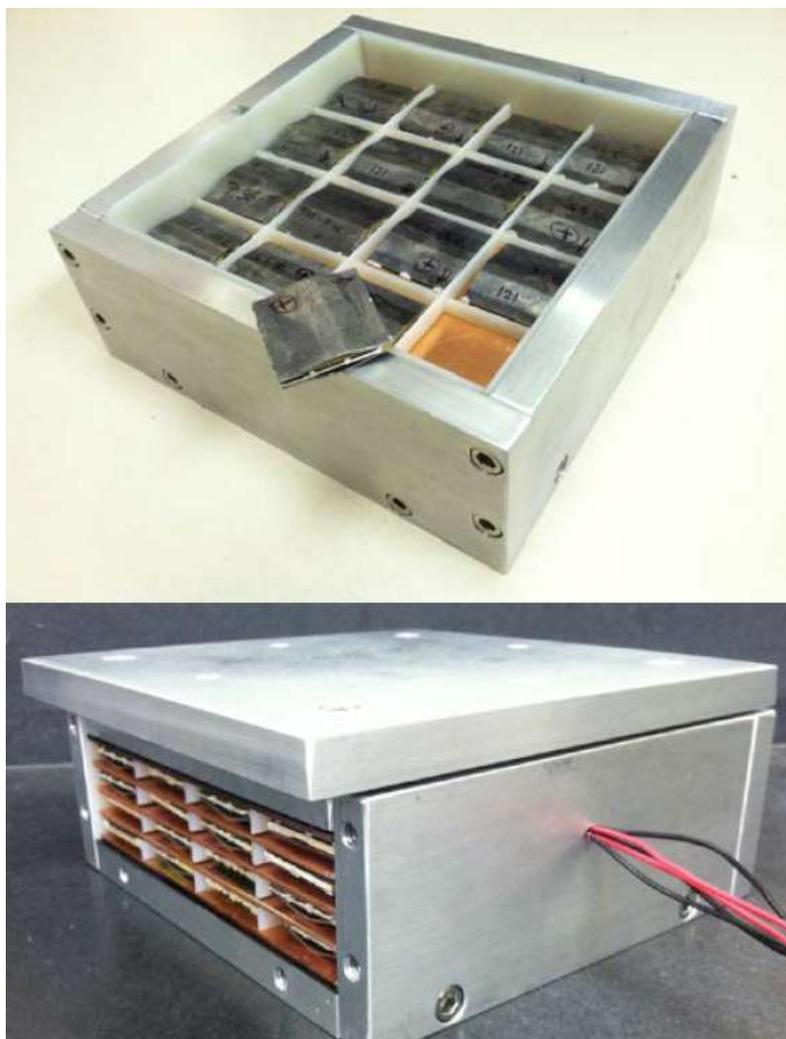


Figura 7 - Protótipo de Coletor, com caixa metálica para proteção de múltiplos conversores Bridge. FONTE: Yesner et al. (2016)

Em testes laboratoriais a possibilidade de geração desse protótipo foi de 2,1mW para uma carga de 500 libras e uma frequência de 5Hz, utilizando uma carga resistiva de 400 k $\Omega$ . Outro aspecto ressaltado pelos autores foi que uma aplicação de carga simples gera uma saída de energia linear. Esse tipo de comportamento possibilitaria a utilização de materiais piezoelétricos como sensores para distinguir o tipo de veículo.

A durabilidade do protótipo apresentado foi estudada posteriormente (Yesner et al., 2017). O modelo desenvolvido passou por testes de cargas repetidas e sua geração caiu após a aplicação de 50.000 ciclos de cargas. Os transdutores internos foram analisados separadamente após os testes. Dos 64 geradores iniciais, 12 haviam deixado de funcionar, ocorrendo fraturas nas cerâmicas piezoelétricas ou o descolamento da capa metálica.

Os transdutores foram criados para suportar as altas cargas da rodovia, utilizando capas metálicas com uma alta rigidez. Entretanto, a cerâmica não consegue deslocar o metal, diminuindo a própria deformação do material piezoelétrico e o potencial de geração do mesmo. A utilização de capas metálicas mais esbeltas ou outros materiais é recomendada pelos autores.

Além da utilização de geradores utilizando a compressão sobre o sistema, existe a possibilidade da utilização de modelos de vibração. Um protótipo utilizando esse tipo de abordagem é apresentado por Song et al. (2016). A utilização da vibração ocorre porque a utilização de materiais maciços de cerâmica em geral custa caro e o PZT é um material frágil. O gerador idealizado utilizaria 48 transdutores piezoelétricos em balanço, em uma estrutura de 30x30x10 cm.

Um gerador menor de 15x15x10 cm foi criado utilizando 12 transdutores para a realização de testes laboratoriais e é demonstrado na Figura 8. Nas pontas dos sensores piezoelétricos foram adicionadas *Tips of Mass*, Pontas de Massa em uma tradução direta. As massas nas pontas das vigas foram adicionadas para modificar a frequência de oscilação dos sensores, buscando frequências próximas à natural, de forma que a capacidade de geração elétrica do protótipo aumente.

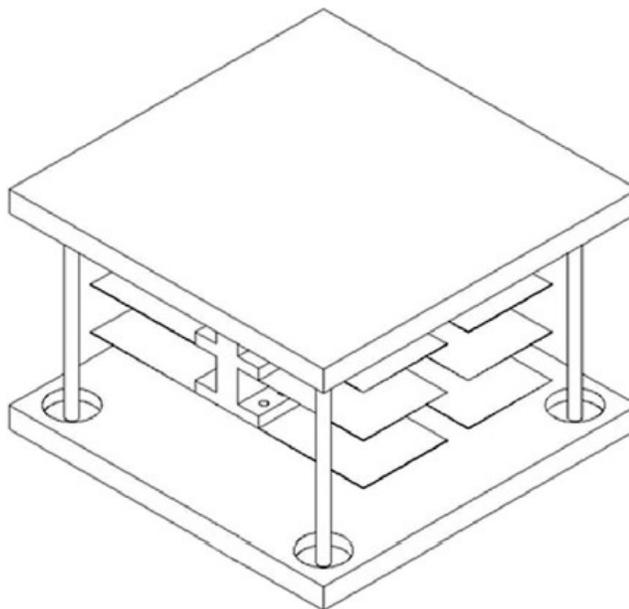


Figura 8 - Protótipo em escala reduzido testado. FONTE: Song et al. (2016)

Esse modelo chegou a uma potência máxima gerada de  $184\mu\text{W}$  utilizando uma resistência de  $70\text{ k}\Omega$ . O potencial de geração desse sistema seria de  $8,19\text{ mW/m}^2$ . Os resultados obtidos são laboratoriais e os autores ressaltam que verificações em aplicações reais são necessárias para uma melhor avaliação dos geradores.

Outros materiais com características piezoelétricas também podem ser utilizados. Jung et al. (2017) estudam a possibilidade de utilização de polímeros flexíveis. Vários filmes de PVDF, representados pela Figura 9 são colocados internamente em uma caixa metálica com lados de 15 cm e 9 cm de altura.

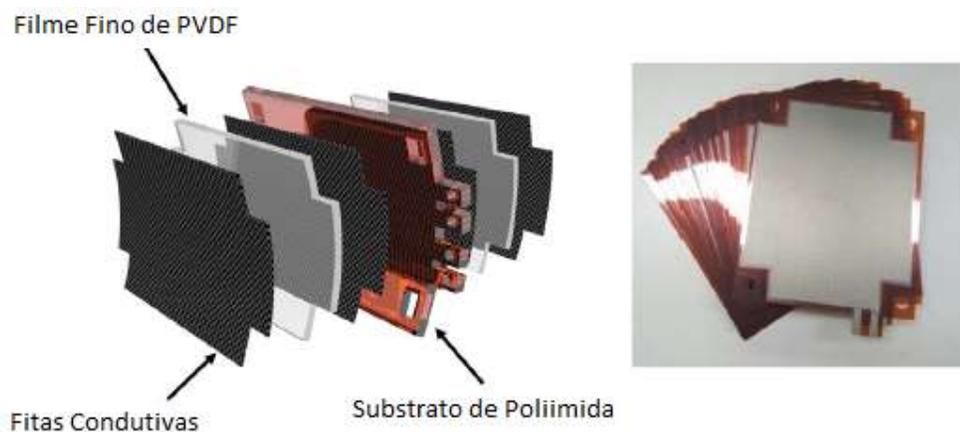


Figura 9 - Exemplo de transdutor com Filme de PVDF. FONTE: Jung et al. (2017)

Os polímeros foram testados em posição vertical e horizontal dentro do sistema. Esse gerador resultou em testes laboratoriais em valores de 200mW de potência, com um resistor de 40 k $\Omega$ , uma carga aplicada de 250 kgf e velocidade de 8 km/h, com os filmes de polímeros posicionados verticalmente.

Recentemente, alguns protótipos foram testados em trechos experimentais. Um desses testes foi realizado por Xiong e Wang (2016). O protótipo utilizado pelos autores continha 9 discos piezoelétricos, cada um com 4 cm de diâmetro, e 2 cm de espessura, conforme Figura 10. Esses discos foram posicionados dentro de uma caixa de proteção quadrada, com aproximadamente 30 cm de aresta. Seis geradores foram criados nesse formato e inseridos em um trecho de pavimento de uma estação de pesagem de veículos em Troutville, Estados Unidos.



Figura 10 - Protótipo de Coleta de Energia (PEH) testado em trecho experimental. FONTE: Xiong e Wang (2016)

Os dados coletados pelos autores registraram uma potência instantânea máxima de 0,116 W durante a passagem de um eixo de um veículo. O melhor resultado de potência média gerada durante a passagem foi de 3,106 mW. Os autores ainda ressaltaram, que apenas 14,43% das cargas aplicadas foram transferidas para os discos piezoelétricos, demonstrando que a geometria possui espaço para melhorias.

Guo e Lu (2017b) propuseram um coletor que envolveria uma camada completa de material piezoelétrico na estrutura do pavimento, juntamente com camadas de material condutivo. Esse sistema exigiria a construção do pavimento em conjunto com o sistema, com uma grande quantidade de material piezoelétrico, que permitiria uma maior produção elétrica.

A eficiência desse sistema foi estudada posteriormente por Guo e Lu, 2019. Diferentes tipos de geometrias e materiais foram estudados para analisar qual seria a melhor utilização para o sistema piezoelétrico, como PZT, PVDF, e geometrias de PZT com epóxi. O potencial

de geração seria de aproximadamente, 1,04 W, considerando fluxo apenas de veículos leves em um quilômetro de rodovia.

Outra aplicação em pavimentos foi realizada na China, por Yang et al. (2017). Essa aplicação utilizou 10 geradores retangulares, conforme Figura 11, utilizando 12 pilhas de três elementos piezoelétricos cada e mais 10 geradores circulares com a mesma quantidade de transdutores, portanto, utilizando um total de 720 elementos de PZT. Os experimentos foram realizados em um trecho de pavimento de teste. Um veículo de massa conhecida passou sobre os geradores, gerando energia para alimentar placas de sinalização conectadas ao sistema.

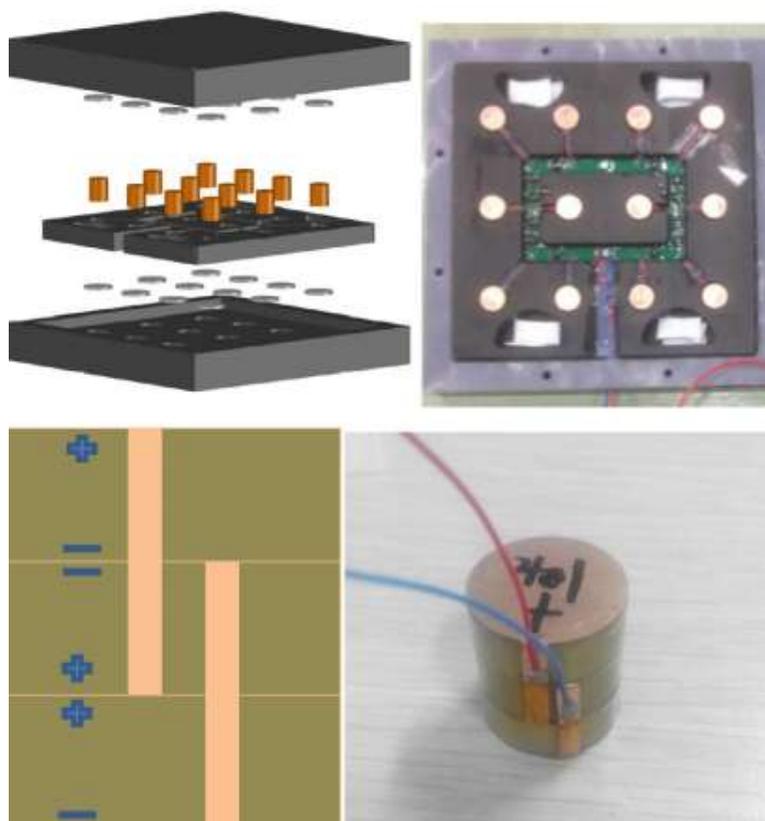


Figura 11 - Gerador utilizado para os testes. FONTE: Yang et al. (2017)

Os resultados de potência não foram divulgados pelos autores que relataram ser possível atingir valores de tensões entre 250 V a 400V em circuito aberto. O experimento reforçou que a velocidade é um fator importante para a geração. Nos testes com um veículo passando sobre o sistema, a tensão gerada aumenta com a velocidade, sendo mais sensível em velocidades baixas. A diferença entre as geometrias da estrutura externa demonstrou que o gerador circular absorve as tensões do veículo de forma mais amena, possuindo menores valores de pico que o formato retangular.

Cho et al. (2019) testaram um sistema piezoelétrico utilizando vigas piezoelétricas ao invés de sistemas de compressão simples, como outros pesquisadores. Porém, as vigas foram presas em ambas as extremidades e funcionaram através da flexão, não com vibração em balanço conforme Song et al. (2016). Os autores defenderam que essa fixação permitiria uma maior capacidade de geração energética. Um módulo do sistema possuía um total de 80 sensores de 40 x 60 mm, com uma cerâmica de PZT de 38 x 38 mm. Um total de 10 módulos, demonstrados na Figura 12, foram instalados dentro do revestimento, com uma camada de poliuretano cobrindo o sistema.

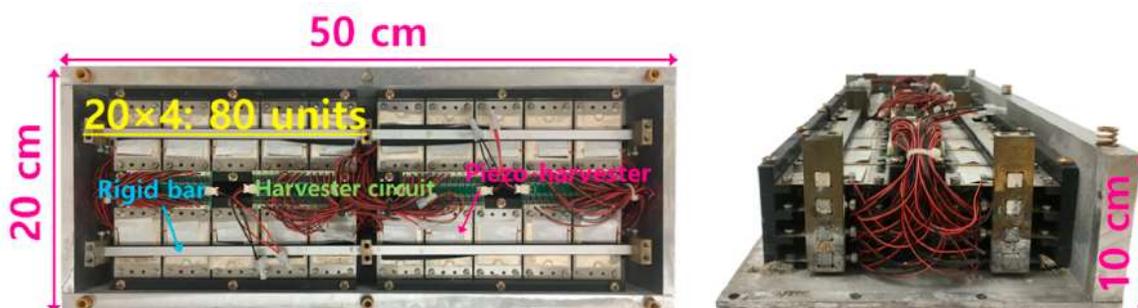


Figura 12 - Gerador Piezoelétrico com vigas bi-apoiadas FONTE: Cho et al. (2019).

Os sensores nas caixas eram deformados de maneira controlada por barras rígidas posicionadas no centro dos sensores que se deslocavam durante as passagens dos veículos. LEDs foram abastecidos pelos sensores, que foram capazes de gerar uma potência média de 480 mW, com um pico máximo de um módulo de 2080 mW. Os autores ainda concluíram que o sistema foi capaz de realizar a contagem de veículos, além de abastecer os LEDs, permitindo sua utilização para iluminação e registro do volume de tráfego.

### 2.1.2 Custos da energia piezoelétrica

Segundo Roshani et al. (2018), a energia convencional nos Estados Unidos é de, aproximadamente, 0,15 até 0,30 US\$/kWh e uma nova tecnologia precisaria estar próxima a esses valores para ser considerada competitiva e ter sucesso comercial.

Hill et al. (2014) realizaram um estudo para a Comissão de Energia da Califórnia. Nesse relatório, estima-se que o preço da energia gerada está na faixa de 0,08 a 0,20 US\$/kWh, usando os dados dos fornecedores do material. A energia gerada pelo material é altamente dependente do volume de tráfego onde será instalado. Portanto, um maior tráfego geraria maior energia,

trazendo o preço da energia elétrica para valores menores. Esse preço foi dado considerando que o tráfego permitiria uma densidade energética de aproximadamente 300 W/ft<sup>2</sup>.

Os valores, porém, sofrem muita variação dependendo do estudo levantado. Wang et al. (2018) em uma revisão de literatura estimaram que o custo da energia piezoelétrica de acordo com o apresentado até o momento seria aproximadamente 106 US\$/kWh. Os autores, todavia, não descartam a utilização de energia piezoelétrica no futuro, indicando que ela possui um TRL (*Technology Readiness Level* – Nível de prontidão tecnológico, em tradução direta) de 4 em uma escala de 1 a 9. A escala 4 indica que a tecnologia possui espaço para novos estudos.

Guo e Lu (2017a) realizaram um levantamento teórico de aplicações de sistemas piezoelétrico e coletor solar em toda a malha rodoviária do estado da Flórida, nos Estados Unidos. Os autores estimaram que o custo da energia piezoelétrica seria algo próximo de 25 a 106 US\$/kWh, considerando que a vida útil dos transdutores seriam em torno de 5 a 15 anos. Entretanto, quando são consideradas apenas as áreas com maior volume de tráfego, o preço da tecnologia cairia para aproximadamente 1,77 US\$/kWh. O sistema posteriormente proposto pelos autores, citado anteriormente (Guo e Lu, 2017b) exigiria um maior aporte inicial de investimento. No entanto, esse valor chegaria a 19 US\$/kWh com uma vida útil de 15 anos do sistema.

Moure et al. (2016) propuseram um sistema que utilizasse conversores címbalos, que foram instalados em um trecho experimental para avaliação. Utilizando os dados experimentais e os dados de tráfego de Madrid, estimou-se que o custo da energia gerada seriam aproximadamente de 1,98 €/kWh, considerando a instalação nos trechos da cidade com volume de tráfego mais elevado.

Os autores ressaltaram que outras tecnologias de geração de energia obtiveram uma queda do custo do kW de, aproximadamente, 90% diminuindo os preços dos materiais e melhorando a eficiência. O avanço dos estudos com esse tipo de transdutor pode diminuir o preço para patamares competitivos.

As diferenças de valores apresentadas pelos autores têm diversas explicações, principalmente pela diferença de tráfego considerado e vida útil prevista. Outro fator envolve os custos da implantação, considerando as obras necessárias para a instalação na rodovia. Uma maneira de diminuir esse custo é instalar o sistema durante a construção do pavimento, retirando a necessidade de obras posteriores.

## 2.2 SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PAVIMENTOS

Outros métodos podem ser utilizados para a microgeração de energia em pavimentos. Em um estudo sobre as diferentes alternativas, Wang et al. (2018) citaram como possibilidade a utilização de painéis fotovoltaicos, coletores térmicos, geradores termoelétricos (efeito Seebeck), energia geotérmica, sensores eletromagnéticos, além dos transdutores piezoelétricos.

Além da possibilidade desses modelos trabalharem separadamente, existe a possibilidade de utilização de um sistema híbrido em um mesmo ponto da rodovia. Symeoni (2012) propôs diferentes modelos híbridos visando uma maior capacidade de geração. Uma das propostas do autor é a utilização de barreiras de sons de material fotovoltaico, presença de coletores térmicos e transdutores piezoelétricos, buscando aproveitar a energia térmica e mecânica do pavimento.

### 2.2.1 Painéis Fotovoltaicos

A utilização de painéis fotovoltaicos nos pavimentos procura resolver a questão do espaço físico necessário para a instalação de usinas fotovoltaicas, otimizando a vasta extensão pavimentada de ruas, estacionamentos e rodovias.

A prática tem seu início, conforme relatado por Wang et al. (2018), em um protótipo de estacionamento com painéis fotovoltaicos instalados, em 2009 pela agência norte americana *Federal Highway Administration* (FHWA, Administração de Rodovias Federais).

Outro exemplo conhecido da aplicação de painéis fotovoltaicos em áreas pavimentadas é a ciclovia construída em Krominie, Holanda, visualizada na Figura 13. O potencial de geração foi noticiado pelo website CleanTechnica, revelando que ela é capaz de gerar 9800 kWh anuais, superando os 70 kWh/m<sup>2</sup> esperados pelos testes laboratoriais realizados antes da instalação. Os 70 metros de ciclovia construídos seriam capazes de suprir até três vezes o consumo médio de uma moradia holandesa.



Figura 13 - Ciclovia Solar instalada em Krominie. FONTE: CleanTechnica

Na França, a empresa de infraestrutura Colas, lançou a *WattWay*<sup>1</sup>, painéis solares que podem ser aplicados diretamente sobre as rodovias, demonstrado na Figura 14. A empresa promete que o material utilizado mantém a segurança na via, permitindo todos os tipos de veículos e condições, sem perder o atrito necessário e fornecendo resistência as cargas elevadas. A promessa do produto é suprir o necessário para uma moradia local, com 20 m<sup>2</sup> de rodovia. Um trecho experimental desse sistema foi noticiado pelo The Guardian em 2016, em um trecho de 1 km no interior do país.



Figura 14 - Exemplo dos painéis *WattWay* aplicados na França. FONTE: Website da empresa COLAS

<sup>1</sup> < [www.wattwaybycolas.com/en/](http://www.wattwaybycolas.com/en/) > Acesso em 09 abr. 2019

O potencial desse tipo de tecnologia é ressaltado pela própria Colas, que indica que em média, as rodovias estudadas passam apenas 10% do tempo cobertas por veículos, mantendo então 90% do tempo livre para gerar energia através dos painéis.

A utilização de painéis fotovoltaicos em rodovias não necessariamente envolve em uma aplicação no pavimento. Nordmann e Clavadetscher (2004) estudaram propostas de instalação dos painéis fotovoltaicos em barreiras sonoras nas rodovias. A utilização de barreiras sonoras entre as faixas é lei em diversos países europeus. Visando essa obrigatoriedade, a otimização dessas barreiras para gerarem energia elétrica já é explorada desde 1989 na Suíça.

A vantagem do sistema, segundo os autores, é a facilidade de acesso para manutenção, melhoria do espaço e um alto potencial de geração. Estima-se que se utilizado nas rodovias onde exista a obrigatoriedade na Europa Central, o sistema poderia atingir até 680 GWh por ano.

Dezfooli et al. (2017) desenvolveram protótipos de pavimentos com painéis fotovoltaicos para a geração de energia. O protótipo criado envolve uma mescla de concreto asfáltico misturado com borracha e painéis solares. Os autores se preocuparam em testar parâmetros que levantam interesse para esse tipo de aplicação, como o atrito para evitar derrapagens, drenagem e como a passagem de veículos pode modificar a geração de energia. O estudo concluiu que a passagem de veículos diminui a geração de energia e necessita atenção para não danificar os cabos de transmissão da energia gerada.

Em questão de custos da geração através de painéis fotovoltaicos, Wang et al. (2018) estimaram que o custo seria aproximadamente 0,45 US\$/kWh. Esse custo próximo aos modos de energia tradicional, indicam um sistema mais competitivo para aplicações comerciais com geração em larga escala, entretanto, os autores destacam que é necessário cuidado com a resistência das placas no longo prazo e a capacidade de manter a textura necessária para a segurança na via.

A fragilidade das placas pode implicar em reparos mais complexos e onerosos, como por exemplo, o caso da ciclovia de Amsterdã, ilustrada na Figura 15.



Figura 15 - Reparos na Ciclovia Solar em Krominie

### 2.2.2 Coletores Térmicos

Coletores Solares ou Térmicos, são um tipo de sistema visado em aproveitar a energia térmica do pavimento, geralmente proveniente da exposição à radiação solar. Esse sistema é baseado na construção de dutos preenchidos por algum fluido, embebidos na estrutura do pavimento. O fluxo do fluido presente dentro do pavimento absorve o calor do pavimento, permitindo a utilização dessa energia térmica.

Esse sistema foi inicialmente criado para descongelamento das pistas em países com invernos rigorosos. Eugster (2007) relata a primeira instalação de um sistema desse tipo na Suíça em 1994. O sistema utilizava dutos com água que absorviam o calor durante os períodos quentes e mantinha a água aquecida armazenada no nível das rochas locais. Durante os períodos de frio, o fluxo d'água nos dutos mantinha o pavimento acima dos 0°C, impedindo o acúmulo de neve sobre a pista.

Sullivan et al. (2007) descrevem a experiência holandesa da utilização de sistema similar, para a aplicação no Reino Unido. A água é coletada de fontes próximas, em geral de aquíferos, passando por dutos próximos a superfície do pavimento até um depósito de água quente. Durante o inverno, o fluxo d'água do depósito é revertido para o aquecimento de

residências próximas. O sistema ainda possui como benefício o controle de temperatura do pavimento. A temperatura da superfície durante o verão diminui com o calor absorvido pela água, diminuindo problemas como a deformação permanente do material asfáltico. Em temperaturas frias, a passagem da água mantém as temperaturas da pista acima do ponto de congelamento, servindo para o degelo das pistas no país. Esse funcionamento é representado pela Figura 16 - Sistema coletor para utilização para climatização. FONTE: Sullivan et al. (2007).

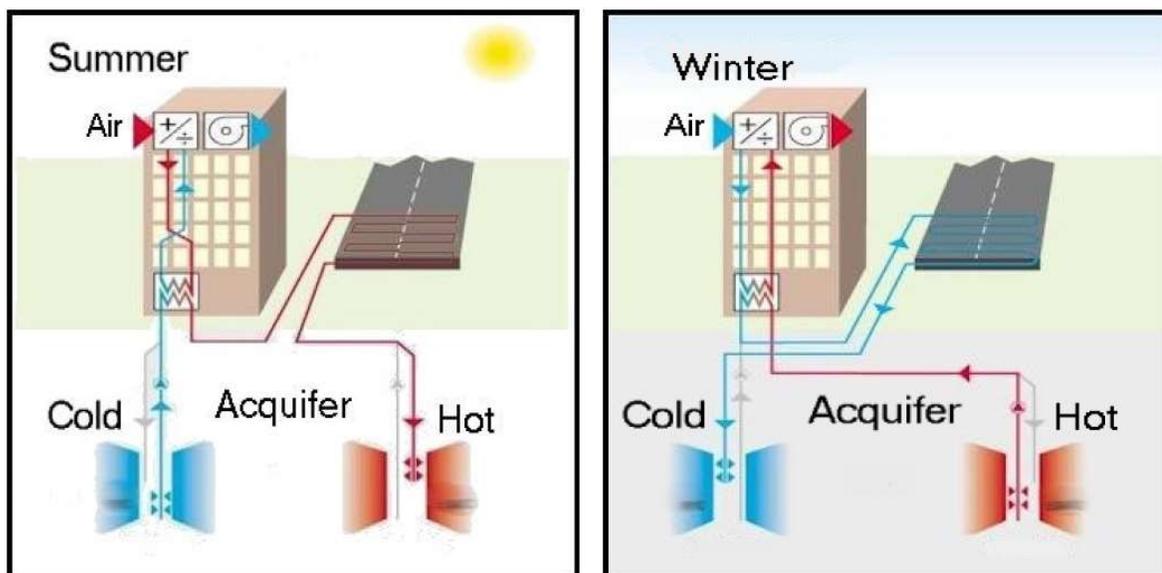


Figura 16 - Sistema coletor para utilização para climatização. FONTE: Sullivan et al. (2007).

Os autores exploram a possibilidade de aplicação desse sistema para a substituição dos sistemas tradicionais de refrigeração e aquecimento em um prédio de escritórios com aproximadamente 1000 m<sup>2</sup>. O sistema precisaria de aproximadamente 400m<sup>2</sup> de pavimento e uma bomba de calor de aproximadamente 340 kW para abastecer a demanda. O benefício desse sistema é a redução de até 55% da geração de CO<sub>2</sub> e utilização de combustíveis fósseis, comparado aos sistemas tradicionais de calefação e refrigeração utilizados no Reino Unido.

Bobes-Jesus et al. (2013) realizaram uma revisão bibliográfica para determinar diferentes características, como geometria, espaçamento, material, propriedades térmicas do pavimento e diâmetro dos tubos para otimizar os coletores solares.

Os autores ressaltaram que os tubos de cobre são mais eficientes, principalmente quando em formato de serpentina sob o pavimento. Entre as propriedades térmicas do pavimento, a

condutividade possui importância na determinação da profundidade que os dutos podem ser posicionados, entretanto, não altera a temperatura da superfície do pavimento.

Pascual-Muñoz et al. (2014) propuseram um sistema para coletar energia térmica sem a necessidade de utilização de dutos no pavimento. O sistema consiste em uma camada de pavimento altamente poroso, entre duas camadas de concreto asfáltico gap-graded. O sistema proposto poderia atingir uma eficiência térmica de até 95%.

Garcia e Partl (2014) propuseram a utilização de dutos preenchidos por ar, ao invés de líquidos, com uma chaminé para a geração de energia. A utilização de ar previne que o sistema possa gerar vazamentos, que danificariam a estrutura interna do pavimento. As serpentinhas de cobre preenchidas por água possuem difícil manutenção.

O sistema é composto por pequenos dutos posicionados dentro do pavimento, por onde o ar se desloca entre dois pontos do pavimento, entrando por um lado o ar frio, aquecido pelo pavimento com temperatura superior ao ambiente e seguindo um fluxo passando por uma chaminé que acionaria uma turbina com a convecção do ar quente. A eficiência do sistema proposto foi de aproximadamente 10% para o aquecimento do ar e 12% para a conversão de energia da chaminé, totalizando a eficiência total em apenas 1%. O sistema é demonstrado na Figura 17.

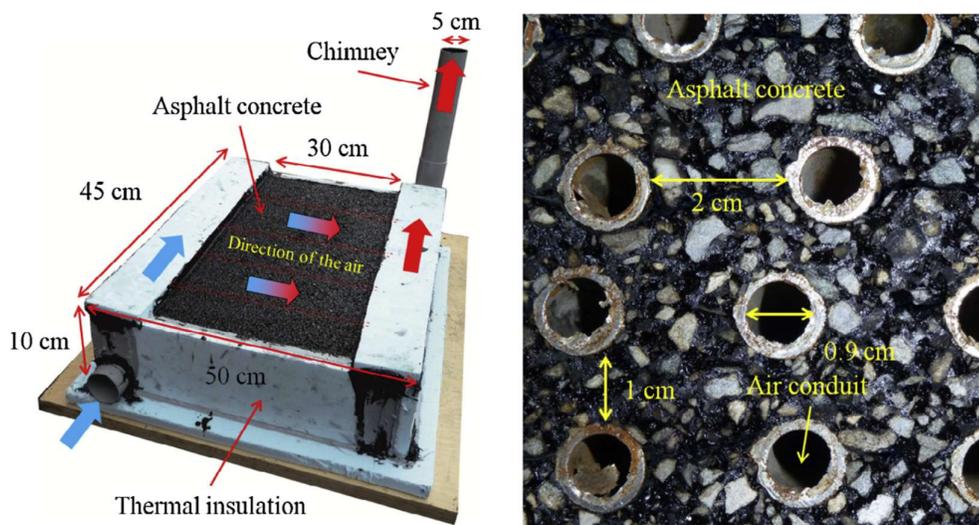


Figura 17 - Sistema coletor térmico com ar proposto. FONTE: Garcia e Partl (2014)

Chiarelli et al. (2015) otimizaram o sistema, modificando as dimensões e diâmetros da chaminé e dutos. O sistema poderia atingir até 15% de eficiência na geração de energia elétrica, tornando-o viável para instalação. Outras vantagens do sistema colaboram para a questão de viabilidade, como capacidade de controle da temperatura do pavimento, permitindo o

descongelamento da pista, ou resfriamento da temperatura da superfície, diminuindo a deformação permanente do concreto asfáltico e contribuindo para uma diminuição da ilha de calor urbana.

Chiarelli et al. (2017) realizaram novos estudos focando na necessidade do sistema. A câmara coletora de ar do sistema é determinante para a temperatura de saída do ar na chaminé projetada. Ao dimensionar a câmara para uma maior temperatura de saída, a geração de energia seria maior, entretanto, uma maior temperatura de circulação do ar no pavimento acarretaria uma diminuição do potencial de redução da temperatura do pavimento, limitando os efeitos ambientais benéficos da mitigação da ilha de calor.

Guo e Lu (2017a) determinaram que o sistema de coletores solares poderia fornecer até 55 GWh por ano, em um estudo considerando todo o potencial de geração do estado da Flórida. O custo seria de 2,31 US\$/kWh, considerando custos de manutenção e instalações teóricos. Esses valores dependem do tipo de instalação, quantidade de energia térmica disponível nos pavimentos.

Wang et al. (2018) precificaram o kWh gerado pelo sistema coletor em aproximadamente 4,21 US\$/kWh na sua revisão bibliográfica de diversos métodos de microgeração de energia em pavimentos. Os autores concluíram que a tecnologia da coleta térmica possui espaço para crescimento, sendo um sistema muito eficiente termicamente, permitindo os controles de temperatura do pavimento, coleta e estoque de água quente, contudo, necessita de mais estudos para a melhoria na geração da energia elétrica para ser utilizado como fonte de energia.

### 2.2.3 Geradores Termoelétricos

O efeito Seebeck<sup>2</sup> é a geração de uma diferença de potencial elétrico de alguns condutores ao serem submetidos a um diferencial de temperatura. Hasebe et al. (2006) propôs a utilização desse tipo de gerador como fonte de energia em um sistema coletor térmico.

O sistema proposto envolve a utilização d'água de um rio próximo a rodovia como fonte de água fria, enquanto dutos instalados no pavimento forneceriam água quente para a obtenção

---

<sup>2</sup> O efeito Seebeck foi observado pela primeira vez em 1821 quando o físico Thomas Johann Seebeck estudava fenômenos termoelétricos. É o reverso do efeito Peltier que é a produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma diferença de potencial (tensão elétrica) em um circuito fechado (consequentemente, percorrido por uma corrente elétrica). [Fonte: Wikipedia. [https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito\\_Seebeck](https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Seebeck)]

de um diferencial de temperatura no gerador termoelétrico. Quanto maior a diferença entre a água do rio e a aquecida pelo pavimento, maior a capacidade de geração de energia.

O menor potencial de geração foi ao meio dia, quando a temperatura da água do rio atingiu seu valor máximo, diminuindo o diferencial térmico e consequentemente a geração de energia elétrica. Kraemer et al. (2014) em estudos sobre os geradores termoelétricos concluíram que sua eficiência é em torno de 8 a 10%, com capacidade de atingir 14% com melhorias dos materiais.

Datta et al. (2017) prepararam um gerador termoelétrico sem a necessidade de utilização de fluídos para gerarem o gradiente como o exemplo de Hasebe et al. O gerador termoelétrico proposto consistia em duas placas de cerâmica, com os materiais termoelétricos e camadas condutoras posicionadas internamente. O diferencial de temperatura no sistema seria gerado através de uma placa metálica em formato de “Z” conectando a superfície do pavimento até a placa de cerâmica superior, enquanto a placa inferior ficaria em contato com um dissipador de calor, conforme Figura 18.

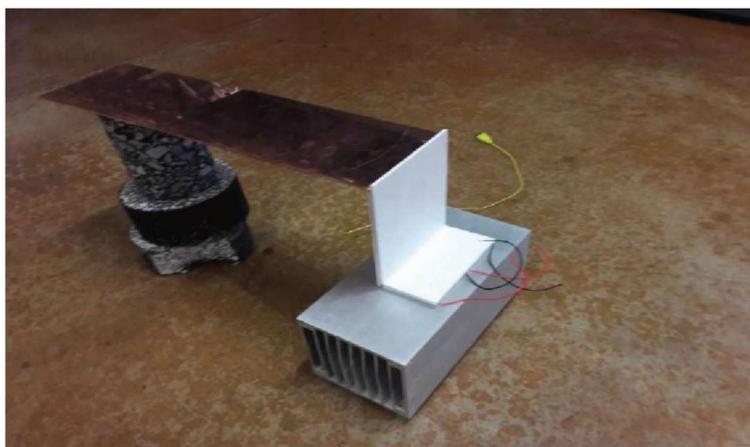


Figura 18 - Sistema de geração Termoelétrico montado. FONTE: Datta et al. (2017).

A eficiência do sistema é afetada pelo dissipador de calor. O dissipador projetado possui uma câmara de fluídos com capacidade de absorver o calor, nesse caso, água, e teve como função garantir que o calor que chegasse até a parte inferior do gerador termoelétrico fosse transmitido para o ambiente, mantendo o diferencial térmico entre ambas as placas. A diferença de temperatura nas placas poderia chegar até 20°C e gerar até 0,5 kWh por dia com um protótipo, uma média de 10mW.

Tahami et al. (2019) otimizaram o modelo proposto por Datta et al. O sistema alterou o formato “Z” da placa condutora para um formato “L” por possuir uma melhor eficiência que a placa anterior. O dissipador de calor também sofreu alterações, com adições de novas camadas

para evitar a absorção de calor do solo pelo dissipador, e a troca do fluido por um material dissipador utilizado em outras aplicações. A instalação do sistema seguiu o esquema da Figura 19.

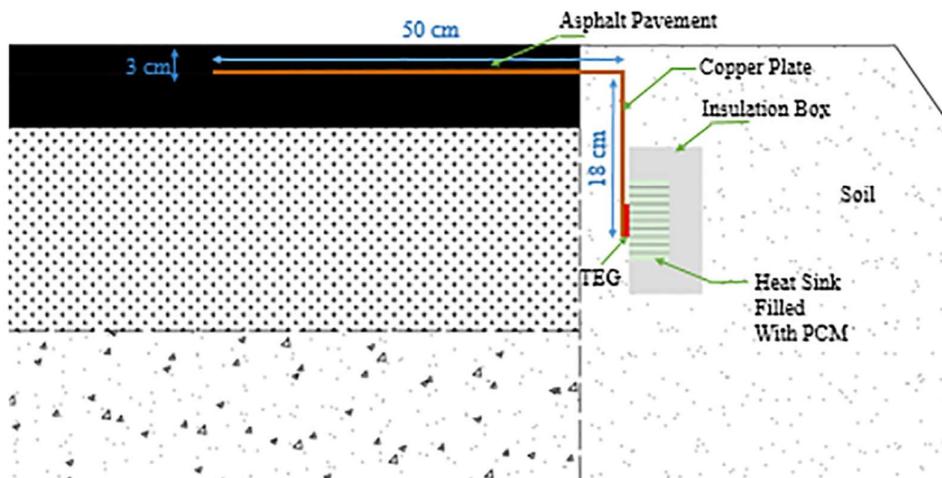


Figura 19 - Sistema Termoeletrico Otimizado. FONTE: Tahami et al. (2019).

O sistema melhorou a eficiência comparado com o anterior, atingindo uma geração de potência média de 29 mW. Os autores ressaltam que o sistema pode ser eficientemente aplicado em locais isolados para iluminações com LEDs e outras aplicações com baixo consumo de energia.

Jiang et al. (2018) desenvolveram um sistema de geração termoeletrica em uma rodovia com a capacidade de redução da temperatura do pavimento, demonstrado na Figura 20.

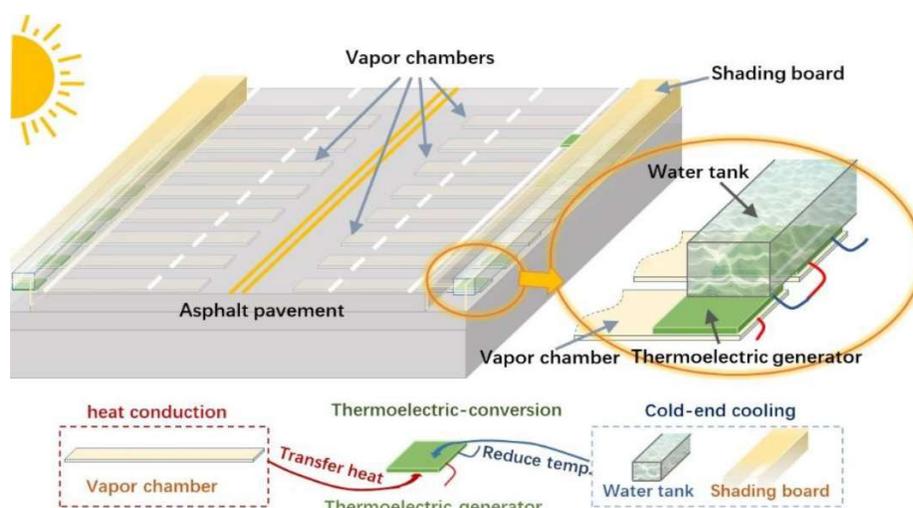


Figura 20 - Sistema Termoeletrico com função de redução de temperatura. FONTE: Jiang et al. (2018).

O sistema contempla a instalação de placas de alumínio, batizadas de câmara de vapor, no pavimento. Um dos extremos dessas placas ficaria exposto na lateral da via, onde estaria em contato com um gerador termoelétrico. O lado frio do gerador termoelétrico estaria em contato com um tanque de água, para dissipar o calor, com uma cobertura de sombra para evitar o aquecimento do tanque pela radiação solar.

O calor retirado pelo alumínio até o gerador foi capaz de reduzir de 8 a 9°C da temperatura máxima do pavimento, quando comparado aos pavimentos comuns. A redução da temperatura ao longo do dia chegou a apresentar uma diferença maior que 5°C durante 7 horas no dia.

#### 2.2.4 Geradores Eletromagnéticos

A geração de energia em pavimentos, através da conversão de energia mecânica, também pode ser realizada por geradores eletromagnéticos. Os geradores eletromagnéticos se baseiam nas descobertas de Faraday sobre a indução eletromagnética. Esse tipo de gerador utiliza um sistema que se move com a aplicação das cargas, geralmente composto por uma bobina e um ímã. A movimentação desses elementos gera uma corrente elétrica devido aos efeitos da indução eletromagnética, segundo Beeby et al. (2006).

Recentemente, utilizando geradores eletromagnéticos, Duarte et al. (2013, 2015) descreveram coletores de energia em pavimentos para a utilização da energia de pedestres e veículos desenvolvidos pela start-up portuguesa Waydip. Os autores realizaram testes em Portugal com esses coletores, que ficam sobre o nível da pista, conforme Figura 21.



Figura 21 - Exemplo do gerador eletromagnético para veículos. FONTE: Duarte et al. (2015)

O Waynergy People, como foi nomeado o coletor de pedestres, conseguiu gerar 525 J de energia em 1 hora, ou 0,15 Wh, gerando em média 1 J por ativação de um pedestre de 75 kg.

O waynergy Vehicle, desenvolvido para automóveis, conseguiu atingir uma quantidade de 37800 J em uma hora de pico de utilização ou 10,5 Wh, ou aproximadamente 92 J. Esses valores tornam o sistema bastante atraente para diferentes aplicações.

Geradores eletromagnéticos para utilização de pedestres são comercializados pela empresa Pavegen<sup>3</sup>. O gerador eletromagnético da empresa funciona através de diversos módulos que sofrem pequenos deslocamentos com a passagem de pessoas. Os produtos estão disponibilizados para calçamentos, aeroportos, shoppings, quadras de futebol.

Wang et al. (2018) concluíram em seus estudos sobre diversos métodos de microgeração de energia, que apesar do sucesso de utilização dos sistemas eletromagnéticos para a avaliação do estado estrutural de pontes, esse sistema não pode ser aplicado diretamente na conversão da vibração dos pavimentos.

### 2.3 RODOVIAS INTELIGENTES

A otimização do espaço físico das rodovias é uma demanda para o futuro do transporte urbano e rodoviário. Um exemplo dessa tentativa de otimização são as chamadas *SmartRoads*<sup>4</sup> na Austrália, onde colocou-se em prática um planejamento da utilização das ruas urbanas para a melhoria do tráfego, gerando rotas e horários preferenciais para carros, ônibus e transporte de cargas. As vias escolhidas nesse sistema previram a utilização de tecnologias para localizar ônibus e caminhões, permitindo uma melhoria na organização dos semáforos, sinalizações customizáveis e informação em tempo real do trânsito para os motoristas.

Além de uma reorganização das vias urbanas, as tecnologias podem ser aplicadas para benefícios ambientais e para os usuários. Um exemplo dessa ideia é a rodovia I-85, no estado da Geórgia, EUA. A rodovia conhecida como “*The Ray*”<sup>5</sup> é uma proposta diferenciada, aplicando diversos conceitos na tentativa de diminuir o impacto ambiental das rodovias e beneficiar os motoristas, através de geração de energia, sensores e abastecimento de veículos elétricos

Atualmente, a rodovia possui um trecho de teste dos painéis solares “*Wattway*” em aproximadamente 50 m<sup>2</sup>. É possível encontrar estações de recarga de veículos elétricos e sensores para a medição da pressão de inflação dos pneumáticos dos veículos. O sistema prevê

---

<sup>3</sup> <<http://www.pavegen.com/>> Acesso em 04/05/2019.

<sup>4</sup> <<https://www.vicroads.vic.gov.au/traffic-and-road-use/traffic-management/smartroads>> Acesso em 01/05/2019

<sup>5</sup> <<https://theray.org/>> Acesso em: 01/05/2019.

ainda a implantação de notificação do dano lateral nas rodas e avaliar a idade através dos números de identificação estampados na lateral dos pneus.

No futuro, a rodovia espera instalar painéis solares nas áreas de domínio e como barreiras sonoras entre as pistas, faixas especiais para abastecimento de veículos elétricos através de indução eletromagnética e utilizar tachões iluminados para auxiliar a utilização de carros autônomos nas rodovias.

## 2.4 ANÁLISE CRÍTICA DOS SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO

A utilização de sistemas de geração de energia utilizando a estrutura viária ainda está em fase inicial. Wang et al. (2018), revisando a bibliografia, determinaram o chamado TRL para as tecnologias de coleta de energia. As cinco tecnologias listadas na presente pesquisa têm seus TRLs determinados conforme o estudo de Wang et al., com adição da tecnologia geotérmica.

Os autores relatam que a tecnologia geotérmica é utilizada principalmente no derretimento de neve em rodovias utilizando o calor proveniente de fontes geotermiais. A presente pesquisa considerou que este sistema não se enquadra no escopo de geração de energia através da infraestrutura viária, uma vez que requer fonte geotermal próxima

O Nível de Prontidão Tecnológico (TRL) é uma métrica sistemática para avaliar a maturação de novas tecnologias. O TRL divulgados por Mankins (1995) possuem 9 níveis para demonstrarem o estágio da tecnologia proposta, utilizado inicialmente pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Os níveis de 1 a 9 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Significado dos estágios de TRL - FONTE: Adaptado de Mankins (1995)

TRL 1	Princípios básicos observados e relatados
TRL 2	Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados
TRL 3	Provas de conceito e funções analíticas e experimentais
TRL 4	Validação em laboratório
TRL 5	Validação em ambiente relevante
TRL 6	Demonstração de protótipos em ambientes relevantes
TRL 7	Demonstração de funcionamento no ambiente de operação
TRL 8	Sistema completo e pronto para aplicações através de testes e demonstrações
TRL 9	Sistema “provado” através de utilizações práticas bem-sucedidas.

O TRL de uma tecnologia indica o seu estágio de maturação e não seu potencial ou viabilidade. Menores TRLs indicam uma tecnologia que começa a receber estudos, enquanto TRLs altos indicam que a tecnologia já possui aplicações em sistemas reais. As tecnologias de aproveitamento de energia apresentaram os TRLs determinados por Wang et al. conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - TRL das tecnologias de Microgeração em pavimentos. FONTE: Adaptado de Wang et al. (2018)

Tecnologia	TRL
Painéis Fotovoltaicos	9
Coletores Térmicos	4
Geradores Termoelétricos	3
Transdutores Piezoelétricos	4
Geradores Eletromagnéticos	4

Os painéis fotovoltaicos receberam o TRL mais alto da escala na classificação de Wang. Conforme relatado na bibliografia, já existem empresas, como a Colas, que desenvolvem produtos com essa tecnologia e tem realizado uma série de testes. A utilização de painéis fotovoltaicos para captar energia solar já é uma fonte de geração competitiva na rede convencional. A sua utilização em rodovias ainda esbarra em desafios de resistência e principalmente do alto custo inicial envolvido.

As demais tecnologias possuem menor geração que os painéis fotovoltaicos, principalmente, por se tratar de tecnologias ainda em estágio inicial de desenvolvimento. Os coletores térmicos (Dawson et al., 2014; Chiarelli et al., 2017) possuem benefícios, como a diminuição da temperatura do pavimento. Entretanto, a eficiência elétrica não é grande e a maioria dos pesquisadores focam na capacidade de fornecer água quente, controle de temperatura do pavimento e aquecimento e refrigeração de construções. Adicionalmente, a instalação destes sistemas é largamente invasiva e requer que grandes áreas do pavimento sejam reconstruídas. Para um projeto realizado em uma rodovia em serviço há de se pensar também na sua dificuldade operacional de instalação e manutenção.

Os geradores de energia eletromagnéticos possuem valores interessantes de geração, conforme Duarte et al. (2015) demonstrara. Esse sistema possui aplicações fora das vias, como passagens de pedestres, conforme relatado anteriormente no item 2.2.4.

Todavia, a aplicação da tecnologia no estado atual em pavimentos possui empecilhos. A necessidade de deslocamento para o funcionamento do gerador termoelétrico torna o sistema um obstáculo nas rodovias. O gerador não é necessariamente nivelado com o pavimento, desse modo, a passagem de veículos desloca o sistema, sendo assim percebido como um degrau. Entretanto, essa diferença de nível impede um fluxo em alta velocidade contínuo dos veículos, não sendo atrativo em rodovias.

Aplicações desse sistema em locais onde ocorram necessidades de redução de velocidade pode ser aconselhável, permitindo uma geração de energia em pontos específicos, como lombadas. A aplicação em passagens de pedestres também apresenta bom potencial, por ser um uso que permite pequenos deslocamentos.

O outro método levantado é o sistema termoelétrico (efeito Seebeck). O sistema com o TRL mais baixo reportado possui poucas referências na bibliografia, porém possui pesquisas atuais sobre o sistema (Tahami et al., 2019). Os geradores termoelétricos em seu formato proposto atualmente possuem vantagens em relação aos coletores térmicos e aos eletromagnéticos.

O gerador é embutido no pavimento e pode gerar energia continuamente (dependendo do clima), sem necessidade de grandes estruturas de dutos e bombeamento, como os coletores térmicos, ou sendo obstáculos na pista, como os eletromagnéticos. A portabilidade do sistema é uma vantagem para aplicações em locais remotos, mas carece de estudos sobre o funcionamento em diferentes climas.

Por último, o sistema piezoelétrico possui vantagens semelhantes ao termoelétrico, como portabilidade e não afetar o tráfego, além da possibilidade de servir como sensores para registrar informações do trânsito, facilidade de manuseio e geração sem dependência do clima.

A outra vantagem do sistema piezoelétrico é o baixo investimento inicial. Mesmo que o preço por kWh gerado seja maior que os dos painéis fotovoltaicos, um sistema piezoelétrico pode ser construído por um custo menor, servindo como uma alternativa para pequenas aplicações sem a necessidade de utilização de redes principais.

Uma alternativa a ser avaliada é a possibilidade de utilização de sistemas híbridos. Os sistemas piezoelétrico e termoelétrico não aparentam ter nenhuma condição excludente para a aplicação de ambos. Um sistema híbrido entre essas características poderia garantir um fluxo de energia quando uma das condições necessárias para a geração baixar, como o volume de tráfego ou o gradiente de temperatura.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os diferentes materiais utilizados, o desenvolvimento do gerador piezoelétrico, a instalação dos protótipos em campo e os ensaios laboratoriais desenvolvidos para apoio da pesquisa.

#### 3.1 ESCOLHA DOS TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS

O Gerador Piezoelétrico criado foi desenvolvido a partir dos transdutores piezoelétricos escolhidos para realizarem a microgeração. O tipo de transdutor selecionado foi de vigas piezoelétricas posicionadas em balanço, ou cantilever, recebendo o esforço mecânico necessário através das vibrações do pavimento durante as passagens de veículos.

A utilização de um sistema para a captação da vibração possui vantagens e desvantagens comparados aos sistemas baseados na compressão do material piezoelétrico. A principal vantagem desse sistema é permitir que as vigas oscilem próximas a sua frequência natural ao serem estimuladas por cargas externas ao protótipo, o que diminui a fadiga causada no PZT.

A alta rigidez do material piezoelétrico o torna propenso a fadiga. A utilização de sistemas de compressão pode acarretar altas tensões no transdutor piezoelétrico, o que causaria valores maiores de potência elétrica máxima, no entanto, com uma diminuição da vida de fadiga.

Outra vantagem teórica da utilização da vibração sobre a compressão é a geração residual. Após a aplicação de uma carga sobre os diferentes modelos, é esperado que as vigas em balanço mantenham uma vibração por um determinado período, o que continuaria a converter energia elétrica. As placas comprimidas, onde a carga é aplicada diretamente sobre a cerâmica, geram um pico instantâneo a aplicação, e logo ocorre a dissipação.

A geração total de energia dos dois sistemas irá depender das cargas aplicadas ao sistema. A vibração, que recebe tensões perpendiculares ao sentido de polarização, tende a gerar maiores quantidades de energia elétrica quando os carregamentos permitem uma excitação próxima a sua frequência natural. À compressão, em compensação, recebe a força em sentido paralelo a sua polarização, e tende a gerar melhores resultados quando a excitação nos transdutores é diferente da frequência natural.

Como o custo do PZT tende a ser o que causa maior impacto no sistema, a integridade dos sensores foi a principal prioridade do Gerador desenvolvido. O sistema funcionando em

vibração possui vida de fadiga maior e não tem o risco de quebra das cerâmicas por carregamentos maiores que os calculados, por isso foi a escolha realizada.

Baseado nesse modelo de geração, o transdutor comercial escolhido foi o PPA-1014, da fabricante Mide, conforme Figura 22.



Figura 22 - Transdutor Piezoelétrico PPA-1014, escolhido para o experimento

A escolha por esse transdutor foi baseada no custo total, dimensão do sensor, e potência quando excitado a uma aceleração de 1 g. A cerâmica piezoelétrica utilizada por esse modelo de transdutor é a PZT-5H. Os dados fornecidos pelo fabricante podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados fornecidos pelo fabricante dos Transdutores (data base: abril de 2018)

<b>Modelo</b>	<b>Freq (1 g)</b>	<b>Pot. RMS (mW)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Preço (US\$)</b>	<b>Preço/Pot</b>
PPA-1001	60	1,8	956,8	36,73	20,41
PPA-1011	21	16	956,8	119,98	7,50
PPA-1012	23	7,1	1766,4	78,47	11,05
PPA-1013	NI	NI	1766,4	291,38	-
<b>PPA-1014</b>	<b>60</b>	<b>9,8</b>	<b>500,4</b>	<b>69</b>	<b>7,04</b>
PPA-1021	22	4,5	294,4	51,87	11,53
PPA-1022	60	2,9	79,92	45,22	15,59
PPA-2011	23,8	31	956,8	217,92	7,03
PPA-2014	60	14,9	500,4	193,44	12,98
PPA-4011	60	19,5	956,8	199,5	10,23

O elemento piezoelétrico gera uma corrente semelhante a uma onda senoidal, necessitando uma retificação para a utilização dessa por sistemas eletrônicos. O sistema utilizou pontes retificadoras de onda completa à diodo, representados na Figura 23, conforme estudos prévios realizados pelo grupo LSI – DELET/UFRGS (Coelho et al. 2016, 2018; Ando Junior et al. 2014). O elemento para armazenamento da tensão retificada, que é considerada contínua

pulsante, é um capacitor. A possibilidade de armazenamento permite que a energia seja aproveitada conforme a demanda e não conforme a geração, que tende a ser variável ao longo do dia e não necessariamente nas horas de demanda. Por último, um elemento dissipador genérico é inserido no sistema, para emular o gasto energético do sistema.

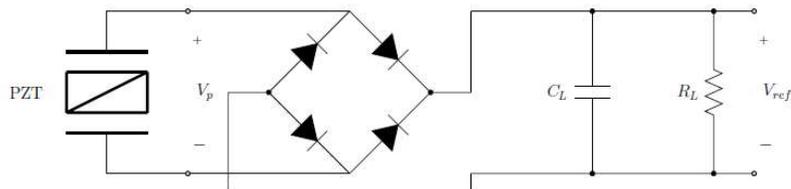


Figura 23 - Esquemático do circuito de retificação

No total, dezesseis elementos piezoelétricos foram previstos, sendo instalados em quatro corpos metálicos. A instalação dos transdutores necessita uma etapa de retificação individual, esquematizado na Figura 24. Este esquema se torna necessário pelo efeito piezoelétrico ser duplo. Os sensores ao serem expostos a energia elétrica, sofrem deformações mecânicas. Se os elementos estivessem interconectados, a energia elétrica gerada seria dissipada pelas outras células através de deformações.

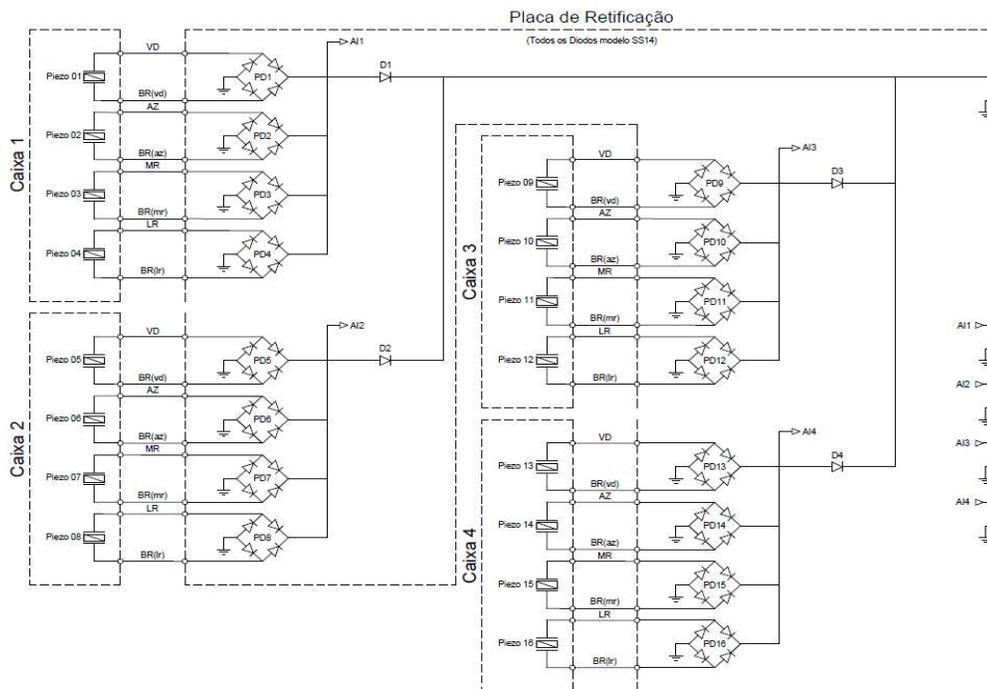


Figura 24 - Representação da retificação dos sinais gerados

A etapa tem duas funções, retificar o sinal alternado para uma corrente contínua pulsante, e a isolamento elétrica nas células, evitando o gasto energético com o efeito piezoelétrico inverso.

Por último, para poder estimar a energia gerada em cada uma das quatro caixas metálicas, foram incluídos quatro diodos. A medição pelas caixas, ao invés dos sensores piezoelétricos individualmente, aconteceu por uma limitação técnica da coleta de dados. A quantidade de canais dos registros não foi o suficiente para receber cada um dos transdutores, portanto, foi escolhido o método por caixas.

O armazenamento da energia foi previsto com a utilização de capacitores de alto valor de armazenamento. Esses supercapacitores apresentam uma densidade de potência (W/kg) maior que baterias recarregáveis e densidade de energia (Wh/kg) de até duas ordens menores. A vantagem dos supercapacitores sobre as baterias convencionais está na resistência interna (ESR) baixa e constante com a carga armazenada. A ESR tem relação direta com as perdas do sistema. Assim a utilização de um elemento de armazenamento com baixo valor de ESR auxilia o funcionamento.

O valor do supercapacitor é de 12 F, com uma limitação em 5,1 V, com uma energia total possível de 156 J. Um diodo Zener é colocado no sistema, com 5,1 V (DZ1) conectado inversamente polarizado. Este componente serve para proteger o armazenamento, mantendo as características de circuito aberto enquanto a tensão não passa do limite de 5,1 V. Ao atingir esse nível, o elemento drena a tensão excedente. A placa de armazenamento pode ser visualizada na Figura 25.

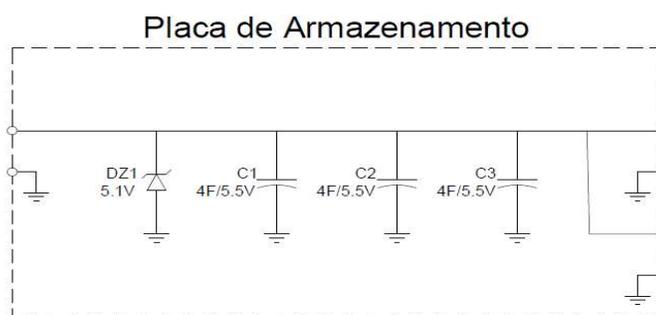


Figura 25 - Esquemático de armazenamento

### 3.2 COLETA DE DADOS

Um equipamento de aquisição e registro de dados foi utilizado para a coleta dos dados que eram gerados pelos protótipos e o nível armazenado pelo capacitor. Para esse fim foi

escolhido o equipamento comercial *FieldLogger*, da fabricante Novus, que possui oito canais de entrada analógico, demonstrado na Figura 26. Na primeira utilização, cinco dos canais foram utilizados da seguinte forma:

- a) Canal 1 (AI1): Coleta da tensão gerada na Caixa 1, configurada para leitura de tensão de 0 a 10 V;
- b) Canal 2 (AI2): Coleta da tensão gerada na Caixa 2, configurada para leitura de tensão de 0 a 10 V;
- c) Canal 3 (AI3): Coleta da tensão gerada na Caixa 3, configurada para leitura de tensão de 0 a 10 V;
- d) Canal 4 (AI4): Coleta da tensão gerada na Caixa 4, configurada para leitura de tensão de 0 a 10 V;
- e) Canal 5 (AI5): Coleta da tensão armazenada nos Capacitores, configurada para leitura de tensão de 0 a 10 V.

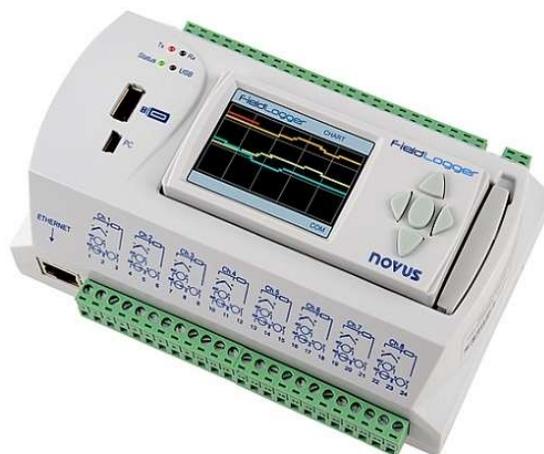


Figura 26 - *FieldLogger*, da fabricante Novus, utilizado para as coletas de dados

O equipamento tem uma capacidade de registro de 1000 dados por segundo, de forma não independente por canal. Desse modo, a taxa de aquisição dos dados nessa configuração foi de 200 Hz por canal. As 200 entradas por segundo em cada canal geravam 86 milhões de entradas por dia, armazenadas em um cartão de memória, facilitando a exportação dos dados para o computador.

Durante o início do experimento, levantamentos manuais foram realizados, registrando o horário e tipo de veículo passante permitindo a posterior checagem com os dados registrados pelo *FieldLogger*. Posteriormente aos levantamentos realizados, a concessionária

administradora da rodovia durante o experimento disponibilizou os dados de tráfego para todos os dias do experimento. Os dados recebidos continham o horário de passagem do veículo na cancela automática do pedágio, além da categoria de pedágio, que variava de acordo com o número de eixos. Esses dados permitiram as análises do comportamento dos sensores durante diferentes picos.

### 3.3 LOCAL DE IMPLANTAÇÃO

A implantação do sistema ocorreu na pista de cobrança automática, da praça de pedágio da rodovia federal BR-290, localizada no município de Gravataí, sentido capital-litoral, demonstrada na Figura 27. A escolha do local de implantação para os protótipos foi devido a estrutura da praça de pedágio e tráfego.

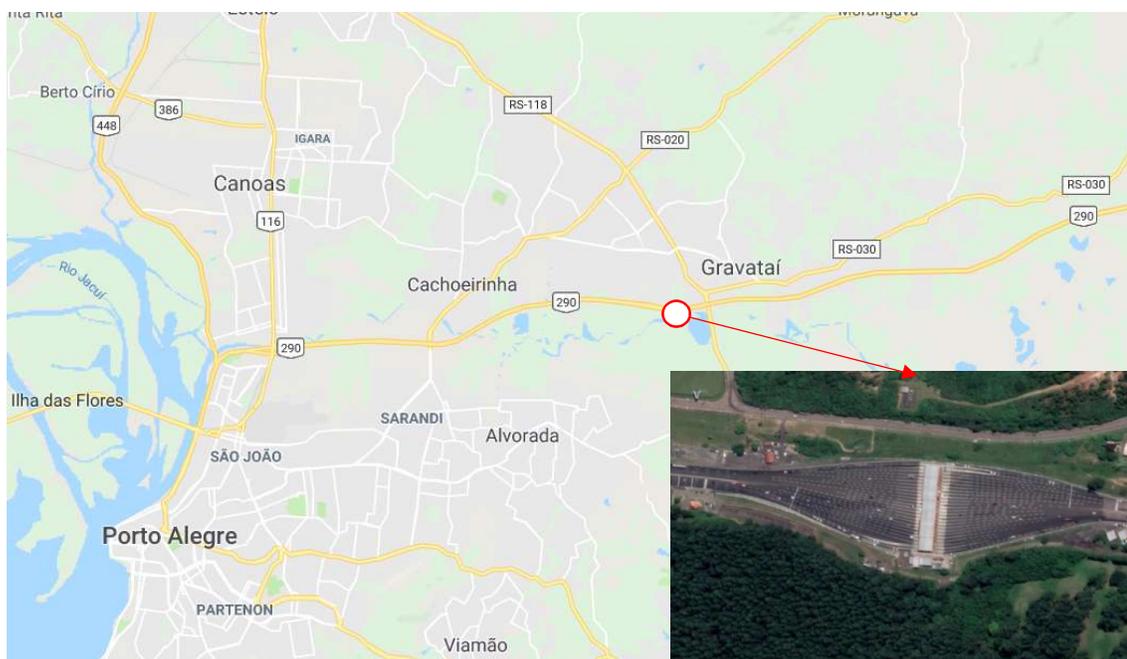


Figura 27 - Local de instalação do Gerador Piezoelétrico

A estrutura da praça de pedágio foi determinante para a escolha, por facilitar a instalação do sistema. O local possui rede elétrica para o abastecimento do *FieldLogger*, pontos adequados para instalação dos componentes eletrônicos, além de melhor acesso aos sensores em comparação com outros pontos da rodovia. A segurança dos equipamentos também foi levada em consideração, com a praça de pedágio possuindo movimentação e monitoração contínuas, evitando possíveis atos de vandalismo ou furtos.

O tráfego por sua vez tem grande importância num sistema piezoelétrico, visto que a geração depende da quantidade de cargas exercidas nos transdutores. A praça de pedágio de Gravataí possui o maior fluxo da rodovia, permitindo uma coleta maior. Além da quantidade, a praça de pedágio possui controle dos veículos passantes, permitindo a relação dos dados gerados com as diferentes categorias.

Por último, a pista automática foi escolhida porque os motoristas não necessitam realizar paradas completas para realizar o pagamento. Desse modo, os veículos devem realizar as passagens próximas a velocidade de 40 km/h permitida na pista, e teoricamente uma maior geração que os veículos parados em fila.

### 3.4 PROPOSIÇÃO DO GERADOR PIEZOELÉTRICO DE ENERGIA

A partir da escolha dos geradores piezoelétricos e do local de implantação, a estrutura metálica do sistema foi desenvolvida para a aplicação em campo. A estrutura escolhida tinha como funções principais resistir às deformações geradas nas pistas, proteger o circuito elétrico das intempéries e fornecer espaço para a vibração do sistema piezoelétrico.

A instalação previu a possibilidade de acesso ao sistema interno, nivelando a parte superior da caixa com a superfície do pavimento de concreto Portland. Como as caixas permaneceriam expostas, tomou-se um maior cuidado para evitar possíveis deformações elevadas que gerariam problemas para o tráfego na rodovia, e conseqüentemente, terminariam o experimento. Programas de análises computacionais foram utilizados para avaliar a deformação ocorridas na pista e a vibração transmitida, conforme Figura 28.

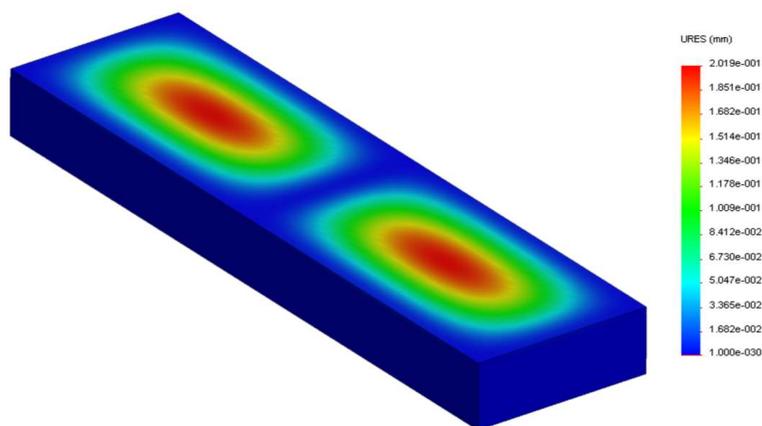


Figura 28 - Avaliação computacional da deformação do conjunto

O corpo do protótipo foi desenvolvido utilizando um perfil de aço estrutural ASTM A36 U 4", com a adição de chapas metálicas usinadas nas laterais e uma no centro da estrutura evitando deformações elevadas na parte superior do sistema. A parte superior do corpo metálico projetado não foi usinada, utilizando-se uma tampa móvel que permitisse acesso aos componentes após a instalação.

Foram construídas 4 caixas, utilizando-se 4 sensores piezoelétricos em cada uma delas. No interior do perfil, foram usinadas peças metálicas para a fixação dos perfis em apenas uma das extremidades, de modo que as mesmas vibrassem livremente quando o conjunto fosse solicitado. O comprimento de cada um dos perfis para a colocação dos componentes foi de 40 cm de comprimento, com 10 cm de largura e 5 cm de altura. a chapa metálica usinada no centro auxiliou para uma melhor fixação da tampa. A Figura 29 demonstra a representação gráfica do protótipo.

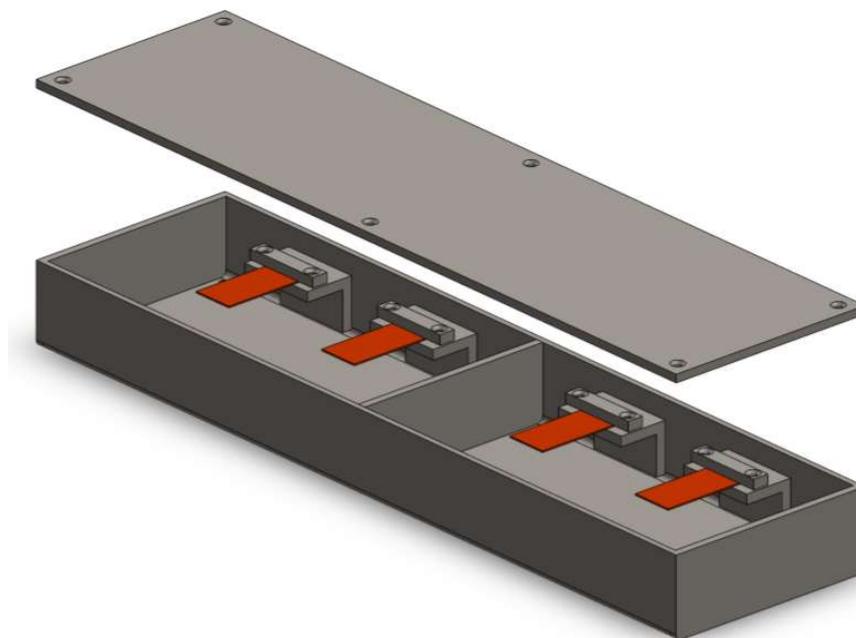


Figura 29 – Representação gráfica da caixa aberta com os transdutores posicionados

A tampa da caixa foi fixada com parafusos escareados e cola de junta de motor. Sulcos foram feitos nas bordas da caixa para criar uma camada maior de adesivo e evitar que o mesmo escoasse por completo ao fechar a caixa. A possibilidade de abertura da tampa reduziu a estanqueidade do conjunto, o que poderia acarretar acúmulo de água no interior. Desse modo, drenos foram projetados para impedir acúmulos de água que possam prejudicar o sistema.

Um orifício foi adicionado na lateral de cada uma das caixas para permitir a passagem dos fios conectados aos transdutores elétricos até o circuito projetado, e um prensa-cabos foi utilizado para evitar a entrada de água pela abertura. Essa entrada do cabeamento é observada na Figura 30.

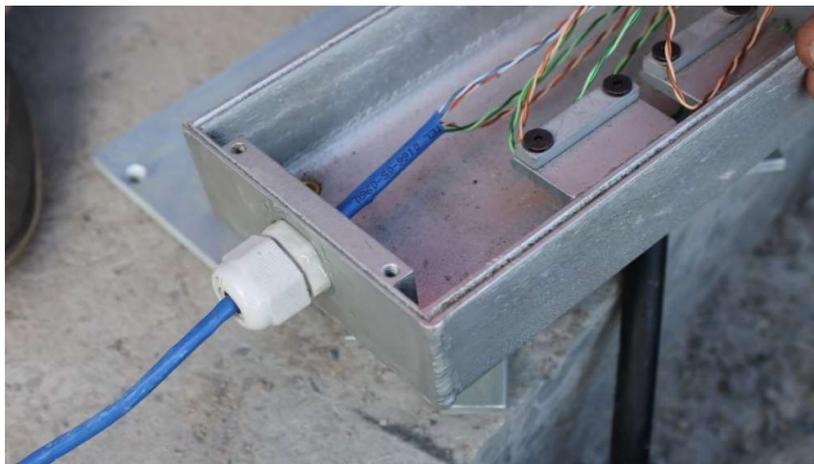


Figura 30 - Prensa-cabos posicionado no sistema garantindo a estanqueidade da caixa

Uma ancoragem foi realizada na parte inferior de cada uma das caixas, com aproximadamente 5 cm de altura, evitando possíveis deslocamentos do conjunto. Essa fixação é observada na Figura 31.

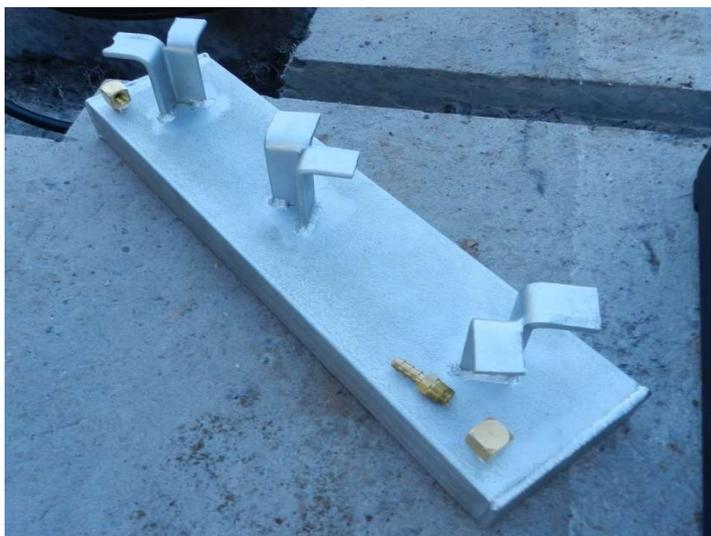


Figura 31 – Detalhe da drenagem e ancoragem das caixas

Internamente, as bases dos transdutores piezoelétricos foram soldadas na lateral da caixa. Uma pequena barra metálica fixava os transdutores no console através de pressão, sem a

utilização direta de parafusos ou soldas nos sensores, permitindo a remoção. O restante do espaço interno permitiu a passagem do cabeamento até o circuito e a livre vibração dos transdutores piezoelétricos e espaço para adições de massas nas pontas. O espaço interno adicional foi necessário para as possíveis modificações em campo, permitindo acessibilidade ao sistema. A caixa finalizada antes da instalação e passagem do circuito eletrônico é representada na Figura 32.



Figura 32 - Caixa finalizada antes da instalação

O posicionamento das caixas na pista foi projetado de modo que ficassem duas caixas em cada trilho de rodas. As caixas foram nomeadas de 1 a 4, conforme a proximidade do bordo esquerdo da faixa, local onde ficou posicionado o *FieldLogger*. O afastamento dos protótipos do centro da faixa é de 80 cm. No lado direito da faixa, as caixas 3 e 4 são transpostas em 20 cm, permitindo uma área maior de contato, enquanto no lado esquerdo, as caixas 1 e 2 foram transpostas em 10 cm para permitir diferentes contatos com as rodas dos veículos.

As caixas foram devidamente niveladas com o pavimento e os cortes preenchidos com o material Viagraute Acelerado, um graute com cura acelerada. O material em pó feito com uma mistura de cimentos especiais recebeu água no local, aproximadamente 12%, gerando uma pasta com uma cura mais rápida que cimentos tradicionais, permitindo a abertura da pista poucas horas após a aplicação. A sequência de instalação do sistema pode ser observada através da Figura 33.



Figura 33 - Instalação dos corpos metálicos na Rodovia. (a) Preparação na via para instalação; (b) Colocação das caixas e eletrodutos nos cortes; (c) Nivelamento das caixas com o pavimento; (d) Preenchimento com graute acelerado (e) Colocação dos transdutores no local; (f) Impermeabilização das caixas com adesivo; (g) Caixas Finalizadas na via; (g) Fieldlogger configurado para recepção dos dados.

### 3.5 UTILIZAÇÃO DE MASSAS DE PONTAS

A utilização de um protótipo com tampa permitiu que modificações fossem realizadas durante o período de experimento, procurando maiores ganhos de energia. Uma das modificações realizadas foi a colocação pequenas massas nas pontas dos sensores piezoelétricos. Diferentes massas foram utilizadas em conjunto com diferentes componentes eletrônicos para o armazenamento da energia. Desse modo, o sistema apresentou duas configurações principais diferentes durante o período, identificadas como Configuração A e Configuração B. A configuração B foi subdividida em duas etapas, envolvendo a Configuração B1 e B2. As datas importantes de alterações no sistema são detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Datas das modificações do sistema

Datas	Modificação
28/05/18	Término da instalação – início do experimento
29/05/18	Conclusão dos testes & ajustes iniciais
30/05/18	Instalação das massas de 6,1 g nas pontas
04/06/18	Início da coleta como configuração A com elemento resistivo <sup>6</sup> .
08/06/18	Instalação do capacitador para início do armazenamento de energia
08/06/18	Início da coleta na Configuração A com supercapacitor
14/06/18	Término da coleta das quatro caixas na Configuração A
15/06/18	Preparação para testes da Caixa 1 (Início Configuração B1 <sup>7</sup> )
16/06/18	Início da coleta de dados com a Caixa 1 (na Configuração B1)
20/06/18	Instalação das massas de 16,7 g nas pontas das demais caixas e início da coleta (Configuração B2 <sup>8</sup> )
03/07/18	Final do experimento e retirada dos Transdutores

#### 3.5.1 Configuração A

A Configuração A consistiu na adição de parafusos, como corpos de massa, pesando no total 6,1 gramas em cada transdutor. A inserção de massas nas pontas dos transdutores é

<sup>6</sup> O uso de resistores associado permite a determinação da energia geradas pelo sistema, mas no supercapacitor. A configuração A representa as Caixas 1 a 4 com 6,1g de ponta de massa e coleta de potência e energia.

<sup>7</sup> A configuração B1 é uma configuração de testes para melhorias do sistema. Refere-se à Caixa 1 com os piezos individualizados e as caixas 2 a 4 conectadas ao supercapacitor para permitir a determinação da energia estocada por tempo.

<sup>8</sup> Nesta configuração houve a adição de massas de ponto, elevando-as para 16g, com o mesmo arranjo de coleta de dados.

utilizada na bibliografia, como exemplo Song et al. (2016). O sistema com a adição dos parafusos pode ser observado na Figura 34.



Figura 34 - Corpos de massa na configuração A.

Essa primeira configuração manteve-se fiel ao circuito elétrico descrito anteriormente, com exceção de coleta de dados por 5 dias com um resistor de 100 k $\Omega$ , para permitir o cálculo da potência gerada durante esse período. Após esses 5 dias, o sistema foi reconectado no supercapacitor novamente para a possibilidade de armazenamento de energia.

### 3.5.2 Configuração B

#### 3.5.2.1 Configuração B1

Após a configuração A realizada, a caixa 1 foi modificada para a realizações de testes para a avaliação do impacto das diferentes massas nas pontas do sistema piezoelétrico. A reestruturação da Caixa 1, enquanto as demais caixas permaneceram com as massas de 6 gramas, foi identificada como Configuração B1.

Ao perceber a melhora da qualidade dos dados coletados a partir da colocação dos parafusos como corpos de massa, e na busca de um maior controle sobre a geração individual dos transdutores piezoelétricos, a caixa 1 foi aberta e reestruturada. Pequenas placas de cobres de aproximadamente 16,7 gramas foram utilizadas como corpos de massa. Essas placas de cobres podem ser observadas na Figura 35.



Figura 35 - Corpos de Massa da configuração B

Dentro da caixa 1, cada um dos quatro transdutores piezoelétricos foi modificado para gerar dados comparativos entre os corpos de massa. Desse modo, o Canal 1 do *FieldLogger* foi modificado, e outros três canais foram adicionados, de modo que os quatro elementos piezoelétricos possuíssem um canal específico. Para a realização desse teste, os transdutores piezoelétricos da Caixa 1 foram modificados da seguinte maneira:

- a) Transdutor Piezoelétrico 1 conectado a um capacitor de  $22 \mu\text{F}$ , utilizando um corpo de massa de 6 gramas;
- b) Transdutor Piezoelétrico 2 conectado a um capacitor de  $22 \mu\text{F}$ , utilizando um corpo de massa de 16,7 gramas;
- c) Transdutor Piezoelétrico 3 conectado a um resistor de  $120 \text{k}\Omega$ , utilizando um corpo de massa de 16,7 gramas;
- d) Transdutor Piezoelétrico 4 conectado diretamente ao *FieldLogger*, portanto, submetido a impedância da entrada do canal, de aproximadamente  $1,1 \text{M}\Omega$ , utilizando um corpo de massa de 16,7 gramas.

Após a realização desses testes na caixa 1, foram adicionadas as placas de cobre no resto do sistema para melhorar a geração de energia e possibilitar o abastecimento do supercapacitor. A caixa 1 permaneceu com a configuração semelhante à Configuração B1 apresentada, para continuar a monitoração do sistema piezoelétrico. O sistema com as Caixas 2 a 4 contendo as massas de ponta de 16,7 g foi identificado como configuração B2.

### 3.6 CÁLCULO DA ENERGIA COLETADA

Os dados coletados durante o tempo de operação do sistema de geração de energia piezoelétrica possuem formato proprietário da fabricante do *Fieldlogger*. O equipamento de coleta armazena a tensão elétrica em cada um dos instantes de leitura. Essa tensão pode ser transformada para potência e energia quando os transdutores estão conectados com a carga resistiva ou então a energia quando os transdutores estão ligados aos capacitores.

A potência elétrica dos resistores é calculada utilizando a Lei de Ohm. A potência elétrica é dada como:

$$P = U \times i \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo:

P – Potência Elétrica (W);

U = Tensão (V);

i = Corrente Elétrica (A).

A corrente elétrica por sua vez pode ser escrita como:

$$i = U/R \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo:

R = Resistência Elétrica ( $\Omega$ )

A partir dessas duas fórmulas, deduz-se que a Potência pode ser calculada através:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad \text{Eq. 3}$$

A partir da potência instantânea é possível obter a energia realizando a integral temporal da potência.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo:

E = Energia Elétrica (J);

t = tempo (s).

No caso dos transdutores conectados a um capacitor, esses dados foram calculados através da equação de energia em capacitores:

$$E = \frac{C.U^2}{2} \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo:

C = Capacitância (F).

A energia disponível foi calculada a partir de programas computacionais (Matlab e Excel) que permitem operações com matrizes, realizando o cálculo de todos os dados de maneira diária.

Para verificação da correlação dos cálculos de energia com os eventos na rodovia, foi utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson, que varia de -1 a 1. Nesta correlação valores maiores do que 0,9 indicam correlação muito forte, enquanto 0,7 a 0,9, forte. Para valores entre 0,5 a 0,7 podem ser consideradas correlações moderadas, e 0,3 a 0,5, fraca. Abaixo disto, a correlação é considerada desprezível. Valores negativos indicam uma correlação inversamente proporcional.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados e análises dos experimentos realizados. Primeiramente, estão expostos os resultados da aplicação do sistema na rodovia, relatando a geração energética, as mudanças que as alterações no sistema geraram e os problemas enfrentados.

Na sequência, discute-se a possibilidade de utilização do sistema para identificação de veículos nas vias a partir das leituras elétricas geradas pelo sistema durante a passagem do tráfego real.

### 4.1 INSTALAÇÃO EM CAMPO

O sistema foi instalado no quilômetro 77 da rodovia BR-290, na pista automática da praça de pedágio, no município de Gravataí, RS, no final do mês de maio de 2018. Após concluída a instalação do sistema e verificação da leitura dos sensores piezoelétricos através de um osciloscópio, as caixas foram seladas e o tráfego reaberto no dia seguinte, conforme a Figura 36.

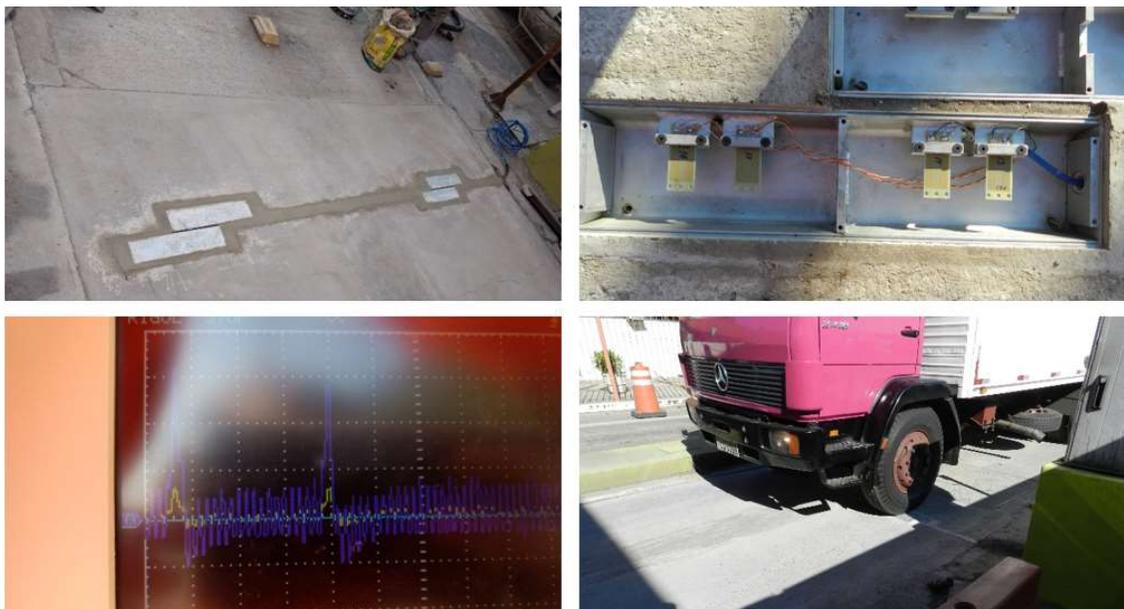


Figura 36 - (a) Corpos metálicos instalados na rodovia; (b) Transdutores Piezoelétricos sem corpos de massa; (c) teste dos sensores ao toque para verificação do cabeamento; (d) passagem de veículo sobre o sistema.

A nomenclatura das caixas seguiu em ordem crescente a partir do bordo esquerdo da pista, onde ficava o equipamento para registro, demonstrado na Figura 37.



Figura 37 - Distribuição das caixas na pista.

As distâncias entre as caixas são demonstradas na Figura 38.

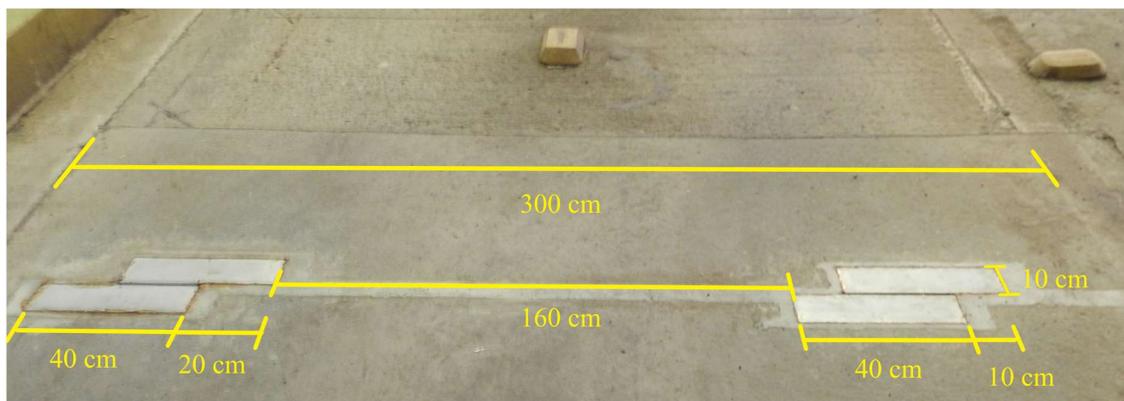


Figura 38 - Detalhamento das distâncias do sistema na pista

As leituras iniciais do *FieldLogger* foram coletadas um dia após a reabertura do tráfego, porém a magnitude da geração não se diferenciava das interferências e da vibração residual a qual os transdutores piezoelétricos eram submetidos. Esse problema foi corrigido com as massas nas pontas, primeiramente conforme a Configuração A, relatada anteriormente.

A aplicação realizada em campo buscou testar a capacidade do sistema de gerar energia enquanto submetido as cargas dos veículos, intempéries e avaliar os possíveis desafios. O sistema manteve-se funcional, sem sinais de desgastes causados pelos veículos nas caixas.

No entanto, um problema encontrado inicialmente foi a falta de vibração perceptível dos transdutores antes da aplicação das massas nas pontas. A maior preocupação com a durabilidade do sistema resultou em um sistema rígido e resistente. As caixas encontram-se no pavimento, em bom estado, passado um ano da instalação. Entretanto, essa rigidez diminuiu também as deformações e vibrações nos transdutores e, conseqüentemente, a sua geração elétrica.

O sistema com apenas 16 transdutores utilizado teve dificuldade de reter a energia num supercapacitor para uso posterior. A quantidade inicial de energia gerada pelo sistema foi pequena, necessitando de alternativas de armazenamento mais eficientes. Os poucos registros de aplicações em pavimentos de teste não demonstram a utilização de métodos de armazenamento de energia (Yang et al. 2017; Cho et al. 2019).

#### 4.1.1 Resultados na Configuração A (com massa nas pontes de 6,1g/sensor)

A partir da adição dos parafusos nas pontas em balanço das vigas piezoelétricas, começaram a aparecer picos de geração nas coletas de dados. Os primeiros resultados gerados pelo sistema foram comparados aos dados de veículos levantados na pista para análise dos picos, demonstrando que os mesmos estavam sendo causados pelos eixos passantes, não por alguma possível interferência no sistema.

A relação inicial de veículos e a resposta elétrica são demonstradas na Tabela 5 e na Figura 39 respectivamente. Os dados de geração registrados demonstram os picos de tensão elétrica coincidindo com as passagens dos veículos. Ressalta-se que a diferença de tempo entre o gráfico e a tabela são devidos à distância entre o sistema e a cancela, onde é realizado o registro pela concessionária.

Tabela 5 - Relação dos Veículos Iniciais no sistema

Horário	Categoria	Eixos
04-06-2018 14:08:07	8	6
04-06-2018 14:08:11	2	2
04-06-2018 14:08:16	4	3
04-06-2018 14:08:21	1	2

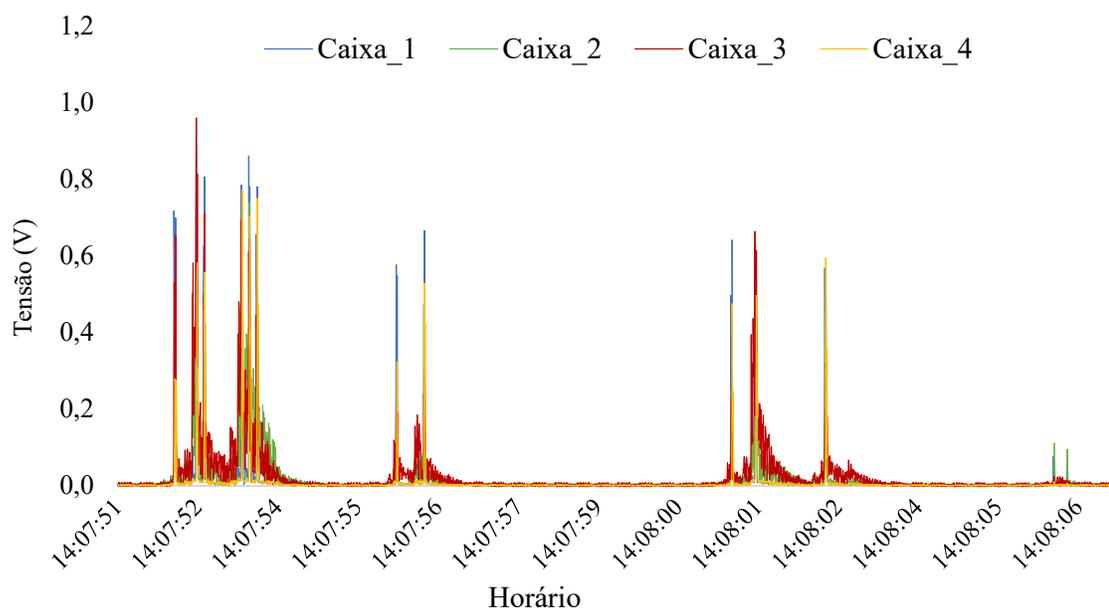


Figura 39 - Relação de veículos iniciais da rodovia – registros no dia 04/06/2018

A capacidade de geração dos sensores piezoelétricos depende do volume de tráfego sobre o sistema. A Figura 40 apresenta o gráfico da geração elétrica por hora e os eixos passantes durante os dias em que a configuração A esteve ativa. Na Figura 41 é apresentado o somatório de energia calculada de todo o sistema e a relação com os veículos comerciais. É possível observar nos destaques do gráfico que existem “descolamentos” entre a geração de energia e a passagem de eixos. As diferenças que impedem uma perfeita aderência da geração com os eixos ocorrem devido às variáveis não controláveis e sem registro, principalmente variáveis como a velocidade e a carga dos veículos.

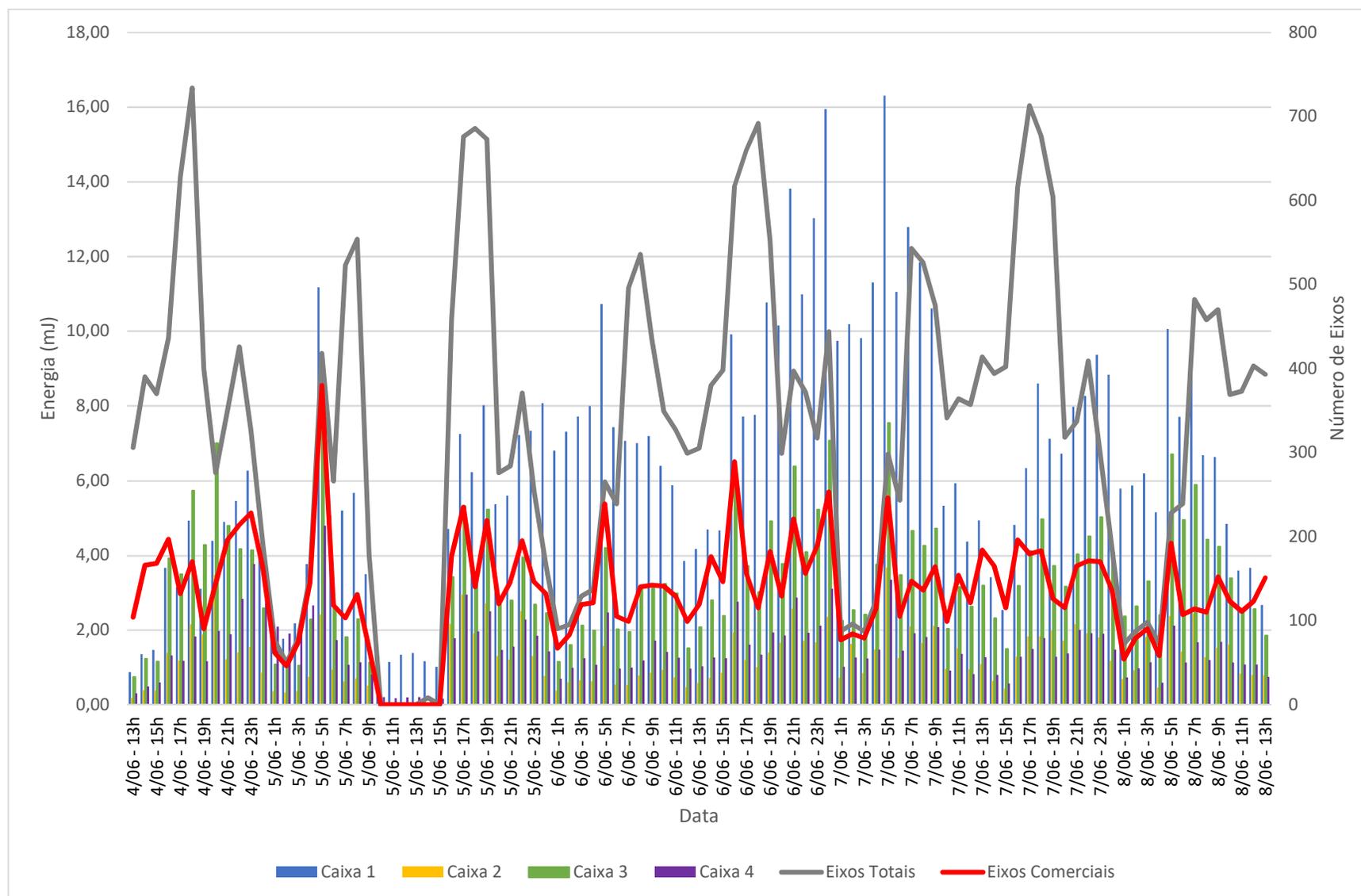


Figura 40 - Geração horária da Configuração A (Caixas 1 a 4 – massa de ponta 6,1g); dia 04/06 a 08/06/2018)

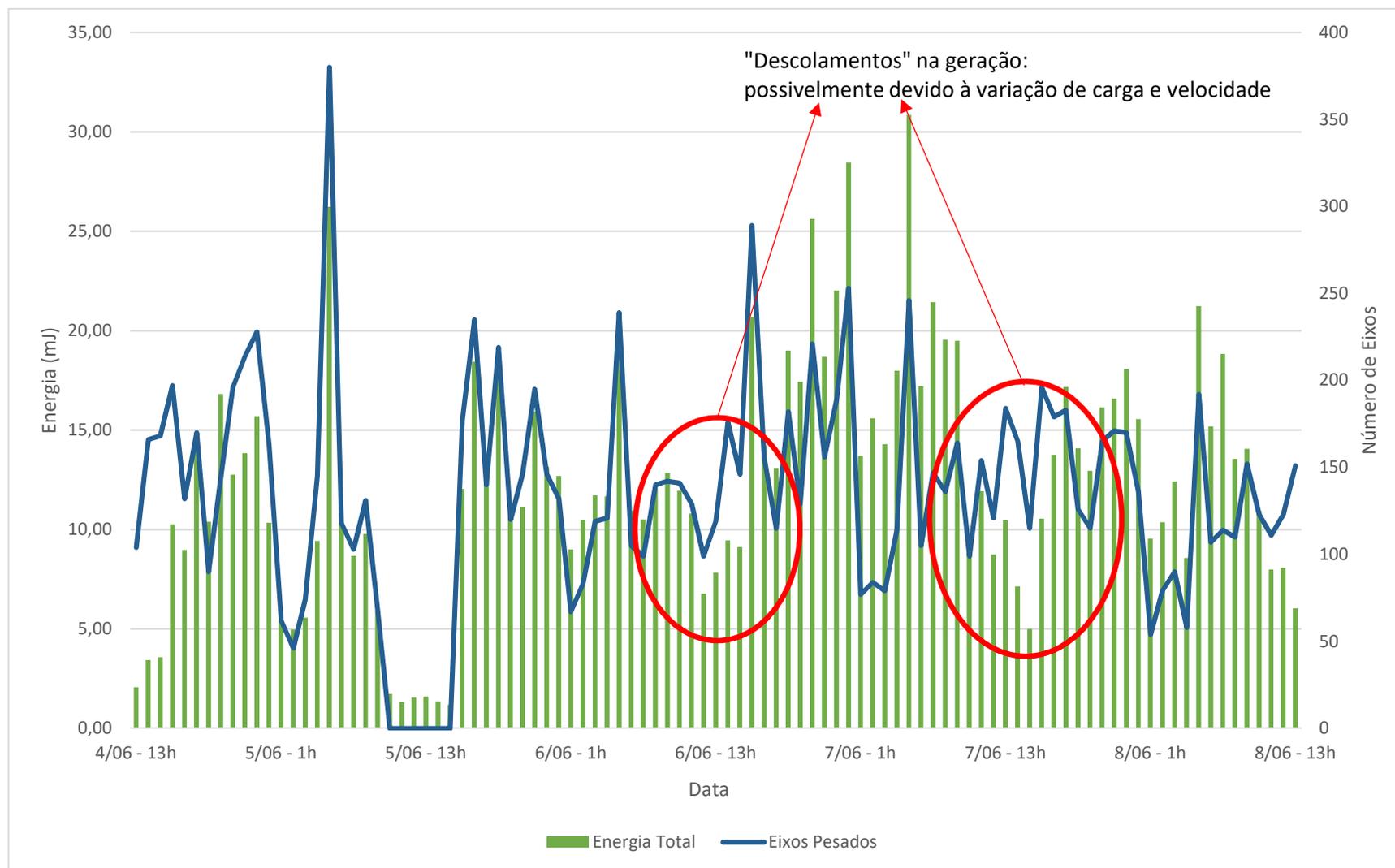


Figura 41 - Somatório da Geração Horária entre caixas e comparativo com os eixos comerciais.

A correlação das passagens dos veículos com a geração elétrica das caixas, e a geração entre elas são apresentadas na Tabela 6. A correlação de Pearson mostra que os veículos comerciais foram os maiores responsáveis pela geração de energia elétrica pelos transdutores, entretanto, outros fatores alteram a geração. O posicionamento das caixas é um fator que interferiu nessa correlação, porque os eixos não impactam nos protótipos igualmente.

Tabela 6 - Correlação de Pearson entre as caixas e eixos.

Correlação de Pearson				
	Caixa 1	Caixa 2	Caixa 3	Caixa 4
Caixa 1	-	0,64	0,72	0,58
Caixa 2	0,64	-	0,90	0,70
Caixa 3	0,72	0,90	-	0,75
Caixa 4	0,58	0,70	0,75	-
Eixos Leves	0,08	0,32	0,32	0,08
Eixos Pesados	0,52	0,67	0,78	0,79

O posicionamento também ajuda a explicar a diferença entre as caixas. As correlações entre os protótipos instalados foram altas, conforme os resultados apresentados. As caixas 2 e 3 foram as posicionadas mais próximas entre elas, o que ajuda a explicar a alta correlação. Além disso, essas caixas tiveram uma correlação com os eixos leves. De maneira similar, as caixas 1 e 4, mais distantes, apresentam a menor correlação entre elas – o que pode ser explicado pela maior irregularidade dos eixos comerciais, tanto em relação às cargas, como comprimentos de eixo, pressão de pneus, internos e externos e distribuição da carga no veículo. Ressalva-se que a análise da geração por caixa está vinculada ao posicionamento dos veículos em relação a via.

Uma alteração de posicionamento sugerida é o distanciamento entre as caixas para melhoria do impacto, ou utilização de 2 protótipos maiores em cada trilha de rodas.

As caixas 1 e 3 apresentaram maiores gerações. As caixas se encontravam a frente das outras duas, recebendo o contato do pneu primeiro, podendo gerar alguma diferença de geração. Outro ponto que pode explicar essa diferença de geração, está no fato das caixas 2 e 4 terem as juntas de materiais elastomérico em contato com a parede onde ficam os transdutores, demonstrada na Figura 42. Esse material pode ter contribuído para diminuir a vibração transmitida até os transdutores piezoelétricos em balanço.

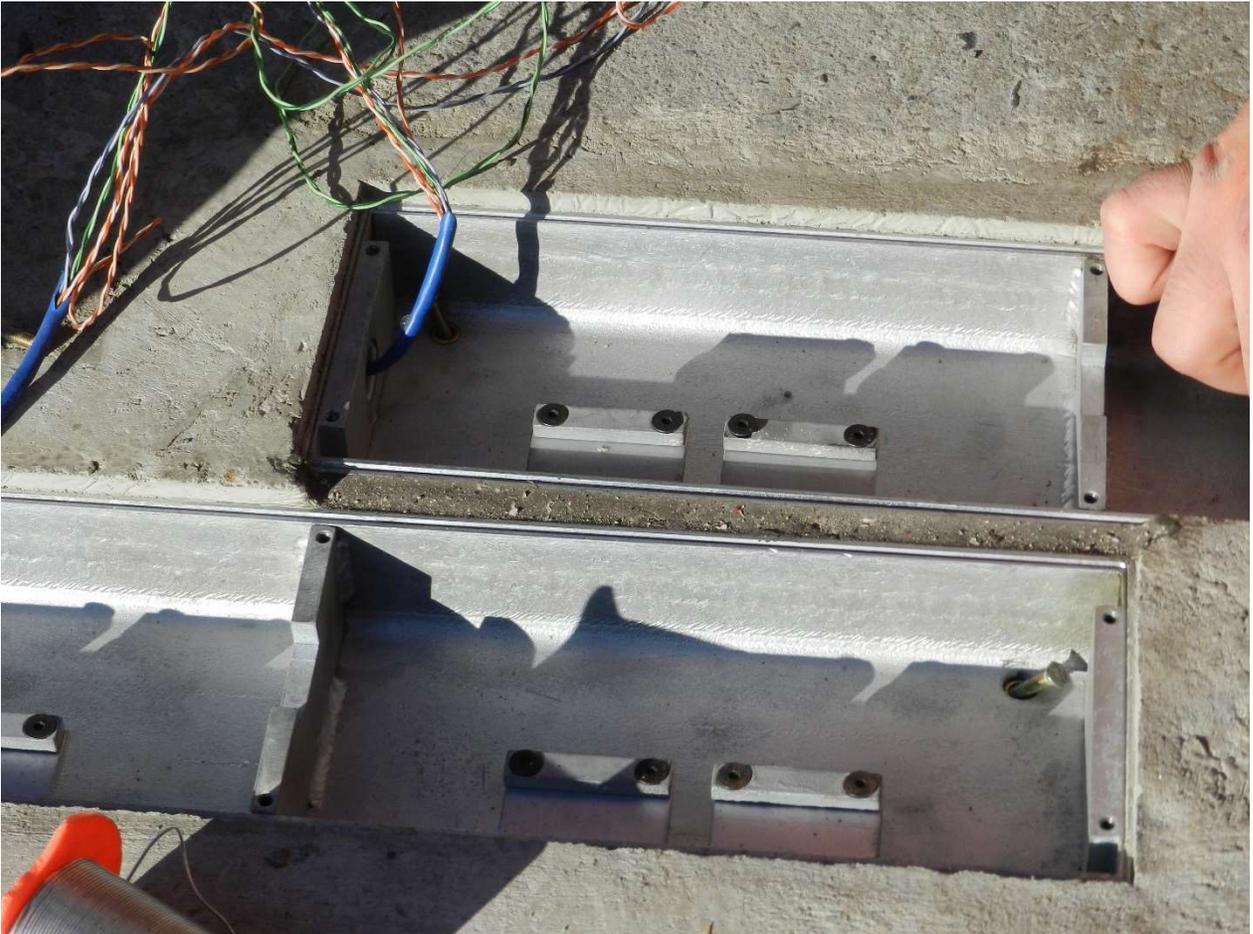


Figura 42 - Junta de material Elastomérico em contato com a parede dos suportes dos Transdutores

A outra diferença que pode ser observada é a vibração maior das caixas 2 e 3 antes e após a passagem dos veículos, enquanto a caixa 1 e 4 possuem os picos mais definidos, com menos vibração, conforme demonstra a Figura 43. A diferença principal dessas caixas é o posicionamento das mesmas, com as caixas 2 e 3 mais centralizadas na via. A centralização destas também ajudam a explicar a maior correlação dos veículos leves quando comparadas aos protótipos 1 e 4. O espaçamento entre a caixa 1 e caixa 4 foi de 1,90m nas bordas mais próximas. Nas bordas mais distantes, a distância foi de 2,70m. Esse espaço permite uma flutuação maior dos eixos, principalmente em veículos mais estreitos, podendo atingir apenas uma das caixas.

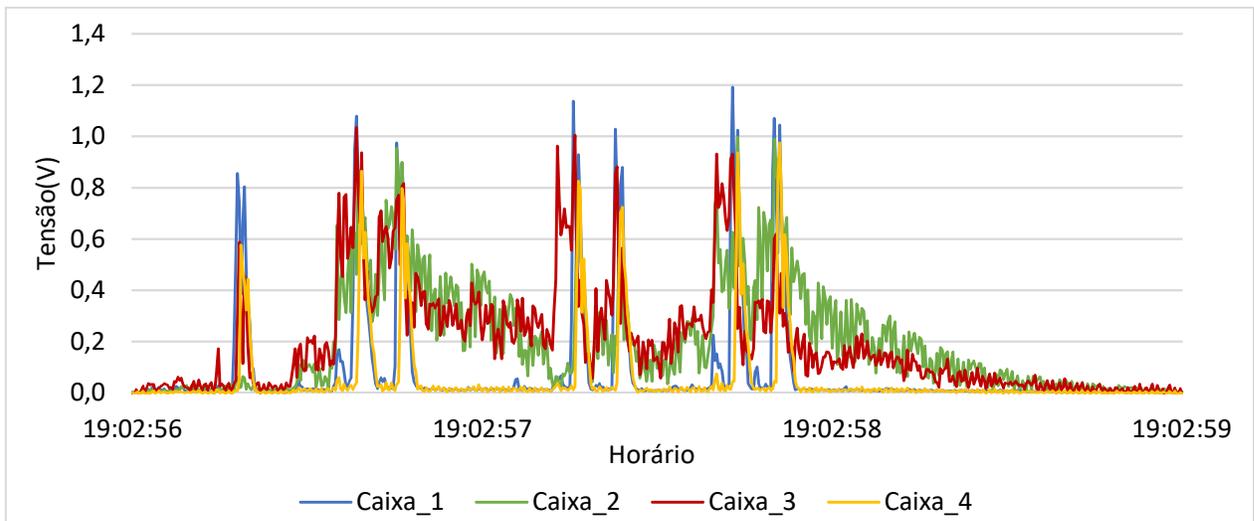


Figura 43 - Passagem de um veículo de 7 eixos sobre o sistema (data: 04/06/2018).

A caixa 1 foi a caixa que gerou os melhores resultados para a geração na Configuração A. O posicionamento da caixa 1 mais ao bordo da pista em relação a caixa 3 pode justificar a melhor geração, por ter um melhor contato com os eixos dos veículos. Observa-se na Figura 44, que a caixa 1 possui picos maiores que a 3. Esse comportamento é similar ao apresentado anteriormente para o veículo de 7 eixos na Figura 43.

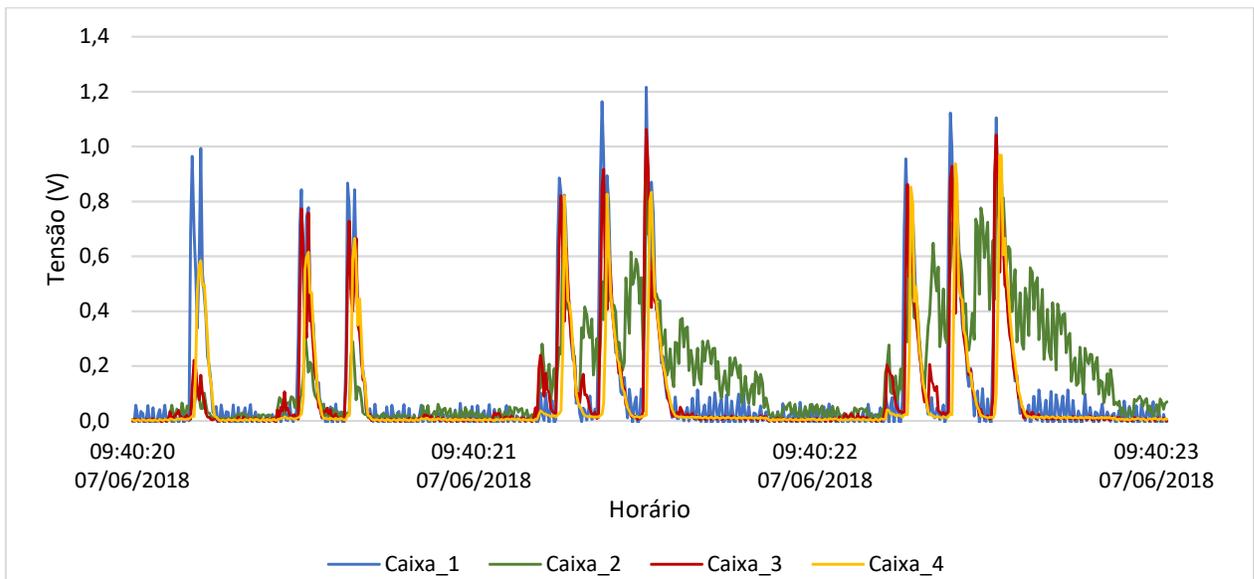


Figura 44 - Diferença dos Picos em cada caixa

Essa diferença fica ainda mais visível na comparação do primeiro eixo a passar pela caixa. O eixo dianteiro normalmente é um eixo simples de rodagem simples. Conforme a largura do caminhão cresce, a roda tende a ter maior contato com as caixas mais afastadas da via, enquanto no eixo de rodagem dupla, as caixas recebem o contato de maneira mais uniforme.

As cargas de cada um dos eixos e a velocidade dos veículos são fatores que conhecidamente impactam o sistema, mas que não tiveram controle durante o experimento. A existência da influência da velocidade e frequência de aplicações das cargas é encontrada na literatura e é demonstrada no Apêndice A, onde ensaios de laboratórios realizados com diferentes massas nas pontas demonstrados.

A influência da carga pode ser observada através das análises dos veículos individualmente, conforme as correlações e passagens de veículos apresentadas. O gráfico da Figura 39, apresentada anteriormente, demonstra a diferença de pico entre os veículos comerciais e os veículos leves.

Outros fatores que podem ter impactado nas correlações obtidas e nos resultados de geração são possíveis interferências elétricas e vibrações provenientes de outras fontes.

A capacidade de geração de energia do sistema é anunciada pelo fabricante como sendo de 0,5 mJ por evento, em condições ótimas. Considerando esse potencial unitário de geração e o evento como sendo o da passagem de cada eixo, para o total de dias que o sistema esteve conectado ao resistor, a geração máxima do sistema seria de 260 J. A eficiência das caixas variou de 0,2% a 1,0%, com uma geração total de 1,2 J, somando toda a geração. Durante esses dias o sistema apresentou uma média de 300 mJ por dia com um volume diário médio de 868 veículos comerciais.

O modelo de geração é um dos motivos pela baixa eficiência do sistema. O sistema adotado funcionando com vibração livre dos transdutores procurou uma maior durabilidade do sistema, mesmo com uma diminuição da geração de energia.

Além disso, as condições de cada passagem de eixo diferem, dificilmente atingindo as condições ótimas do impacto considerado. Mesmo assim, a geração ainda esteve abaixo da expectativa, com uma eficiência de apenas 2,6% caso fossem considerados apenas os impactos dos eixos comerciais. Baseado nesses resultados, a Configuração B foi proposta e testada.

A potência máxima gerada por uma caixa foi de 19,2  $\mu$ W na passagem de veículo de seis eixos, demonstrado na Figura 45

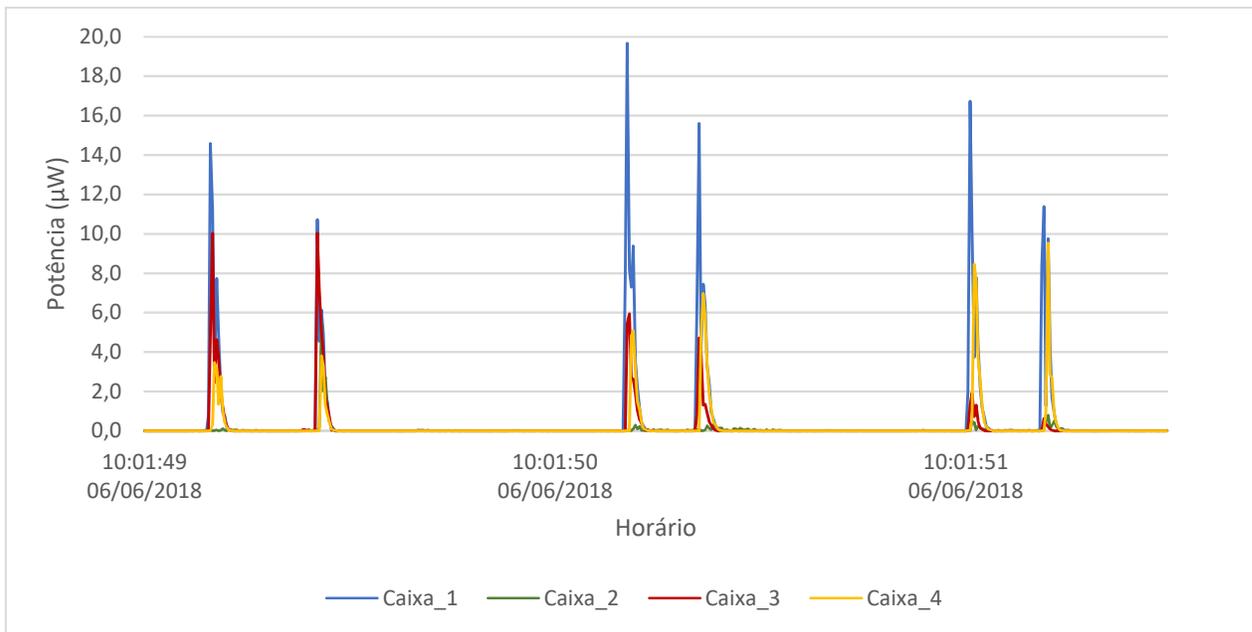


Figura 45 - Pico resultante na potência máxima da configuração A.

#### 4.1.2 Resultados na Configuração B (com massas de ponta de 16,7g/sensor)

##### 4.1.2.1 Resultados da Configuração B1 – Análise da geração com as massas nas pontas

A Configuração B1 envolveu mudanças na caixa 1, para permitir a análise dos elementos piezoelétricos separadamente e a análise da utilização de uma massa maior na ponta dos transdutores piezoelétricos. O comportamento dos sensores foi modificado em relação ao comportamento anterior (aumento em aproximadamente 10g na massa de ponta por sensor)

Os resultados das diferentes configurações dos elementos piezoelétricos da configuração B1, descritos anteriormente, podem ser visualizados na Figura 46, para a passagem de um veículo de sete eixos. A diferença causada pela alta impedância do elemento piezoelétrico 4 em relação ao elemento piezoelétrico 3 é notada, confirmando a diferença causada pela carga resistiva, conforme a bibliografia.

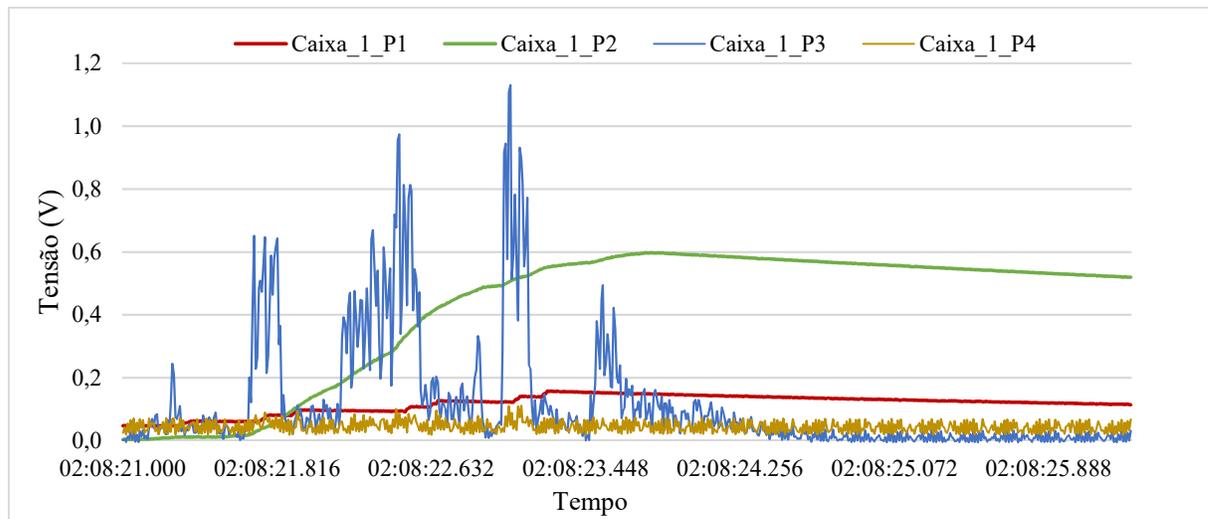


Figura 46 - Comparativo dos elementos da caixa 1 (P1 e P2 conectados a  $22 \mu\text{F}$  e P3 conectado a  $120 \text{ k}\Omega$  e P4 conectado ao *FieldLogger* – canal  $1,1\text{M}\Omega$ ) – dia 17/06/2018

O acréscimo de massa ao transdutor gerou um aumento da tensão produzida durante a passagem dos veículos. Em um comparativo da tensão gerada, o terceiro elemento piezoelétrico da Caixa 1, ligado em um resistor de  $120 \text{ k}\Omega$  foi comparado a tensão obtida pelas outras caixas durante a passagem de um caminhão de sete eixos. A tensão atingiu valores aproximados de  $1,8 \text{ V}$  com apenas um elemento piezoelétrico, próximo as demais caixas com os 4 elementos anteriormente. Outro comportamento notado, é a vibração do elemento piezoelétrico durante toda a passagem do veículo, diminuindo o destaque dos picos comparado aos transdutores anteriores. Essa comparação pode ser visualizada no gráfico da Figura 47.

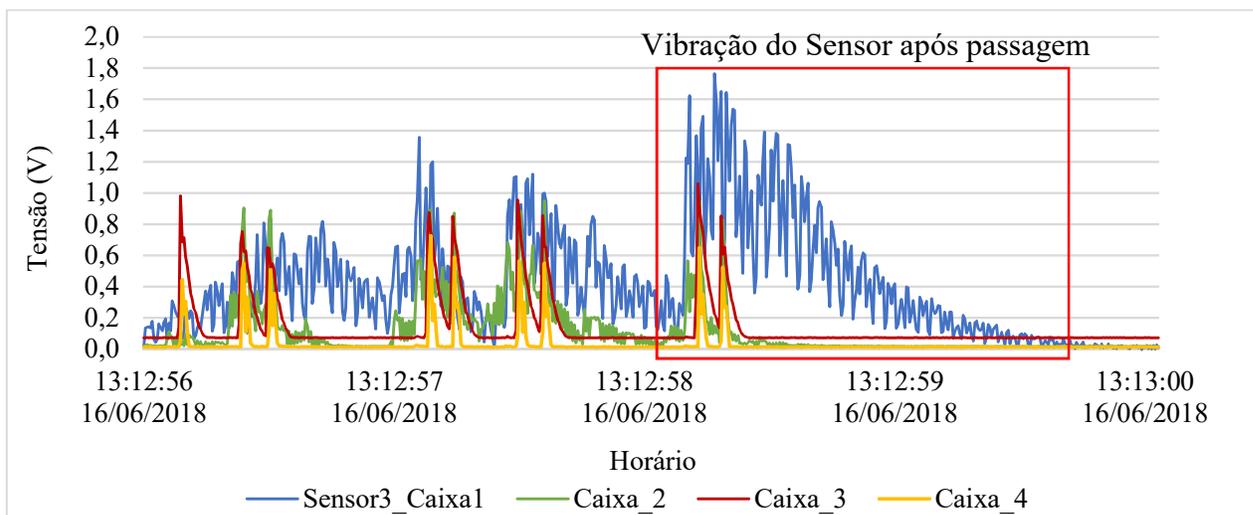


Figura 47 - Comparativo do elemento piezoelétrico 3 da caixa 1 com as demais caixas

Destacado na figura, o comportamento esperado do elemento piezoelétrico, que permanece vibrando após a passagem do veículo, continuando a geração mesmo após a passagem do veículo. Tal vibração residual pode variar conforme as condições do entorno (tráfegos adjacentes) e frequência de passagem de outros veículos.

Uma comparação mais direta da influência dos corpos de massa é demonstrada na passagem do mesmo veículo sobre o gerador. Nessa comparação, foram utilizados os elementos piezoelétricos 1 e 2 nas mesmas condições e conectados a capacitores semelhantes, porém com o elemento 1 com o corpo de massa de 6,1 g enquanto o elemento 2 recebeu o novo corpo de massa.

O capacitor ligado ao elemento piezoelétrico 2 consegue armazenar até 0,8 V de tensão com o acúmulo da tensão gerada pela passagem dos eixos, enquanto o elemento piezoelétrico 1 atinge 0,1 V, conforme a Figura 48.

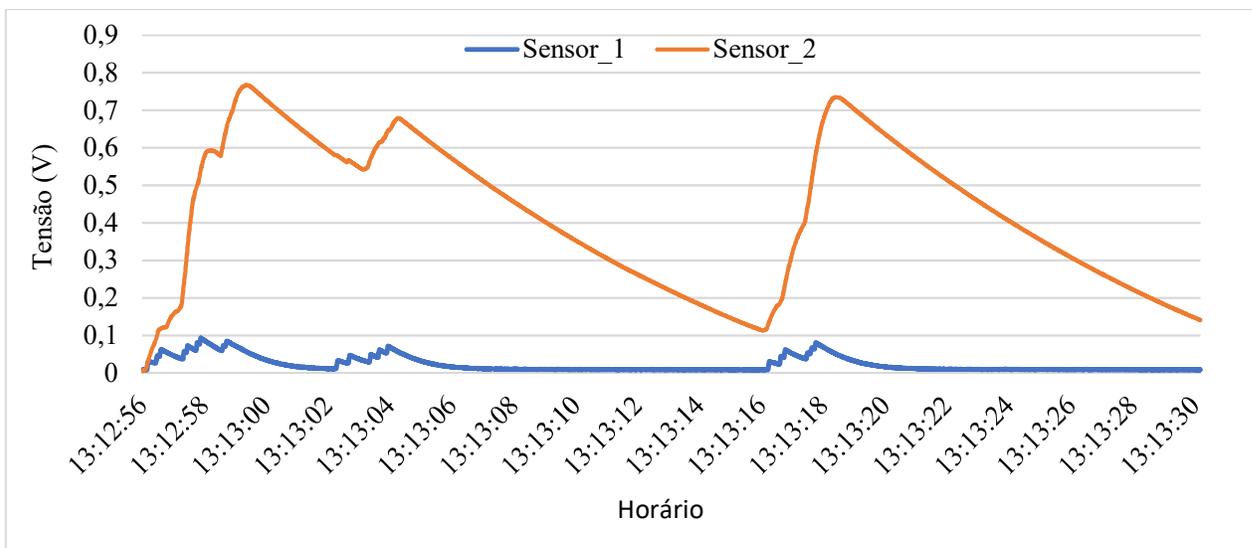


Figura 48 - Comparativo dos elementos piezoelétricos 1 e 2, em condições semelhantes e diferentes corpos de massa

O gráfico demonstra a passagem de 3 veículos comerciais em sequência sobre o sistema. As tensões maiores do sensor 2 fazem com que ocorra um acúmulo no capacitor com a passagem dos eixos. O mesmo efeito ocorre em passagens rápidas de veículos, acumulando energia. No sensor 1, as tensões menores geradas acabam descarregando rapidamente, impedindo maiores acúmulos.

A análise da geração horária é demonstrada na Figura 49, demonstrando a correlação obtida com os eixos da rodovia. Alguns períodos de análise possuem um certo descolamento da geração com o número de eixos. A impossibilidade de controlar carga e velocidade na via, dificultam uma análise mais conclusiva sobre esse comportamento em determinados dias. A Figura 50 demonstra a relação entre os eixos pesados e o somatório dos transdutores da caixa 1.

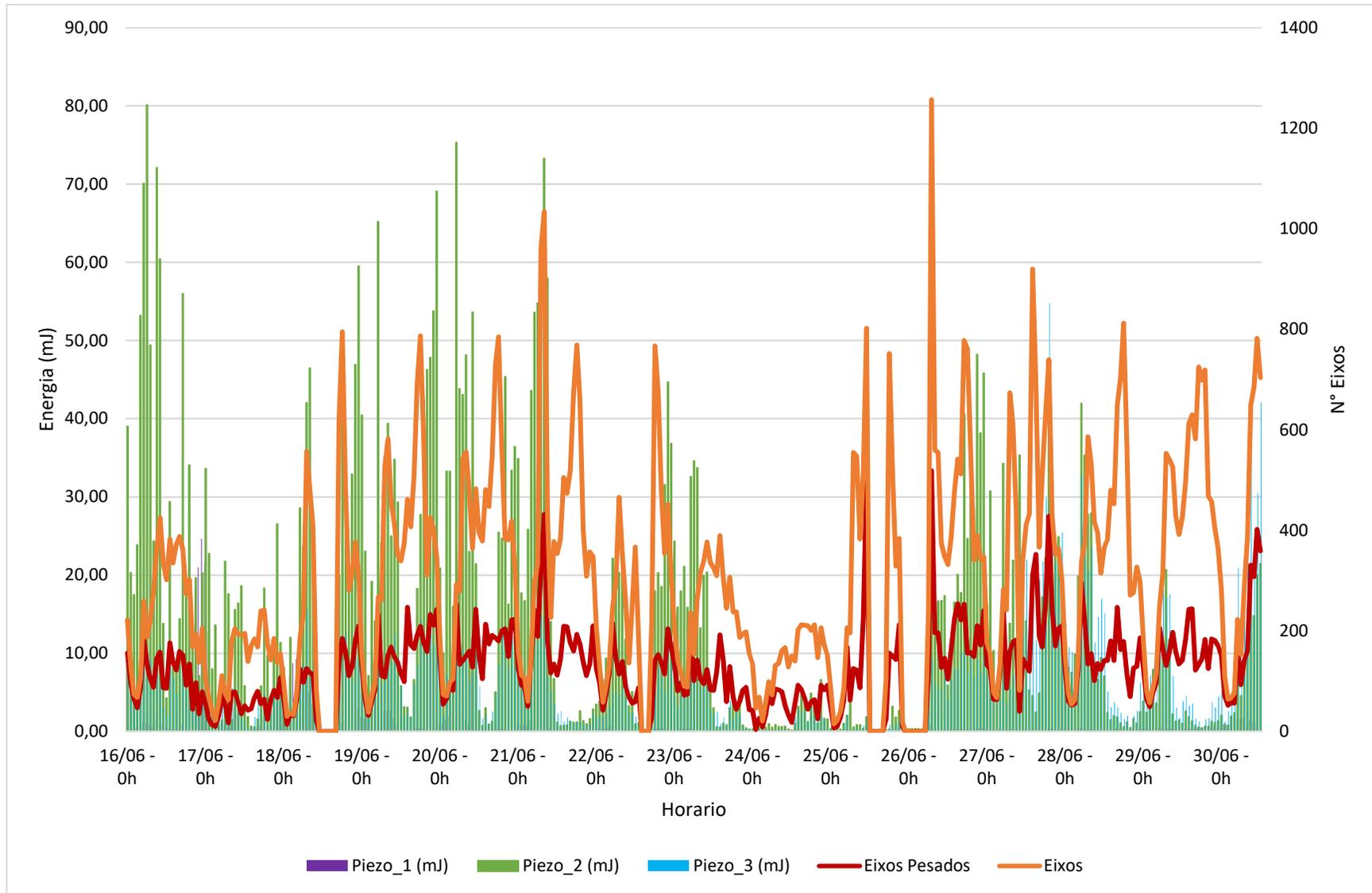


Figura 49 - Geração horária da Configuração B (Caixa 1 – massa de ponta de 16,7g); dia 16/06 a 30/06/2018

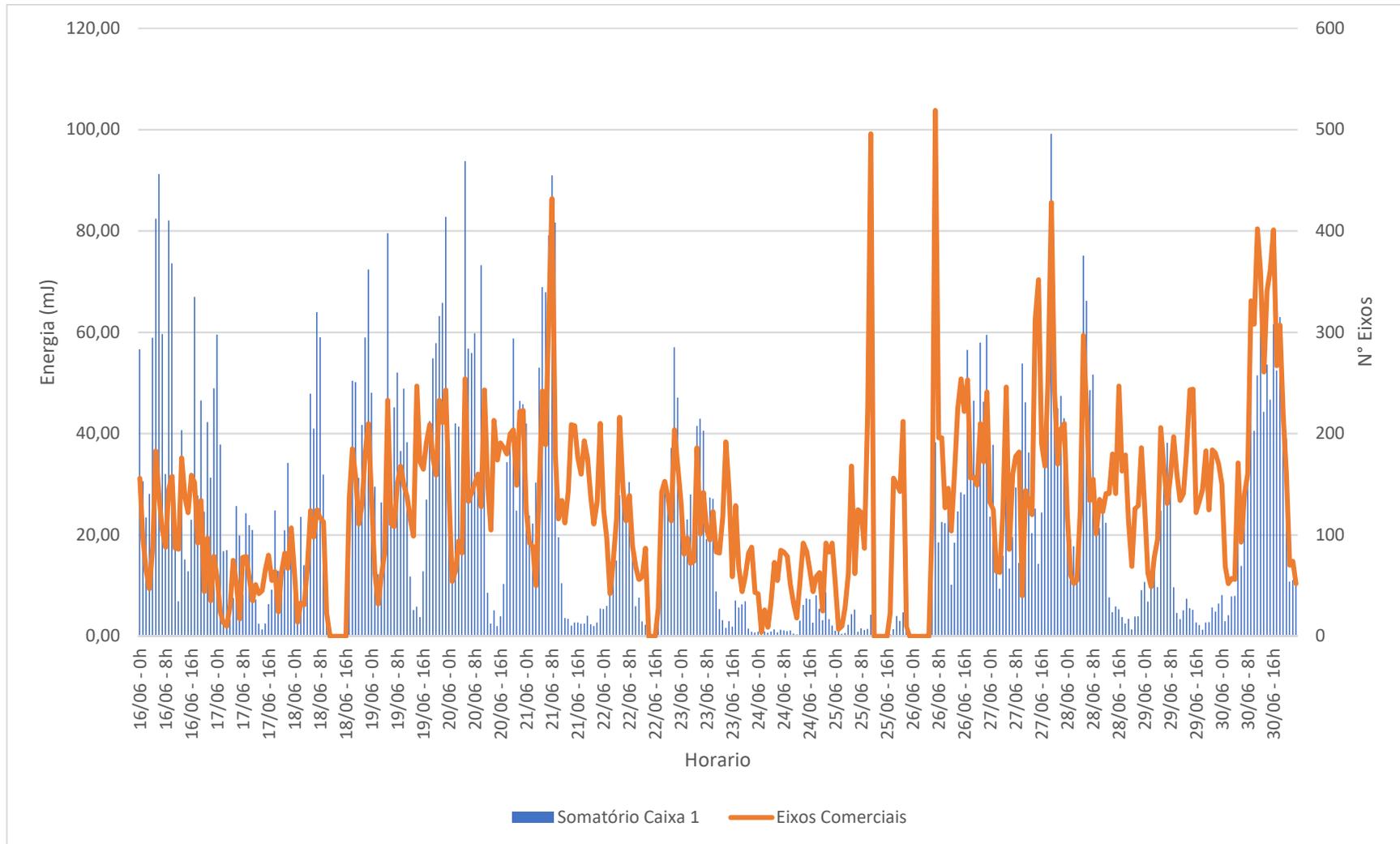


Figura 50 – Geração Horária do total do teste da Caixa 1 comparada aos Eixos Pesados

#### 4.1.2.2 Estimativa de Geração da Configuração B2

A utilização das placas de cobres no sistema para abastecer o supercapacitor impediu a obtenção de cálculo de potência das caixas, relatando apenas a tensão elétrica. As leituras dos picos de tensão nas caixas obtiveram um comportamento conforme o demonstrado pelo transdutor com massa de 16,7g na ponta. Desse modo, a energia possível com os 16 transdutores trabalhando em conjunto foi obtida através da proporção das caixas da Configuração A.

O transdutor com a massa na ponta de 16,7 g conectado ao capacitor de 22  $\mu\text{F}$  teve média de 14,9mJ por hora, aproximadamente 360 mJ por dia, representando uma média diária de 13,5% da energia esperada para o tráfego incidente, em condições ótimas. Ressalva-se que a irregularidade dos eixos leva a variação das solicitações e este percentual é uma considerável melhora com relação à Configuração A, ainda que bastante abaixo da ótima. A eficiência do transdutor é altamente dependente da parcela de eixos comerciais na quantidade total, com melhor eficiência em períodos onde a maior parte são de caminhões. Nos horários que os eixos comerciais variam entre 50 a 80% do total, a eficiência média do transdutor aproxima-se de 25%.

Se a energia média diária fosse mantida para todos os transdutores, a produção de energia seria de 5,76 J por dia. O volume diário médio (VDM) durante os dias considerados foi de 2800 veículos, sendo 770 comerciais. A energia com esse volume diário médio durante um ano seria de aproximadamente 2100 J (0,58 Wh), equivalente a 35 minutos de uma lâmpada LED convencional de 7 W.

Um sistema de tachas de iluminação pulsante para sinalização viária que viesse a ser instalado como balizador na mesma faixa automática poderia ser ligado diariamente durante 30 minutos com a energia média gerada pelo sistema. O sistema proposto, composto de 20 tachas com 3 LED/tacha, aciona as luzes de maneira sequencial no sentido do tráfego, ligando um período de 0,1 segundos a cada 2 segundos. Esse sistema teria um gasto energético de 12 J por hora.

Se o gerador piezoelétrico instalado na via BR-290, onde não houvesse a distribuição de tráfego nas faixas da praça de pedágio, receberia aproximadamente 2500 veículos comerciais/dia. Esse volume de tráfego representaria 18,7 J por dia. Essa geração permitiria os LEDs ligados durante 1 hora e 30 minutos.

O pico de potência, demonstrado na Figura 51, registrado por apenas um transdutor foi de  $55,6 \mu\text{W}$ . Ao comparar com o sistema com as massas de ponta anteriores, isso representa uma melhoria de aproximada de 10 vezes na capacidade de geração.

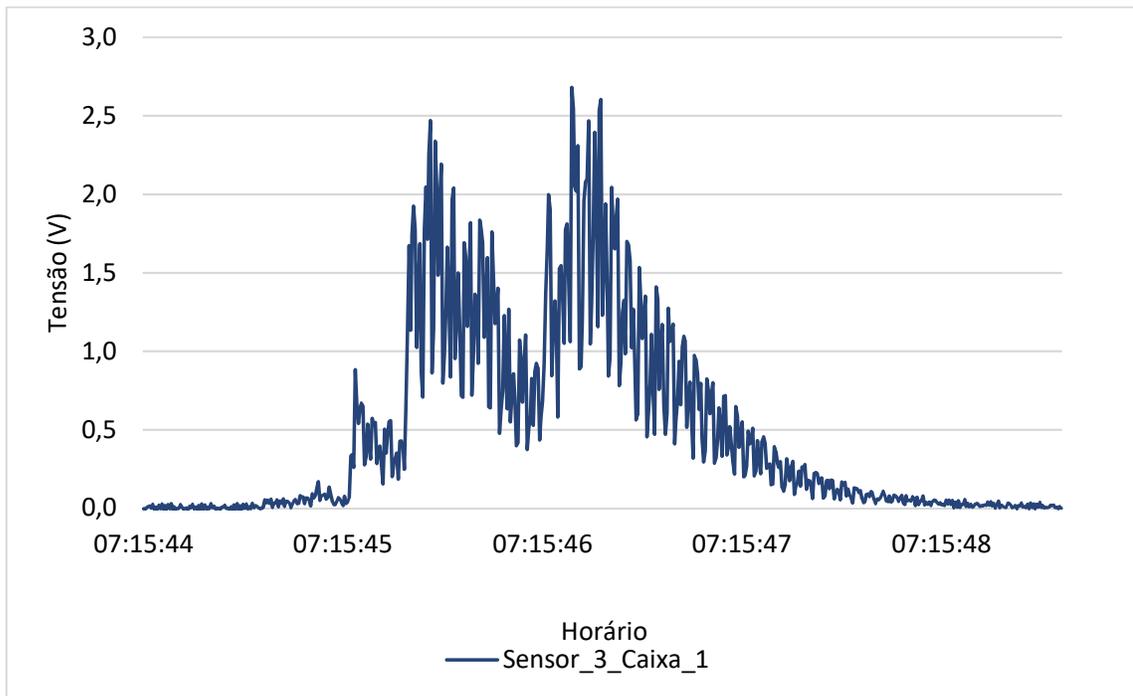


Figura 51 - Pico do transdutor na configuração B.

O pico demonstrado foi atingido por um veículo de 6 eixos e 3 grupos de eixos, sendo inicialmente um eixo simples, um eixo tandem duplo e um eixo tandem triplo no final. Os grupos de eixos são identificáveis, contudo, os picos dos eixos se misturam com a agitação do transdutor.

O valor de potência máxima obtido por um transdutor de  $55,6 \mu\text{W}$  é coerente com os relatados pela bibliografia, mostrando o potencial do sistema de vibração livre. Na bibliografia, pode-se destacar alguns autores com testes experimentais que relataram a potência máxima do sistema, demonstrados na Figura 52:

- Moure et al. (2016) obtiveram  $16 \mu\text{W}$  por transdutor címbalo em teste de laboratório;
- Song et al. (2016) obtiveram  $184 \mu\text{W}$  com um protótipo de 12 transdutores testado em prensa, resultando em  $15,3 \mu\text{W}$  por transdutor;

- Yesner et al. (2017) obtiveram 2,1 mW com 64 transdutores bridge testados em prensas, resultando em 32,8  $\mu$ W por transdutor;
- Xiong e Wang (2016) obtiveram 116 mW com um protótipo com 9 discos piezoelétricos de compressão em pavimento, resultando em 12,8 mW por transdutor;
- Cho et al. (2019) obtiveram 2080 mW utilizando 80 transdutores em flexão em teste em pavimentos, resultando em 26mW por transdutor.

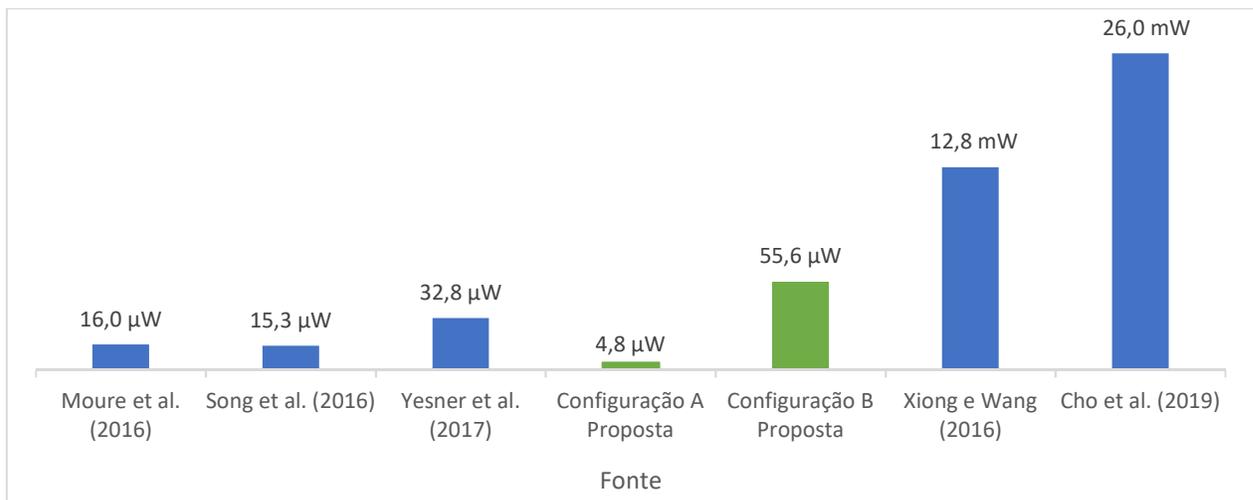


Figura 52 - Potência Máxima Relatada Por Transdutor Piezoelétrico

Ressalva-se que as análises por transdutor são apenas para fins comparativos. A influência do número de sensores não é necessariamente linear com a energia obtida nesses protótipos. Adicionalmente, os transdutores utilizados pelos autores possuem quantidades diferentes de materiais piezoelétricos e diferentes cargas aplicadas, incluindo prensas ou veículos testes.

## 4.2 ANÁLISE CRÍTICA DO EXPERIMENTO

Alguns pontos a serem notados sobre o experimento realizado estão abaixo descritos para possibilitar uma discussão crítica dos resultados e apoiar trabalhos futuros da mesma natureza que venham a ser realizados:

- A utilização de massa nas pontas indica uma melhora no resultado. A maior massa implica uma flecha maior na ponta do sensor, o que aumenta a geração de energia. No entanto, a utilização de massas demasiadamente grandes pode gerar

deformações excessivas, causar fraturas e acelerar a fadiga do PZT. Objetivando identificar a massa de ponta ideal para cada situação, seria pertinente a realização de estudos adicionais.

- Conforme as gerações de energia são pequenas, é importante que haja uma blindagem elétrica ao longo dos cabeamentos para evitar interferências na leitura da energia gerada e possíveis perdas.
- O contato entre o sensor e a caixa é de fundamental importância. Pequenas variações no torque de contato entre os transdutores e seus consoles (no início ou ao longo do experimento) podem alterar suas gerações.
- O posicionamento das caixas é um fator importante a se considerar, visto que explica a maior parte da diferença de geração entre essas. O posicionamento deve procurar garantir a maior quantidade possível de eixos sobre o sistema.
- A variação do resultado entre as caixas 1 e 4 sugere que possa haver uma distribuição não regular das cargas no lado direito e esquerdo dos veículos comerciais, o que, em relação ao gerenciamento do pavimento, pode ser altamente relevante.
- Um certo afastamento entre as caixas poderia promover mais vibração entre elas (sem atenuação da junta) e permitir a determinação adicional da velocidade.
- A utilização de diferentes materiais e comprimentos nos apoios internos dos transdutores piezoelétricos pode gerar uma variação na vibração resultante. É importante ressaltar que essa vibração deve fornecer uma deformação no transdutor. Assim, é importante que a base do conversor esteja devidamente fixada de modo que apenas a ponta em balanço vibre. Tal situação indicaria que a utilização de um material mais flexível para o apoio poderia absorver as deformações e atenuar a geração do sensor.
- A geração poderia ser otimizada utilizando apoios diferenciados que induzissem o elemento a uma deformação maior durante a passagem de veículos sobre o sistema.
- A eficiência do sistema demonstrou que a energia dos veículos leves foi subaproveitada pelo modelo proposto. Constatou-se que 60% dos eixos que passaram pelo sistema pertenciam a veículos leves. Futuras modificações no sistema

devem levar em conta um melhor aproveitamento da geração causada por tais veículos.

- O custo para a aquisição dos transdutores e para a fabricação das caixas utilizadas no sistema, em 2018, foi de aproximadamente R\$ 30.000,00. Tal valor aumentaria cerca de 200% se consideradas a instalação e as obras necessárias para a fixação do material na rodovia, desconsiderando o tempo de trabalho da equipe.
- Considerando apenas o material e a capacidade de geração calculada de 0,58 Wh anuais para um VDMc de 770, o custo seria de 10.000 R\$/Wh se o sistema funcionasse por 10 anos. A vida útil do sistema esperada é similar ao tempo de operação do pavimento, o que reduziria o custo da energia gerada. Deve-se ressaltar ainda o fato desta instalação não ter sido otimizada no que se refere aos custos.
- O sistema pode ser instalado em uma região de maior fluxo, na qual a velocidade desempenhada dos veículos fosse superior. Nessas condições, os valores apresentados tendem a aumentar. Além disso, as caixas poderiam ter uma maior densidade de transdutores, reduzindo os custos de fabricação.

#### 4.3 CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS

A relação observada entre os picos de tensão elétrica e os eixos passantes na rodovia abrem a possibilidade de utilização dos transdutores piezoelétricos como sensores de tráfego. Tal uso é de grande colaboração para gerência da via, e merece atenção. Os dados recebidos de tráfego apontam as categorias dos veículos, demonstradas na Tabela 7 a seguir, conforme relatado pela companhia.

Tabela 7 - Categorias de Pedágio utilizadas pela Concepa. FONTE: ANTT<sup>9</sup>

Categoria	Tipo	Eixos
1	Automóvel, caminhonete e furgão	2
2	Caminhão leve, ônibus, caminhão-trator e furgão	2
3	Automóvel e caminhonete com semi-reboque	3
4	Caminhão, caminhão-trator, caminhão-trator com semi-reboque e ônibus	3
5	Automóvel e caminhonete com reboque	4
6	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	4
7	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	5
8	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	6
9	Motocicletas, motonetas e bicicletas motorizadas	2
Especiais (11, 12 e 13)	Categorias acima de 6 eixos	7+

A placa de cobre na ponta do transdutor piezoelétrico foi responsável por uma maior geração de energia, conforme demonstrada anteriormente, no entanto, a agitação do transdutor aumentou, gerando picos secundários que se confundem com os principais dos demais eixos. Esse comportamento é demonstrado através do gráfico da resposta elétrica de uma sequência de veículos comerciais, na Figura 53. É possível relacionar as curvas com as passagens de veículos, contudo, os eixos não geraram picos claros como os expostos pela configuração A.

---

9

<[http://portal.antt.gov.br/index.php/content/view/4983/Relatorios\\_Anuais\\_\\_Rodovias\\_Federais\\_Concedidas.html](http://portal.antt.gov.br/index.php/content/view/4983/Relatorios_Anuais__Rodovias_Federais_Concedidas.html)>. Acesso em 27 de Março de 2019.

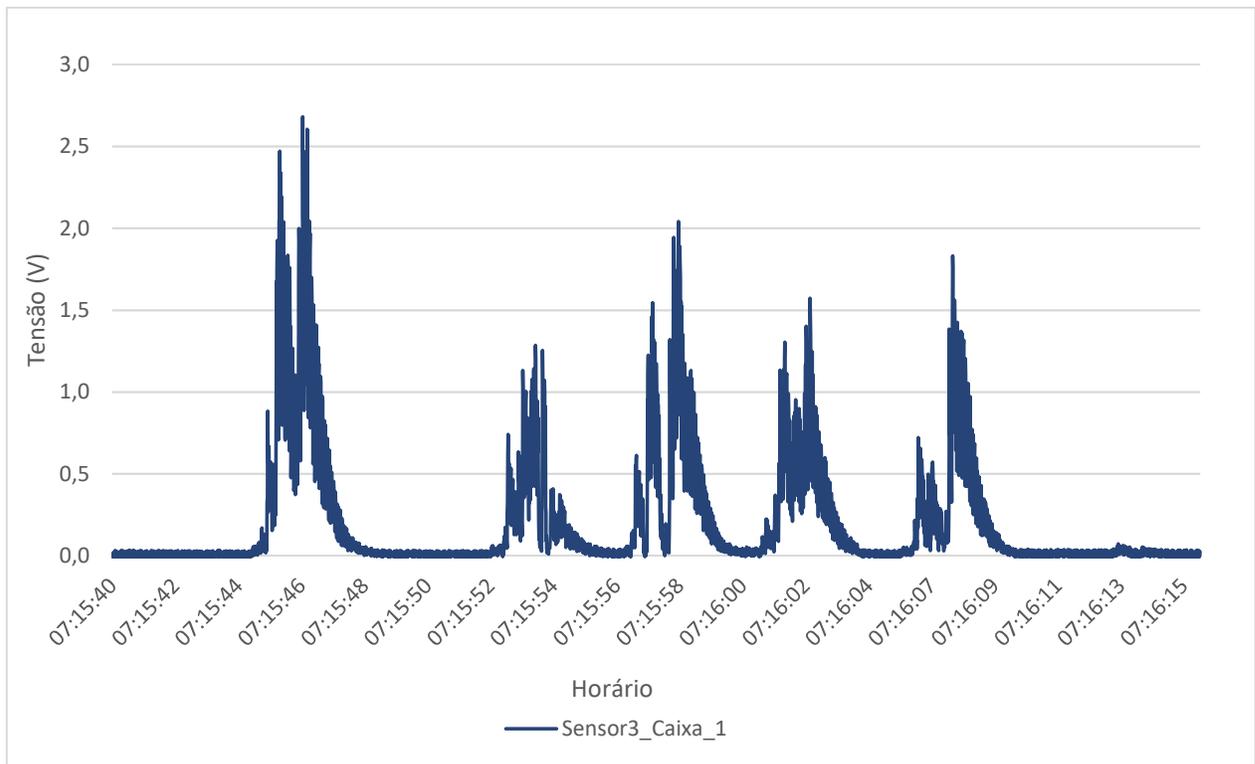


Figura 53 - Passagem de diversos veículos sobre o Transdutor com a massa de 16,7 g nas pontas

A utilização da massa de ponta menor também gerou vibração, contudo em menor intensidade, permitindo melhor a identificação dos eixos dos veículos.

As curvas de geração da configuração A demonstraram picos claros coincidindo com o número de eixos, permitindo identificar a categoria através dos dados registrados pelo sistema. Essa relação é visualizada na Figura 54 onde um veículo de 7 eixos é demonstrado no sistema. A vibração desse veículo foi maior que de exemplos anteriores, porém mesmo assim é possível destacar os 7 eixos.

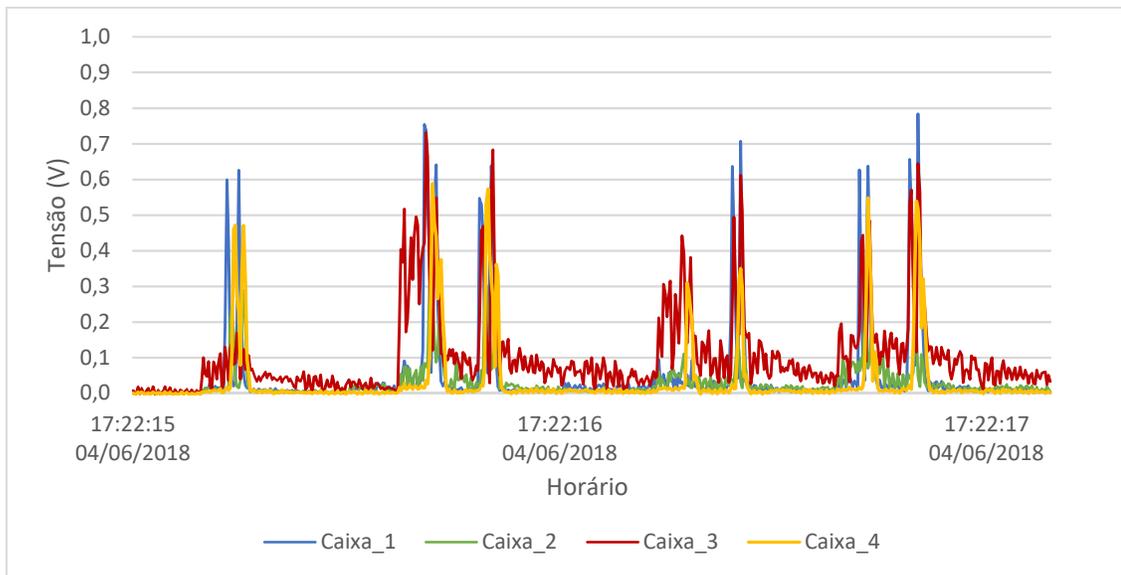


Figura 54 - Veículo de cinco eixos pertencente a categoria 7.

Além da possibilidade da contagem de eixos, a Figura 55 e a Figura 56 demonstram leituras realizadas em dois veículos identificados como sendo da categoria 13 (9 eixos) pela concessionária em dois diferentes momentos. As análises possuem a clareza necessária para distinguir os tipos de eixos, demonstrando que ambos possuem duas categorias diferentes pela classificação do DNIT, mesmo possuindo a mesma quantidade de eixos.

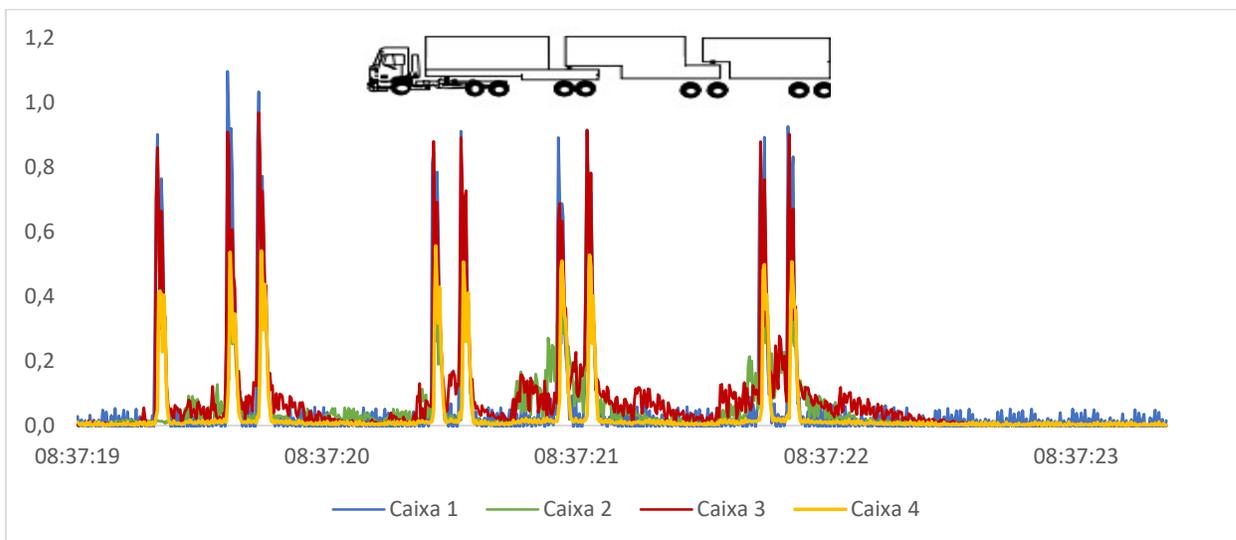


Figura 55 - Passagem de um veículo com Eixo Simples e 3 Eixos Tandem Duplo (data: 05/06/2018)

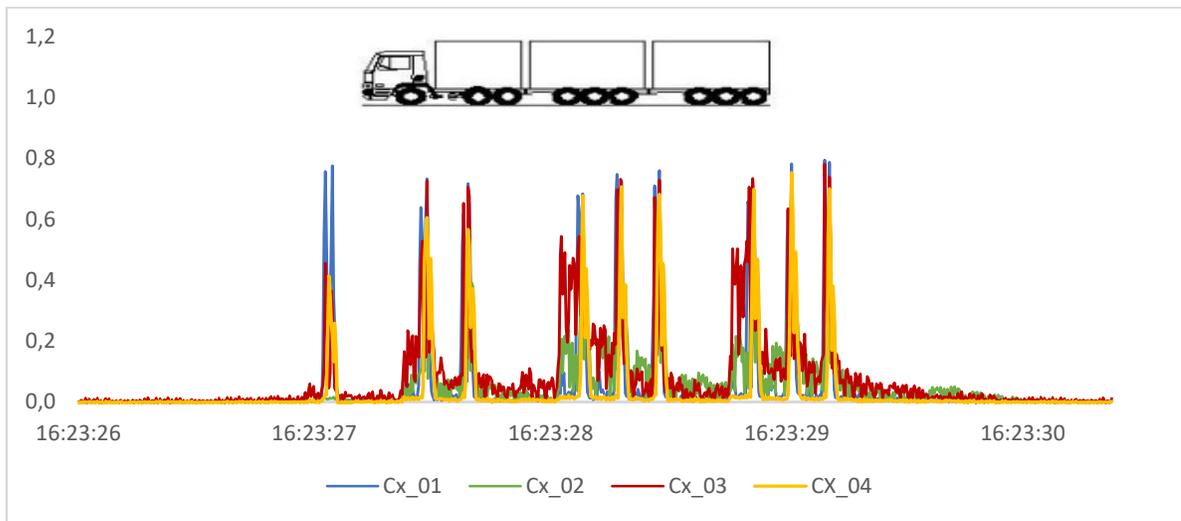


Figura 56 - Passagem de um veículo com Eixo Simples, 1 Eixo Tandem Duplo e 2 Eixos Tandem Triplo (data 04/06/2018).

Outra situação de alteração do comportamento é demonstrada na Figura 57, onde veículos de mesma configuração e número de eixos passam pelo sistema em diferentes horários do mesmo dia. Os picos gerados no sistema são similares, todavia, existe uma grande diferença entre a magnitude.

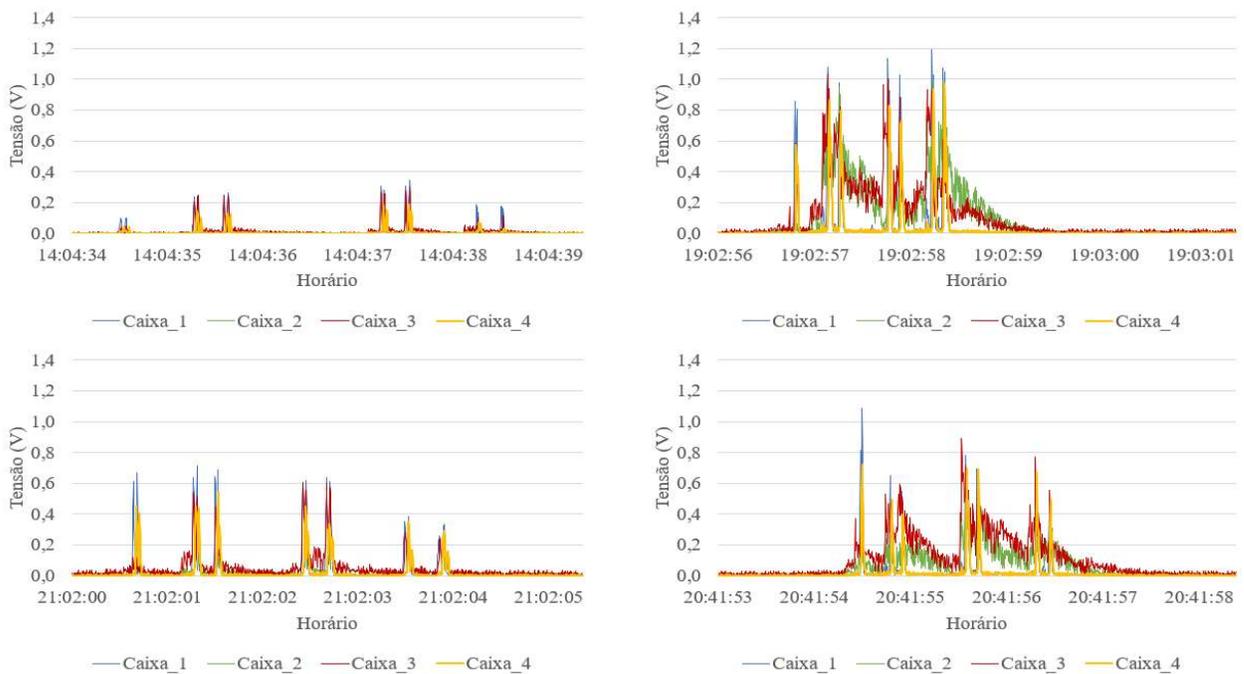


Figura 57 - Diferentes magnitudes de passagens de veículos de categoria 11 (7 eixos) Data: 04/06/2018.

Os gráficos demonstram a diferença entre as magnitudes dos eixos, variando de 0,4 até 1,20V nos picos de tensão. Nota-se também, que o veículo com menores amplitudes e vibração se encontra mais espalhado no tempo, sugerindo que a velocidade é menor que os demais veículos. Ainda é possível destacar outros comportamentos, como a variação entre o eixo com maior magnitude em cada veículo, indicando a possível distribuição de carga.

A velocidade do veículo e a carga de cada um dos eixos alteram a geração do sistema, conforme demonstrado nos ensaios laboratoriais. Baseando-se nesse comportamento, seria possível realizar calibrações em campo, relacionando as tensões elétricas, velocidades e cargas aplicadas.

A velocidade do sistema poderia ser calculada através da diferença entre os picos de tensão elétrica, caso fosse conhecida a distância entre os eixos. Entretanto, como o espaçamento entre eixos varia, a realização dessa conferência torna-se difícil na configuração do sistema aplicado. Uma alternativa seria a utilização de dois geradores afastados no sentido do tráfego, permitindo que a velocidade fosse calculada por meio do tempo transcorrido entre os registros dos veículos em cada gerador.

Conhecendo-se a velocidade e a resposta elétrica, a carga dos eixos poderia ser obtida através das calibrações no sistema e alterações para a diminuição de fatores desconhecidos. A geometria utilizada nesse experimento pode ser otimizada para fins de geração, classificação ou ambos.

Vale ressaltar, que os resultados obtidos nesse experimento foram com velocidade próximas aos 40 km/h, a máxima permitida na pista de cobrança automática. A utilização desse sistema em velocidades superiores pode causar uma diferenciação das curvas da resposta elétrica para as massas nas pontas usadas. Devido a relação de massas nas pontas e velocidade do carregamento, um estudo para a massa mais adequada é necessário para a aplicação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo são apresentadas as conclusões da aplicação de um sistema piezoelétrico de microgeração de energia em uma rodovia em serviço. As sugestões para trabalhos futuros no âmbito da coleta de energia também são apresentadas com base nos desafios e conclusões desse trabalho.

### 5.1 CONCLUSÕES

A aplicação do sistema piezoelétrico atingiu o objetivo principal, mostrando-se funcional e realizando as coletas necessárias durante o período da instalação, resistindo ao tráfego e às intempéries. Além disso, as seguintes conclusões são estabelecidas:

- A potência obtida pelo Gerador Piezoelétrico foi próxima às apresentadas pelos sistemas utilizados na bibliografia para quantidades similares de transdutores piezoelétricos, conforme relatado no item 4.1.2.2. Contudo, é possível identificar uma larga variação na escala dos valores;
- O projeto desenvolvido teve enfoque na durabilidade e cumpriu seu objetivo, visto que manteve o sistema em bom estado durante todo o período de testes. Entretanto, o rendimento dos elementos piezoelétricos apresentou uma eficiência menor do que a esperada, principalmente nos eixos leves. Otimizações na estrutura interna das caixas poderiam melhorar a transmissão dos esforços sem reduzir a durabilidade do sistema;
- A média de eficiência chegou a 13,5% da geração máxima esperada em condições ótimas. Os eventos heterogêneos do tráfego real dificilmente cumprem as condições ótimas em cada passagem de veículo. O posicionamento das caixas considerando eixos largos de rodagem dupla limitou o desempenho do sistema quando submetido a eixos menores;
- O sistema aplicado foi de pequena escala, considerando que foram utilizados apenas 16 sensores piezoelétricos. No Brasil, os elevados custos dos sensores constituem entraves para a implementação de tal tecnologia em larga escala. A

utilização de uma quantidade comparativamente maior de transdutores de valor menos elevados, visando a compensar sua menor eficiência, poderia ser uma solução adequada para atingir a energia desejada;

- Os transdutores piezoelétricos escolhidos demonstraram um interessante potencial de utilização para classificação de veículos nas rodovias, pois as passagens de eixos pelo sistema geraram respostas elétricas claras. Alterações no sistema poderiam conciliar a geração elétrica e a categorização dos veículos, contanto que sejam realizados testes de calibração;
- A falta de controle sobre a carga e velocidade dos veículos dificulta a identificação de outros possíveis fatores de influência em campo, tais como temperatura e interferências da rede elétrica próxima;
- Entre os sistemas citados na bibliografia, os que recebem mais atenção atualmente são os sistemas piezo e termoelétricos. Ambos possuem a vantagem de serem portáteis e possuem fácil aplicação. O termoelétrico depende da temperatura do pavimento, ao passo que o piezoelétrico depende do volume de tráfego. Em suma, a geração de ambos os sistemas continua sendo próxima.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos dados gerados pelo sistema piezoelétrico e as limitações do trabalho, as seguintes sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

- Investigar a utilização de diferentes transdutores piezoelétricos, baseados em flexão ou compressão para a comparação com o sistema utilizado de vibração em balanço;
- Avaliar a utilização de programas computacionais para a identificação automática dos veículos passantes sobre o sistema, permitindo uma contagem e categorização para controle em rodovias;
- Realizar testes no sistema com carga e velocidade controladas para permitir uma calibração na categorização dos veículos que permita a avaliação dos eixos dos veículos, incluindo a carga por eixo;
- Modificar a geometria do sistema, procurando realizar um gerador mais eficiente ou melhorar categorização dos veículos. Em sistemas com maior número de sensores,

a utilização de alguns elementos com pontas de massas menores poderia auxiliar na identificação de veículos, enquanto os demais transdutores garantam a geração de energia;

- Realizar experimentos nos transdutores para avaliar a vida de fadiga do sistema, permitindo avaliar a vida útil para diferentes deformações causadas pelas massas nas pontas dos transdutores;
- Investigar o potencial de utilização de um sistema híbrido entre o sistema piezoelétrico e outro modo de geração, aumentando o potencial de geração por m<sup>2</sup> de pavimento;
- Testar diferentes configurações de circuito eletrônico no sistema, investigando a melhor combinação de carga resistiva, elementos capacitores e a possibilidade de melhorar a capacidade de armazenamento no sistema.

## 6 REFERÊNCIAS

AHMAD, S. et al. Energy harvesting from pavements and roadways: A comprehensive review of technologies, materials, and challenges. **International Journal of Energy Research**, [S.L], v. 43, n. 6, p. 1974-2015, 2019.

ANDO JUNIOR, O. H.; et al. Proposal of a Micro Generator Piezoelectric for Portable Devices from the Energy Harvesting. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)**, Cordoba, 2014.

BOBES-JESUS, V. et al. Asphalt solar collectors: A literature review. **Applied energy**, [S.L], v. 102, p. 962-970, 2013.

CHEN, Y. et al. Mechanical Energy Harvesting From Road Pavements Under Vehicular Load Using Embedded Piezoelectric Elements. **Journal of Applied Mechanics**, [S.L], v. 83, p. 1-7, 2016.

CHIARELLI, A. et al. Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures. **International Journal of Thermal Sciences**, [S.L], v. 112, p. 242-251, 2017.

CHIARELLI, A.; DAWSON, A.R.; GARCÍA, A.. Parametric analysis of energy harvesting pavements operated by air convection. **Applied energy**, [S.L], v. 154, p. 951-958, 2015.

CHO Jae Yong et al. A multifunctional road-compatible piezoelectric energy harvester for autonomous driver-assist LED indicators with a self-monitoring system. **Applied Energy**, [S.L], v. 242, p. 294-301, 2019.

CHUA, H. G.; KOK, B. C.; GOH, H. H.. Modelling and design analyses of a piezoelectric cymbal transducer (PCT) structure for energy harvesting application. **Energy and Sustainability V**, [S.L], v. 186, p. 103-114, 2014.

CLEAN TECHNICA. **Dutch solar bike path solaroad successful & expanding**. Disponível em: <<https://cleantechnica.com/2017/03/12/dutch-solar-bike-path-solaroad-successful-expanding/>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

COELHO, Marcos Antonio; BRUSAMARELLO, Valner João; FLORES, Jeferson Vieira. Avaliação do Impacto da Carga de Saída em um Gerador de Energia Baseado no Efeito Piezoelétrico. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, [S.L], v. 4, n. 1, 2016.

COELHO, M.A.J; FLORES, V.J.; BRUSAMARELLO, V.J. Evaluation of the Output Load Effect on a Piezoelectric Energy Harvester. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, [S.L], v. 29, n. 4, p. 480-488, 2018.

DATTA, Utpal; DESSOUKY, Samer; PAPAGIANNAKIS, A. T. Harvesting Thermoelectric Energy from Asphalt Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 8, p. 12-22, 2017.

DEZFOOLI, A. S. et al. Solar pavement: A new emerging technology. **Solar energy**, [S.L], v. 149, p. 272-284, 2017.

DAWSON A., MALLICK R., HERNANDEZ A.G., DEHDEZI P.K. Energy Harvesting from Pavements. In: Gopalakrishnan K., Steyn W., Harvey J. (eds) Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements. **Green Energy and Technology**. p. 481-517 Springer, Berlin, Heidelberg 2014.

GARCÍA, Alvaro; PARTL, Manfred N.. How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine. **Applied Energy**, [S.L], v. 119, p. 431-437, 2014.

GUO, Lukai; LU, Qing. Modeling a new energy harvesting pavement system with experimental verification. **Applied Energy**, [S.L], v. 208, p. 1071-1082, 2017b.

GUO Lukai, LU Qing. Numerical analysis of a new piezoelectric-based energy harvesting pavement system: Lessons from laboratory-based and field-based simulations. **Applied Energy**, [S.L], v. 235, p. 963-977, 2019.

GUO, Lukai; LU, Qing. Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L], v. 72, p. 761-773, jun. 2017a.

HASEBE, M.; KAMIKAWA, Y.; MEIARASHI, S. Thermoelectric Generators using Solar Thermal Energy in Heated Road Pavement. **2006 International Conference on Thermoelectrics**, [S.L], 2006.

HILL, Davion; AGARWAL, Arun; TONG, Nellie. **Assessment of piezoelectric materials for roadway energy harvesting: Cost of Energy and Demonstration Roadmap**. California, jan. 2014.

JUNG, I. et al. Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications. **Applied Energy**, [S.L], v. 197, p. 222-229, 2017.

KIM, H. W. et al. Energy Harvesting Using a Piezoelectric “Cymbal” Transducer in Dynamic Environment. **Japanese Journal of Applied Physics**, [S.L], v. 43, n. 9, p. 6178-6183, 2004.

KRAEMER, D. et al. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. **Nature materials**, [S.L], v. 10, p. 532-538, 2011.

LEE, C. S. et al. Poly (vinylidene fluoride) transducers with highly conduction poly (3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes. **Synthetic Metals**, [S.L], v. 152, p. 49-52, 2005.

LI, Cong. Road Performance of Common Piezoelectric Transducer for Asphalt Pavement Energy Harvesting. **Applied Mechanics and Materials**, [S.L], v. 746, n. 746, p. 1491-1494, 2015.

LI, Z. et al. Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests. **TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY**, [S.L], v. 62, n. 3, p. 1065-1074, 2013.

MARKINS, J. C. (2009). Technology readiness assessments: A retrospective. **Acta Astronautica**, 65 (7), p. 1216-1223

MOURE, A. et al. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. **Energy Conversion and Management**, [S.L], v. 112, p. 246-253, 2016.

NORDMANN, Thomas; CLAVADETSCHER, Luzi. PV on Noise Barriers. **PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS**, [S.L], v. 12, p. 485-495, fev. 2004.

PAPAGIANNAKIS, A. et al. Energy Harvesting from Roadways. **Procedia Computer Science**, [S.L], v. 83, p. 758-765, 2016.

PASCUAL-MUÑOZ, P. et al. Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors. **Applied energy**, [S.L], v. 111, p. 324-332, 2013.

PAVEGEN. **About**. Disponível em: <[www.pavegen.com/about](http://www.pavegen.com/about)>. Acesso em: 01 de maio 2019.

ROSHANI, H. et al. Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study. **Applied Energy**, [S.L], v. 182, p. 210-218, 2016.

ROSHANI, H. et al. Theoretical and Experimental Evaluation of Two Roadway Piezoelectric-Based Energy Harvesting Prototypes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.L], v. 30, n. 2, p. 1-10, 2018.

SODANO, Henry A.; INMAN, Daniel J.; PARK, Gyuhac. Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries. **Journal of intelligent material systems and structures**, [S.L], v. 16, n. 10, p. 799-807, 2005.

SONG, Y. et al. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.L], v. 41, n. 29, p. 12563-12568, 2016.

SULLIVAN C. et al. **Innovation in the production and commercial use of energy extracted from asphalt pavement**, 2007.

VIC ROADS. **SmartRoads**. Disponível em: <<https://www.vicroads.vic.gov.au/traffic-and-road-use/traffic-management/smartroads>>. Acesso em: 09 abr. 2019.

SYMEONI A. **A review on energy harvesting from roads**. 2012. 39 f. Dissertação de Mestrado.

KTH, Estocolmo, 2012.

TAHAMI, Seyed Amid et al. Developing a new thermoelectric approach for energy harvesting from asphalt pavements. **Applied Energy**, [S.L], v. 238, p. 786-795, 2019.

THE GUARDIAN. **world's first solar panel road opens in normandy village**. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2016/dec/22/solar-panel-road-tourouvre-au-perche-normandy>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

THE WAY. **Technology**. Disponível em: <<https://theray.org/technology/the-ray-today/>>. Acesso em: 09 mar. 2019.

WANG, Hao; JASIM, Abbas; CHEN, Xiaodan. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review. **Applied Energy**, [S.L], v. 212, p. 1083-1094, 2018.

WATTWAY. **Applications**. Disponível em: <<http://www.wattwaybycolas.com/en/#applications>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

XIANG, H J; WANG, J J; ZHANG, Z F Shi And Z W. Theoretical analysis of piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements. **SMART MATERIALS AND STRUCTURES**, [S.L], v. 22, p. 1-9, 2013.

XIONG, Haocheng; WANG, Linbing. Piezoelectric energy harvester for public roadway: On-site installation and evaluation. **Applied Energy**, [S.L], v. 174, p. 101-107, 2016.

XIONG, H. et al. **Piezoelectric Energy Harvesting on Public Roadways**. In: Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D. C., 2014.

YAO, L. et al. Laboratory Testing of Piezoelectric Bridge Transducers for Asphalt Pavement Energy Harvesting. **Key Engineering Materials**, [S.L], v. 492, p. 172-175, 2011.

YESNER G. et al. **Piezoelectric Energy Harvesting Using a Novel Cymbal Transducer Design**. In: 2016 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (ISAF/ECAPD/PFM). Darmstadt, Alemanha, 2016.

YESNER G. et al. **Evaluation of a Novel Piezoelectric Bridge Transducer**. In: 2017 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (ISAF/ECAPD/PFM). Atlanta, EUA, 2017.

ZHANG, Zhiwei; XIANG, Hongjun; SHI, Zhifei. Modeling on piezoelectric energy harvesting

from pavements under traffic loads. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [S.L], p. 1-12, 2015.

ZHAO, H. et al. Harvesting Energy from Asphalt Pavement by Piezoelectric Generator. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, [S.L], p. 933-937, 2014.

ZHAO, Hongduo; LING, Jianming; YU, Jian. A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, [S.L], v. 120, n. 8, p. 317-323, 2012.

ZHAO, Hongduo; YU, Jian; LING, Jianming. Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, [S.L], v. 118, p. 909-915, 2010.

ZUO, Lei; ZHANG, Pei-sheng. Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions. **Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions**, [S.L], v. 135, p. 1-8, 2013.

## APÊNDICE A – ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Um protótipo reduzido das caixas principais foi criado com o objetivo de avaliar a influência de diferentes cargas e frequências sobre a estrutura contendo o elemento piezoelétrico.

O modelo reduzido foi desenvolvido com a mesma largura e altura do modelo original, porém apenas 10 cm de comprimento e fixação para apenas um transdutor. O posicionamento do sensor no corpo de prova é demonstrado na Figura A 1. O material utilizado para a construção foi o mesmo do original, porém sem tratamento para resistir às intempéries. As tampas laterais não foram adicionadas para não aumentar a rigidez do corpo.

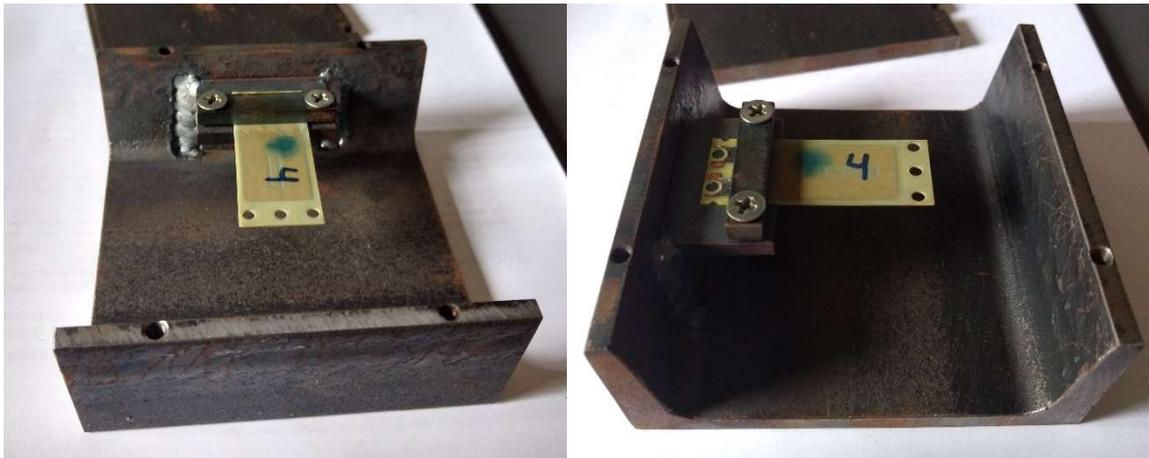


Figura A 1 - Demonstração do corpo de prova com transdutor posicionado

O protótipo foi submetido a testes utilizando uma prensa hidráulica. Uma carga pontual foi aplicada sobre o sistema, conforme Figura A 2, através de carregamentos senoidais, com controle de frequência e deslocamento. As ondas senoidais foram escolhidas pela facilidade de programação no equipamento, permitindo uma avaliação das frequências de cargas no sistema e a influência das massas nas pontas.

O deslocamento aplicado na prensa foi diferente nos ensaios, variando entre 0,3 e 0,5mm na compressão e um pequeno deslocamento de tração foi adicionado para que o pistão encerrasse o contato com o protótipo. Essa configuração foi escolhida para garantir um impacto durante cada ciclo de carga, uma vez que apenas a compressão não garantiria vibração ecoando pelo sistema. A

carga resistiva no transdutor foi de 100 k $\Omega$ , conforme utilizado nas configurações iniciais do sistema em campo. As respostas obtidas foram registradas com um osciloscópio.



Figura A 2 - Protótipo sendo submetido à carga pontual

O sensor foi testado primeiramente sem massa nas pontas. Posteriormente, adicionou-se uma massa de ponta igual a de campo, com uma placa de cobre, totalizando 16,7 gramas. A adição da massa na ponta permitiu ver a diferença do comportamento gerado sobre o sistema.

Um segundo experimento, com mesmo tipo de configuração de carregamento, porém com contato diferenciado entre prensa e o protótipo foi realizado. O contato apresentou uma melhor distribuição da carga, utilizando uma borracha para realizar o impacto com a caixa, demonstrado na Figura A 3. Essa forma de contato procurou uma melhor representação do comportamento em campo.



Figura A 3 - Prensa com impacto no corpo de prova através da borracha

## RESULTADOS DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratórios, realizados com auxílio de uma prensa hidráulica, permitiram clarificar os comportamentos dos transdutores piezoelétricos em campo, além de demonstrar o comportamento mecânico da caixa metálica quando submetida aos esforços.

Os primeiros testes foram realizados com a aplicação de uma carga pontual sobre o sistema. O transdutor foi submetido a três condições de massa nas pontas; a) sem massa; b) placa de cobre de 16,7 g; c) 2 Placas de cobre, totalizando 32g.

O ensaio com a carga pontual foi realizado sob diferentes condições. A primeira situação testada foi sem a presença de massa nas pontas e com deformação controlada de 0,3 mm e 1 Hz de frequência de aplicação. Um ciclo desse carregamento é representado na Figura A 4 e 5. Durante

um ciclo de carga, é possível notar 2 diferentes momentos de excitação no transdutor. Primeiramente, ocorre quando o contato inicia. Na metade do ciclo, ao encerrar o contato, é possível ver um segundo momento de excitação, devido a liberação do corpo de prova pela prensa, gerando uma vibração.

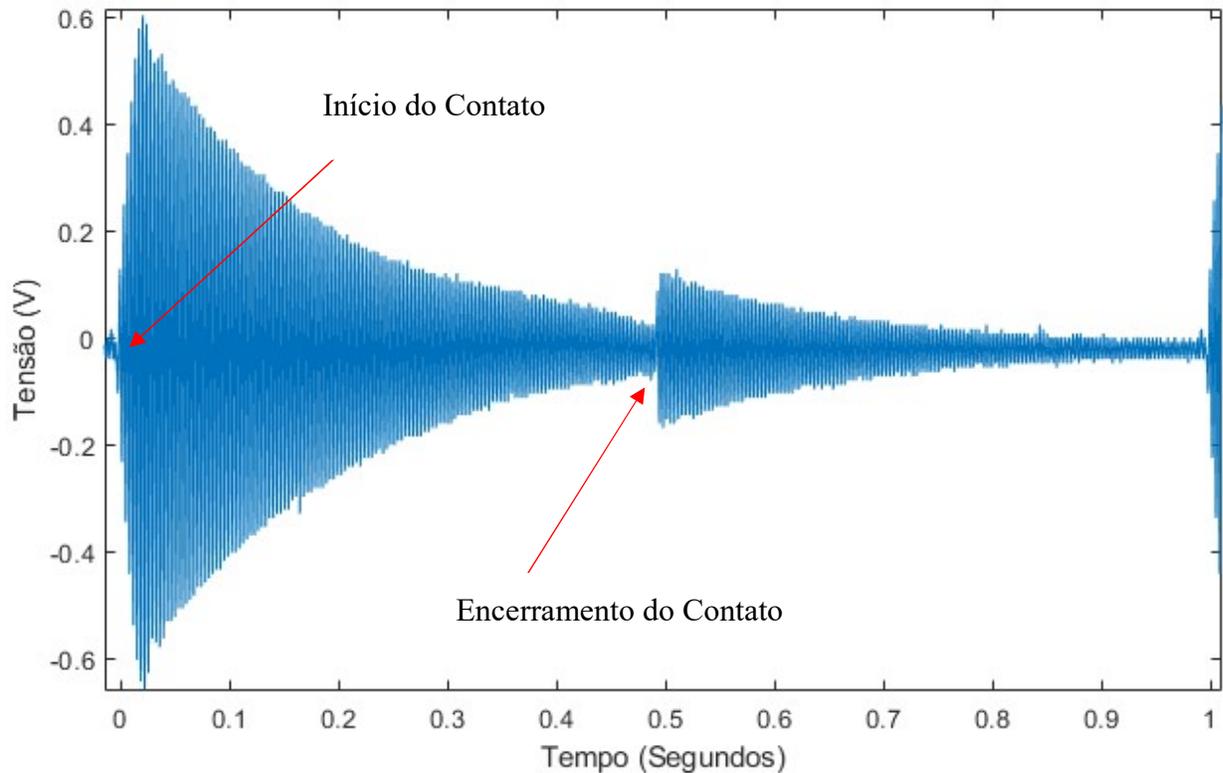


Figura A 4 - Resposta do Transdutor Piezoelétrico sem massa de ponta a 1 Hz e 0,3 mm de deslocamento.

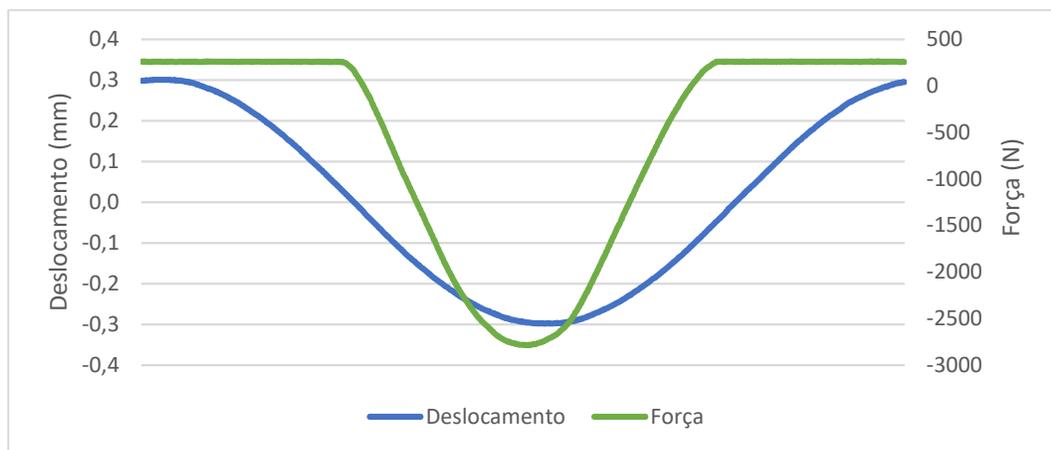


Figura A 5 - Ciclo de carga da MTS com deslocamento controlado em 0,3 mm.

Os efeitos das demais configurações de testes é demonstrado na Figura A 6. As configurações são variadas de deformações de 0,3 a 0,5 mm, três situações de massa nas pontas e múltiplas frequências. A forma de 1 segundo de tempo da senoidal gerada por cada uma das configurações é apresentada sobre as colunas.

Alguns detalhes dos resultados devem ser ressaltados. Aumentos da frequência em geral contribuem para uma melhoria na geração, até certo ponto. O impacto da frequência é diferente para cada uma das condições com massa nas pontas. Isso ocorre pela alteração da frequência de vibração natural sofrida pelo transdutor piezoelétrico. Uma massa maior na ponta diminui a frequência de vibração e aumenta as deformações. Maiores frequências de carregamento, portanto começam a interferir com a vibração, diminuindo os picos de tensão.

O fator que causou o maior impacto sobre o sistema foi a utilização da massa de ponta de 32 gramas, apresentando uma melhora significativa sobre as duas condições anteriores, que permaneceram próximas. Entretanto, conforme já ressaltado anteriormente, é necessário cuidado com esse tipo de adição. Conforme observado, diferentes frequências se comportam de maneira diferente com massas distintas. A aplicação de carga da prensa ajuda a esclarecer alguns comportamentos, mas o carregamento cíclico da prensa não é similar ao campo. Além disso, existe o risco de diminuição da vida de fadiga ao aumentar as tensões mecânicas no transdutor através das massas nas pontas.

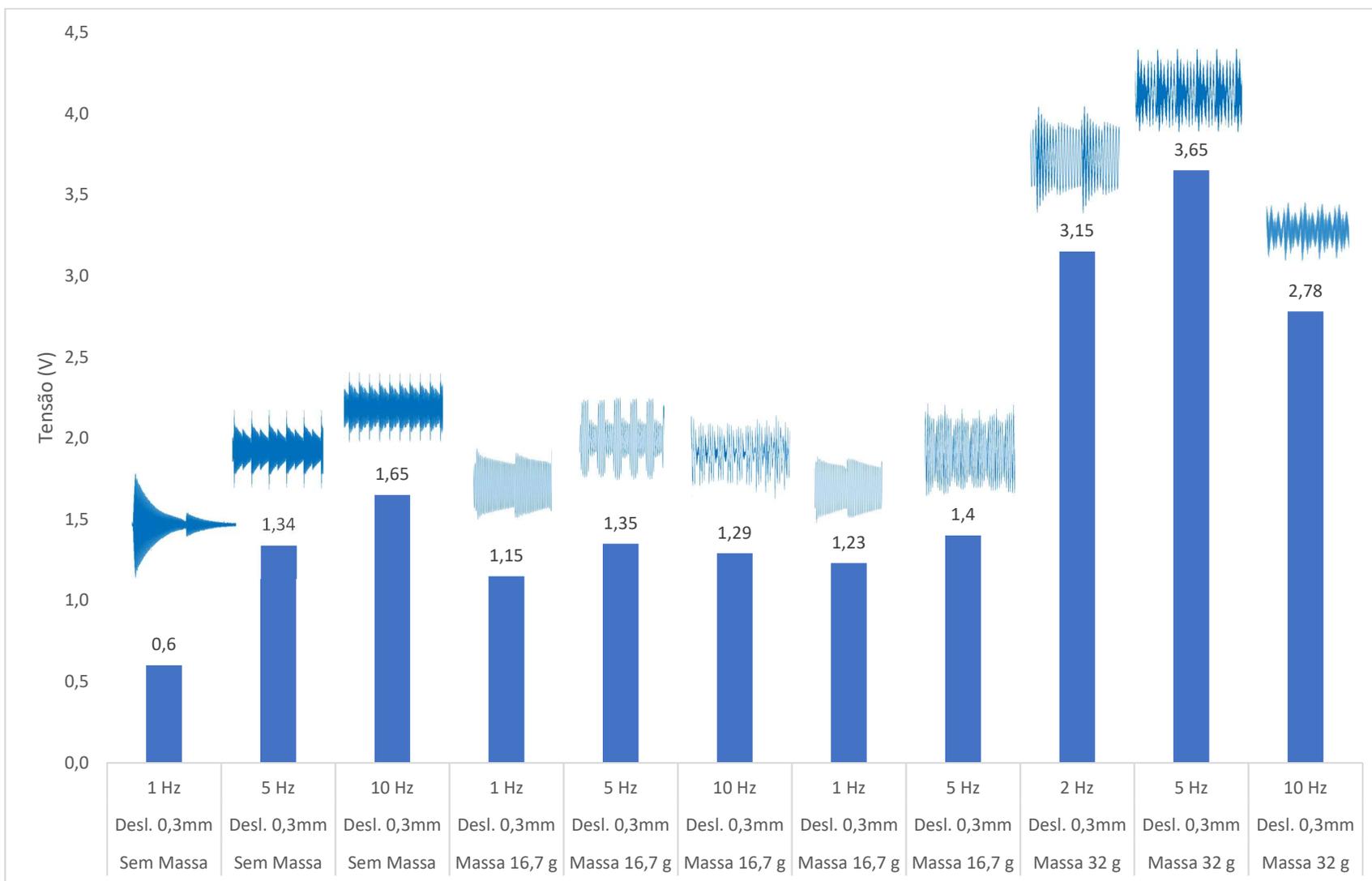


Figura A 6 - Picos de tensão e formatos de ondas em diferentes configurações de ensaio

Os resultados gerados pela carga pontual após o impacto demonstraram picos de tensão maiores que os ocorridos em campo. Na tentativa de aproximar os resultados, utilizou-se uma borracha entre a prensa e o corpo de prova, eliminando o contato direto entre metal que poderia gerar uma vibração extra. O resultado para uma condição similar de 1Hz e 5Hz com a massa de ponta de 32 gramas geraram curvas similares ao sistema anterior, com picos cinco vezes menores, aproximadamente.

A utilização da borracha acabou causando uma atenuação maior que a esperada. O sistema em campo atingiu valores intermediários entre ambos os testes. A partir dos dados gerados, a utilização de massas de pontas maiores aparece como uma possibilidade para melhorar os dados gerados. Recomenda-se a realização de testes de fadiga previamente a instalação para estimar a vida útil desejável, além de analisar a velocidade da via. Velocidades maiores podem gerar o efeito de interferência visualizado nesse experimento, tornando massas maiores indesejáveis.