



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE GRADUAÇÃO
ENGENHARIA MECÂNICA



GABRIEL PEREIRA DA SILVA JÚNIOR
JOÃO PEDRO ERBISTE DO CARMO
VINÍCIUS MAIA CESAR
WALTER CUNHA MÁXIMO JONES

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA PIEZOELETRICIDADE

VOLTA REDONDA

2020

GABRIEL PEREIRA DA SILVA JÚNIOR

JOÃO PEDRO ERBISTE DO CARMO

VINÍCIUS MAIA CESAR

WALTER CUNHA MÁXIMO JONES

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA PIEZOELETRICIDADE

Dissertação apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

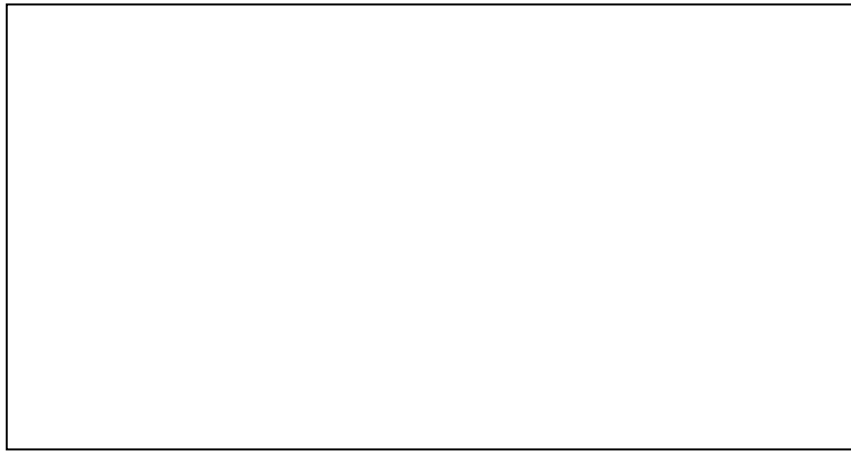
Orientador: Alexandre Alvarenga Palmeira

VOLTA REDONDA

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner – CRB 7/RJ 4316

A large empty rectangular box with a thin black border, occupying the central portion of the page. It is currently blank, serving as a placeholder for a catalog entry or an image.

GABRIEL PEREIRA DA SILVA JÚNIOR
JOÃO PEDRO ERBISTE DO CARMO
VINÍCIUS MAIA CESAR
WALTER CUNHA MÁXIMO JONES

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA PIEZOELETRICIDADE

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“ENGENHEIRO MECÂNICO”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

Prof. MSc. Diniz Félix dos Santos
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira
1º Membro da banca/Orientador/UniFOA

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe
2º Membro da banca/UniFOA

Prof. MSc. Rui Aurelio Barbosa
3º Membro da banca/UniFOA

Junho de 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser tão essencial em minha vida, permitir-me o êxito e jamais desamparar-me e aos meus familiares por me darem todo o suporte necessário para que os objetivos fossem alcançados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta jornada. À família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que chegássemos a esta etapa da vida. Aos nossos orientadores Prof. Alexandre Alvarenga Palmeira e Prof. Alexandre Fernandes Habibe, pelo seu empenho, dedicação, auxílio e incentivo na realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos do corpo docente, funcionários e demais colaboradores do UniFOA.

EPÍGRAFE

“A História tem demonstrado que os mais notáveis vencedores normalmente encontraram obstáculos dolorosos antes de triunfarem. Eles venceram porque se recusaram a se tornarem desencorajados por suas derrotas.”

(Bryan Forbes)

JÚNIOR, G. P. S.; DO CARMO, J. P. E.; CESAR, V. M.; JONES, W. C. M. **Geração de Energia através da Piezoeletricidade**. 2020. Dissertação (ENGENHARIA MECÂNICA) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2020

RESUMO

A procura por novas fontes de energia para substituir ou completar as atuais têm despertado interesse nas áreas de pesquisa. A geração de energia através do efeito piezoelétrico é uma fonte alternativa de energia elétrica que pode ser utilizado para aplicações de consumo com potência baixa. O material piezoelétrico tem a capacidade de transformar a energia mecânica da vibração em energia elétrica;

Possuímos diversas formas de se obter energia mecânica vibratória que pode servir de motivação para o estudo dos materiais que as utilizam, como a vibração gerada pelos veículos nas ruas.

Este trabalho tem por objetivo efetuar um estudo de caso para analisar a viabilidade da aplicação de um sistema piezoelétrico em um trecho de uma avenida na cidade de Volta Redonda, para o aproveitamento da vibração feita pelos diversos carros que transitam durante o dia e transformar em energia elétrica, que poderia ser utilizada para acender as lâmpadas que iluminam as ruas deste local.

Palavras-chave: Piezoeletricidade, Energia Elétrica e Geração de Energia Piezoelétrica.

ABSTRACT

The search for new sources of energy to replace or supplement as current has sparked interest in the research areas. Power generation through the piezoelectric effect is an alternative source of electrical energy that can be used for low power consumption applications. The piezoelectric material has the capacity to transform the mechanical energy of vibration into electrical energy.

Possible different ways of obtaining mechanical vibratory energy that can serve as a motivation for the study of materials that can be used, such as a vibration generated by vehicles on the streets.

This work aims to perform a case study to analyze the feasibility of applying a piezoelectric system on a stretch of an avenue in the city of Volta Redonda, to take advantage of vibrations made by several cars that pass during the day and use electricity, which could be used to light the lamps that illuminate the streets of this place.

Keywords: Piezoelectricity, Electricity Piezoelectric Power Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz energética Mundial.....	19
Figura 2. Matriz energética brasileira.....	20
Figura 3. Comparativo entre consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis, no Brasil e no mundo.	20
Figura 4. Matriz elétrica mundial.....	21
Figura 5. Matriz elétrica brasileira.....	22
Figura 6. Comparativo entre a utilização de energia elétrica proveniente de fontes renováveis e não renováveis, no Brasil e no mundo.....	22
Figura 7: Materiais cristalinos.....	27
Figura 8: Polarização de um material piezoelétrico. Fonte: ÖZEMIR, OY, 2016.....	28
Figura 9: Conversão de energia de uma cápsula piezoelétrica. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	28
Figura 10: Efeito piezoelétrico de modo direto. Fonte: Ceramtec, 2017.....	29
Figura 11: Efeito piezoelétrico de modo inverso. Fonte: Ceramtec, 2017.....	29
Figura 12: Pneus regenerativos da Goodyear. Fonte: https://gizmodo.uol.com.br/pneus-eletricidade/	30
Figura 13: Deformação do piezoelétrico transformando energia mecânica em energia elétrica. Fonte: Perlingeiro; Pimenta; Silva, 2016.....	32
Figura 14: IPED PAD. Fonte: Perlingeiro; Pimenta; Silva, 2016.....	32
Figura 15: Geração de energia a partir de placas instaladas em calçadas. Fonte: Perlingeiro; Pimenta; Silva, 2016.....	33
Figura 16: Violão elétrico. Fonte: https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_UFSC/Materiais_EEL_7051/7_Materiais_Piezoeltricos.pdf	33
Figura 17. Piezoeletricidade na estrutura óssea.....	34
Figura 18. Processo de Polarização dos Materiais Piezoelétricos. Fonte: LEO, 2007 apud Santos, 2016.....	35
Figura 19: Estrutura atômica do quartzo. (a) Estado natural; (b) Efeito de compressão; (c) Efeito de tração. Fonte: Sakamoto, 2006.....	37
Figura 20: Esquema de uma autoclave (a) Quartzo cultivado com base em sementes barra Y e placa Z. Fonte: DIANA, F. R., 2004(a) adaptado de Brice, 1985(b) apud Domingos; Weiss; Wolf, 2013.....	39
Figura 21. Representação esquemática de uma célula unitária com estrutura perovskita. Fonte: EIRAS, 2004.....	40
Figura 22: Mecanismo de dobra (bending) característico de um polímero eletroativo iônico. Fonte: https://www.spf.pt/magazines/GFIS/115/article/937/pdf	42
Figura 23: Representação esquemática do efeito piezoelétrico. Fonte: https://www.spf.pt/magazines/GFIS/115/article/937/pdf	42
Figura 24: Representação esquemática da conformação da cadeia polimérica das fases alfa e beta do PVDF. Fonte: https://www.spf.pt/magazines/GFIS/115/article/937/pdf	43
Figura 25: Captação através de viga (a) uniforme, (b) biforme e (c) ramadas. Fonte: Modelo de captação por viga. Fonte: http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Energia%20atrav%C3%A9s%20de%20Materiais%20Piezoel%C3%A9tricos.pdf	44

Figura 26: Supercapacitores. Fonte: https://pt.slideshare.net/GlauciaFernandes1/pdf-tcc-pronto	45
Figura 27: Motor piezoelétrico. Fonte: https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_UFSC/Materiais_EEL_7051/7_Materiais_Piezoeltricos.pdf	48
Figura 28: Duas placas de metal com um material piezoelétrico no centro. Fonte: https://pt.slideshare.net/LeonardoVilarinho/materiais-piezoeltrico	49
Figura 29: A estrutura interna do PEH. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	50
Figura 30: A unidade piezoelétrica. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	51
Figura 31: Diagrama da camada intermediária protetora. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	51
Figura 32: O diagrama esquemático da colocação de HPE. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	52
Figura 33: O processo de instalação. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	53
Figura 34: Tensões de pico de circuito aberto de F2 e Y10. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	55
Figura 35: A tensão de pico do circuito aberto de F2 e Y10 em diferentes velocidades. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	56
Figura 36: Cada PEH correspondente LED caracteres. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	57
Figura 37: Diagrama de fiação da fonte de alimentação PEH. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	57
Figura 38: SUV passando pela estrada de demonstração. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	58
Figura 39: As luzes LED foram acesas por dispositivos PEH. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X	58
Figura 40: Fluxograma para ilustrar o funcionamento do sistema. Fonte: Autor.....	63
Figura 41: Localização no Mapa da Avenida Getúlio Vargas. Fonte: https://www.google.com/maps?q=google+maps+avenida+getulio+vargas+volta+redonda&um=1&ie=UTF-8&sa=X&ved=2ahUKEwjJtOrJ5LbpAhXeG7kGHRtGBM4Q_AUoAXoECA0QAw	68
Figura 42: Avenida Getúlio Vargas, no horário noturno. Fonte: http://www.focoregional.com.br/Noticia/testes-na-getulio-vargas-tem-bons-resultados?fb_comment_id=1451391851574179_1451513011562063	69
Figura 43: Detalhamento do custo de obra civil. Fonte: DNIT, 2017.....	78
Figura 44: Detalhamento do custo de sinalização. Fonte: DNIT, 2017.....	78
Figura 45: Detalhamento do custo de conservação do trecho. Fonte: DNIT, 2017.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Avanço da Piezoeletricidade.....	60
Tabela 2: Características da Tecnologia Innowattech.....	66
Tabela 3: Diferença da Innowattech e Genziko.....	67
Tabela 4: Custo para implementação da tecnologia.....	79
Tabela 5: Valor da implementação da piezoeletricidade.	79
Tabela 6: Tempo de retorno das fontes de geração de energia.....	80

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Média de motos/minuto. Fonte: Autor.....	71
Gráfico 2: Média de carros/minuto. Fonte: Autor.	71
Gráfico 3: Média de veículos pesados/minuto. Fonte: Autor.....	72
Gráfico 4: Média de motos/minuto. Fonte: Autor.....	73
Gráfico 5: Média de carros/minuto. Fonte: Autor.	74
Gráfico 6: Média de veículos pesados/minuto. Fonte: Autor.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

SiO ₂	Quartzo
PZT	TitanatoZirconato de Chumbo
PLGA	Ácido Polilático-co-glicólico
PLLA	Ácido Polilático
PVDF	Polifluoreto de Vinilideno
PVDF-TrFE	Polifluoreto de vinilideno-trifluoretileno
PVDF-CTFE	Polifluoreto de vinilide-no-cloro-trifluoretileno
PVDF-HFP	Polifluoreto de vinilideno-hexafluoropropileno
C	Coulomb
N	Newton
Ca	Cálcio
O	Oxigênio
Ti	Titânio
h	hora
K	Kelvin
V	Volt
W	Watt
kW	quilowatt
MW	Megawatt
M	metro
mm	milímetro
km	quilômetro
km/h	quilômetro por hora

Sumário

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivo Geral	18
1.2.2. Objetivo Específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Energia no Brasil e no Mundo	19
2.1.1. Matriz energética	19
2.1.2. Matriz elétrica	21
2.1.3. Conceito de desenvolvimento sustentável	23
2.2. Piezoelectricidade	24
2.3. Sistema Piezoelétrico	25
2.3.1. Constantes Piezoelétricas	25
2.4. Coletores Piezoelétricos	27
2.5. Efeito Piezoelétrico	28
2.6. Aplicações de materiais piezoelétricos para geração de energia elétrica	30
2.6.1. Pneus capazes de gerar energia	30
2.6.2. Piezoelectricidade junto à força do vento	31
2.6.3. Piezoelectricidade nas estradas	31
2.6.4. Geradores piezoelétricos em trilhos de trem	32
2.6.5. Sistema de captação de energia em calçadas	33
2.6.6. Piezoelectricidade na música	33
2.6.7. Piezoelectricidade na estrutura óssea	34
2.7. Material Piezoelétrico	35
2.7.1. Quartzo (SiO ₂)	36
2.7.2. Cerâmicas	39
2.7.3. Polímeros	40
2.8. Colheita de Energia	44
2.8.1. Modelagem do transdutor piezoelétricos	44
2.9. Armazenamento de Energia	45
2.10. Limitações dos Materiais Piezoelétricos	46
2.11. Transformadores Piezoelétricos	47
2.12. Motores Baseados no Princípio Piezoelétrico	48

2.13.	Sensores Piezoelétricos	49
2.14.	Projeto de PEH para pavimentação asfáltica.....	50
2.14.1.	Projeto de demonstração	52
2.14.2.	Teste de campo.....	53
2.15.	Cenário atual da piezoeletricidade no mundo	59
3.	Metodologia	63
3.1.	Modo de investigação	64
3.2.	Parâmetros para implementação	65
3.3.	Estudo da Avenida Getúlio Vargas.....	68
3.4.	Estudo sobre o fluxo de veículos	70
3.4.1.	Estimativa para o cenário sem o isolamento social	72
4.	Resultados e Discussões.....	75
4.1.	Projeção Na Avenida Getúlio Vargas.....	75
4.1.1.	Considerando dias normais	75
4.1.2.	Cálculo realizado em condições da Covid-19:	76
4.2.	Análise de obra civil	78
4.3.	Análise Econômica Financeira	80
5.	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 e utilizado na prática pela primeira vez pelos em sonares durante a primeira guerra mundial. Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com quartzo por causa da demanda por alta tensão, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. Estes esforços levaram à descoberta nas décadas de 40 e 50 das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela antiga URSS e Japão, e das cerâmicas piezoelétricas de Titano-zirconato de chumbo (PZT's) pelos EUA.

O desenvolvimento das cerâmicas piezoelétricas foi inovador. Além de demonstrarem melhores propriedades que os cristais depois de polarizadas, também ofereceram geometrias e dimensões flexíveis por serem fabricadas por meio da sinterização de pós cerâmicos conformados via prensagem ou extrusão. Atualmente as cerâmicas piezoelétricas tipo PZT, em suas diversas variações, são os materiais piezoelétricos predominantes no mercado.

Existem diversas fontes de energia que são utilizadas atualmente, nesse trabalho iremos demonstrar uma fonte de energia que pode ser chamada de auxiliar, denominada piezoeletricidade.

As fontes de energia utilizam-se materiais e recursos, que serão capazes de gerar energia por meio de alguma transformação.

A natureza nos apresenta inúmeras possíveis fontes de energia como, por exemplo, a água, o sol, o vento, o carvão, o petróleo, e outras fontes, para que elas possam gerar energia é necessário que sejam transformados de um estado para outro, por meio de técnicas e equipamentos adequados para tal fim.

No Brasil, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2017), no ano de 2016 a matriz energia do país teve uma participação de 83,3% de hidrelétricas, seguida de 7% de energias provenientes da cana, 6,6% de energia proveniente dos ventos, 0,0168% de energia solar, e 3,1% de outras fontes de energias que são consideradas renováveis.

Essas fontes de energia citadas anteriormente apresentam uma potência elevada se comparadas a outras fontes. O material alvo do estudo, no caso o material piezoelétrico é uma fonte de energia que apresenta baixa potência encontrada na natureza que transforma energia de vibrações (energia mecânica) em energia elétrica, podendo ser capaz de armazenar essa energia através de baterias.

A energia que é extraída de materiais piezoelétrico possui uma baixa potência energética, porém pode ser muito útil quando se trata de aplicações eletrônicas quando armazenada de forma adequada para usos posteriores. [1]

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Demonstrar a possibilidade de produção de energia através de materiais piezoelétricos por meio da instalação de um sistema sob a pavimentação de uma determinada via de circulação no município de Volta Redonda.

Analisar o quanto seria proveitoso a utilização deste sistema, levando em consideração sempre a quantidade média de carros que se passam por hora e se o custo benefício se pagará.

Dessa forma será necessário conhecer cada componente utilizado e analisar as limitações e funcionamento do projeto como base em alguns levantamentos que serão teóricos.

1.2.2. Objetivo Específicos

O objetivo desta dissertação é demonstrar uma nova possibilidade de se obter energia, causando o mínimo de impacto possível ao meio ambiente e analisando o quão proveitoso seria utilizar essa tecnologia em nossa cidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia no Brasil e no Mundo

Para compreender a necessidade de geração de energia a partir de fontes renováveis, é de suma importância que se conheça o panorama energético e elétrico do Brasil e do mundo, através de suas respectivas matrizes.

2.1.1. Matriz energética

É o termo que denomina e exemplifica o conjunto de fontes de energias disponíveis para suprir a demanda de um determinado local, cidade, estado, país ou até mesmo no mundo, como por exemplo, movimentar os veículos automotores, cozinhar e produzir energia elétrica. Sendo, essas fontes, renováveis ou não.

2.1.1.1. Matriz energética mundial

O gás natural, carvão e o petróleo, compõem basicamente a matriz energética mundial, fazendo dela predominantemente não renovável, como podemos conferir a seguir:

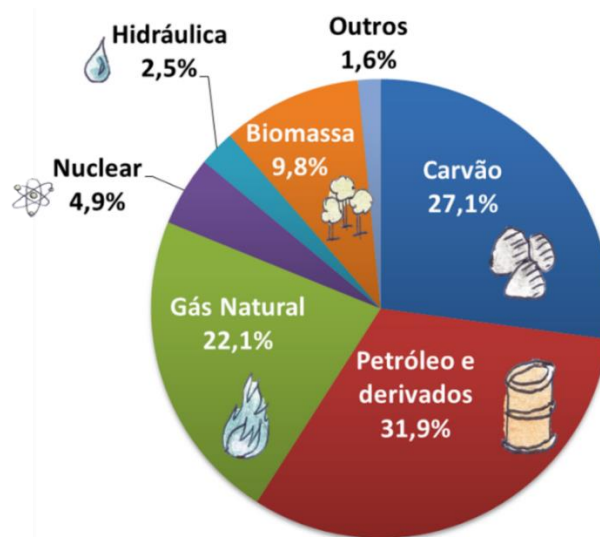


Figura 1. Matriz energética Mundial.

Fonte: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, 2018.

As fontes assinaladas como “outros” correspondem a geração de energia por fontes solares, geotérmicas e eólicas, que somadas as fontes hidráulicas e biomassa, como podemos observar, fazem com que as fontes renováveis totalizem apenas 14% desta matriz.

2.1.1.2. Matriz energética brasileira

Diferentemente da matriz energética mundial, a brasileira utiliza mais fontes renováveis se comparada ao resto do mundo. Porém, mantém a proporcionalidade do consumo de energia maior proveniente de fontes não renováveis.

Materiais como lenha, carvão vegetal, derivados de cana e a própria água, por meio das usinas hidrelétricas, nos fornecem quase metade de nossa matriz energética, totalizando 42,9% de energia consumida provenientes de fontes renováveis, como podemos ver a seguir:

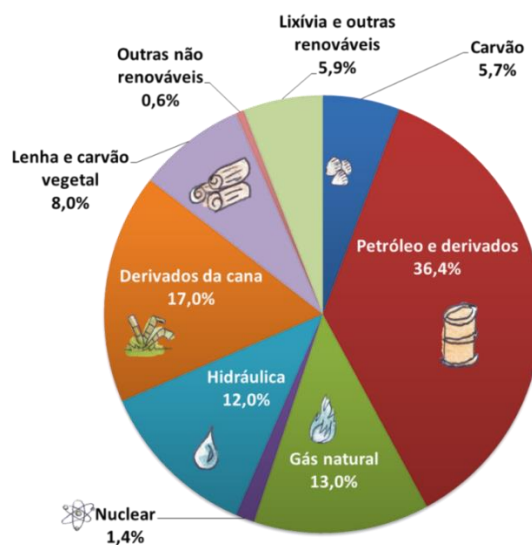


Figura 2. Matriz energética brasileira.

Fonte: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, 2018.

Desta forma, o comparativo do consumo de energia renovável e não renovável, no Brasil e no mundo, pode ser representado da seguinte forma:

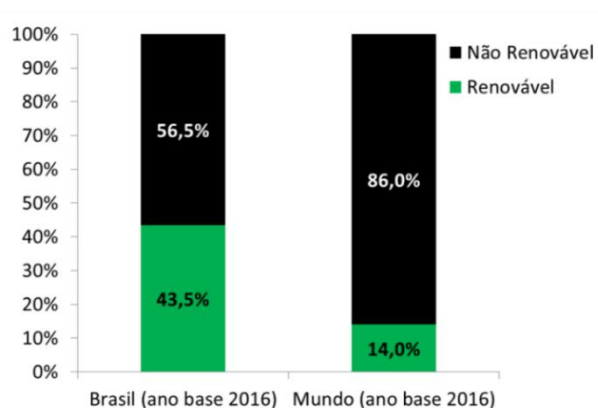


Figura 3. Comparativo entre consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis, no Brasil e no mundo.

Fonte: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, 2018.

2.1.2. Matriz elétrica

A Matriz elétrica compreende as fontes de energia disponíveis apenas para a geração de energia elétrica de uma determinada localidade. Podendo concluir que a mesma está compreendida dentro da matriz energética.

2.1.2.1. Matriz elétrica mundial

Os combustíveis fósseis como o carvão, o gás natural, o óleo, utilizados em usinas termelétricas, ocupam grande parte da matriz elétrica no mundo, que está representada a seguir:

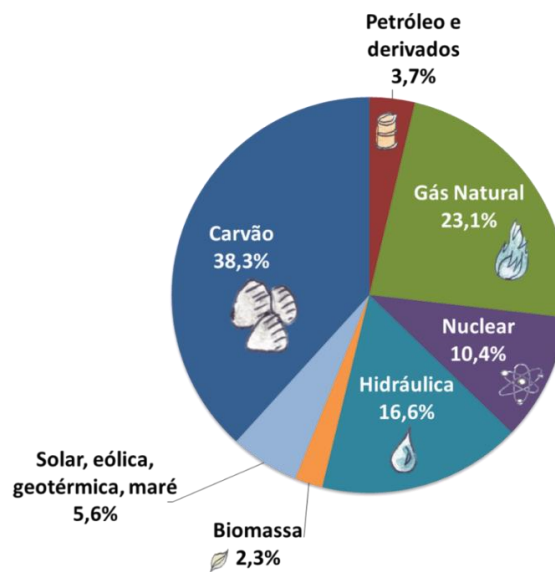


Figura 4. Matriz elétrica mundial.

Fonte: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, 2018

2.1.2.2. Matriz elétrica brasileira

Comparada a matriz energética, a matriz elétrica brasileira se mostra ainda mais renovável, chegando a 82% de seu total formado por energia proveniente de fontes consideradas inesgotáveis como as hidráulicas, biomassa, solar e eólica. E com potencial de aumento, visto que a produção de energia elétrica vem se expandindo bastante no país.

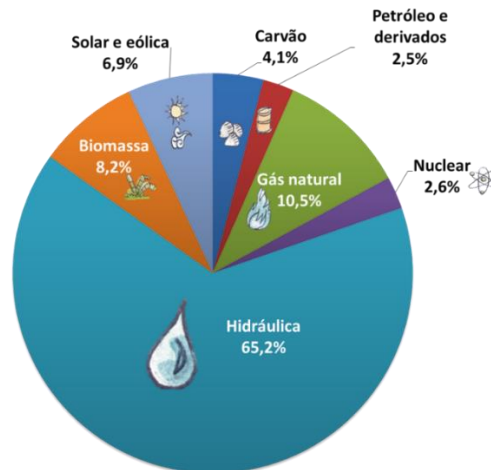


Figura 5. Matriz elétrica brasileira.

Fonte: BEN, 2018.

Comparando então as matrizes elétricas mundial e brasileira, obtemos:

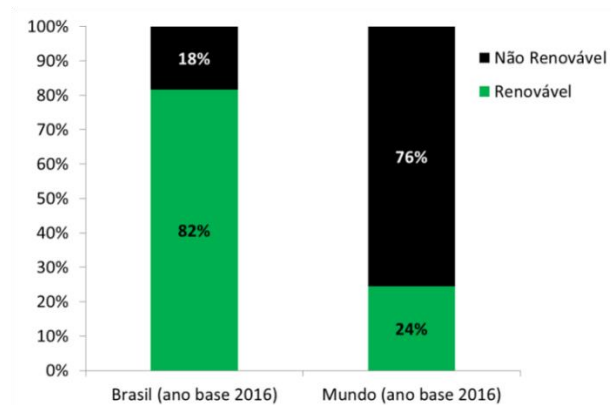


Figura 6. Comparativo entre a utilização de energia elétrica proveniente de fontes renováveis e não renováveis, no Brasil e no mundo.

Fonte: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, 2018

Apesar do Brasil estar na contramão deste movimento, é possível notar, que no mundo ainda se consome bastante energia proveniente de fontes não renováveis. Esse fato se dá por diversos fatores, como por exemplos países que não apresentam potencial hidráulico como o nosso país.

Diante deste fato, a engenharia tem trabalhado para aperfeiçoar a forma de se gerar energia limpa através de fontes denominadas renováveis, ou seja, que se encontram na natureza.

O material piezoelétrico tem sido uma alternativa para a geração deste tipo de energia, principalmente em países cujo potencial energético das demais fontes é considerado baixo.

2.1.3. Conceito de desenvolvimento sustentável

Em Estocolmo, no ano de 1972, durante a Primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, foi proposto o conceito de desenvolvimento sustentável como: *“aquele capaz de suprir as necessidades dos seres humanos da atualidade, sem comprometer a capacidade do planeta para atender as futuras gerações. Portanto, é o desenvolvimento que não esgota os recursos, tornando-os perenemente disponíveis, se possível”*. [19]

2.2. Piezoeletricidade

A piezoeletricidade foi descoberta pelos irmãos Pierre e Paul Jacques Curie em 1880, eles descobriram que alguns materiais quando sofressem compressão em algumas direções apresentavam diferença de potencial elétrico em determinadas partes da superfície do cristal. As cargas eram proporcionais à pressão aplicada e depois desapareciam quando não tinha mais pressão.

Também em 1880 foi publicado pelos irmãos a primeira demonstração experimental de uma ligação entre os fenômenos piezoelétricos macroscópicos e a estrutura cristalográfica. O experimento consistiu de uma medida conclusiva de cargas que aparecem na superfície dos cristais especialmente separados que foram submetidos a estresse mecânico. Os resultados obtidos eram créditos muito grande à imaginação e à perseverança dos irmãos, visto que os resultados foram obtidos com papel alumínio, cola, arame, ímãs e uma serra.

Segundo Farret (2014) o efeito piezoelétrico foi usado para o desenvolvimento de sonares durante a primeira guerra mundial por Paul Langevin, que utilizou a piezoeletricidade em uma primeira tentativa de aplicação prática. Langevin acoplou cristais de quartzo a massas metálicas para gerar ultrassom na faixa de dezenas de KHz's

Existia uma enorme dificuldade em excitar os transdutores construídos com cristais de quartzo, pois demandavam o uso de geradores de alta tensão. No decorrer da década de 40 iniciou o desenvolvimento de materiais sintéticos que possuíam piezoeletricidade com a descoberta e aperfeiçoamento das cerâmicas de Titanato de Bário, pela URSS e Japão, e das cerâmicas de TitanatoZirconato de Chumbo pelos EUA (Farret, 2014).

2.3. Sistema Piezoelétrico

Quando submetidos a tensões mecânicas, os materiais piezoelétricos geram eletricidade. O comportamento deles trouxe uma grande atenção de vários pesquisadores de diversos setores e recentemente possibilitou a aplicação no setor de pavimentação, para efetuar estudos e potencializar essa tecnologia.

O TitanatoZirconato de Chumbo (PZT) é o principal material utilizado para a criação dos conversores piezoelétricos por possuir a melhor resposta elétrica. É um material cerâmico que possui efeitos piezoelétricos e é muito usado nos conversores produzidos pelos pesquisadores.

Outro material utilizado para gerar energia através da piezoeletricidade é o Polivinidileno (PVDF). O PVDF apresenta uma boa capacidade de ser flexível e resistente a cargas e níveis de deformação. É importante que o material a ser utilizado para a geração de energia piezoelétrica tenha uma boa vida útil para diminuir a manutenção.

O sistema piezoelétrico utiliza um modo de acoplamento, chamado de modo 3-1 ou 3-3. O primeiro modo acontece quando a força aplicada no material é perpendicular a direção dos polos do material, já o 3-3 ocorre quando é na mesma direção. O segundo, modo 3-3, conforme apresentado por duToitel al. (2005) gera uma maior energia. [3]

2.3.1. Constantes Piezoelétricas

Em geral, deve-se conhecer algumas propriedades dos materiais piezoelétricos quando for selecioná-los para alguma aplicação tecnológica, dentre eles podemos destacar:

2.3.1.1. Constante de Carga Piezoelétrica – d [m/V ou C/N]:

Indica a proporção entre a variação dimensional (Δl) do material piezoelétrico (em metros) e a diferença de potencial aplicada (em Volts), e entre a geração de cargas elétricas (em Coulomb) e a força aplicada no material (em Newton).

2.3.1.2. Constante de tensão piezoelétrica – g [V.m/N]:

Informa a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para o comprimento de 1 metro.

2.3.1.3. Coeficiente de acoplamento – k [Adimensional]:

Eficiência do material na transdução/conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa.

2.3.1.4. Fator de qualidade mecânico – Q [Adimensional]:

É uma medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material.

2.3.1.5. Temperatura de Curie – TC [°C]:

É a temperatura na qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoelétricas. Após ultrapassada, esta temperatura, o material perde a polarização remanescente induzida, tornando-se inútil como elemento transdutor de energia elétrica em mecânica.

2.4. Coletores Piezoelétricos

Os coletores piezoelétricos retiram proveito da propriedade especial que alguns materiais possuem, que é a piezoelectricidade. Quando os materiais são submetidos a deformações eles são capazes de gerar uma diferença de potencial entre as suas extremidades. Aplicando uma diferença de potencial em um material piezoelétrico ele pode deformar. Portanto, os ciclos de compressão e descompressão nos materiais piezoelétricos geram uma corrente alternada.

Os materiais piezoelétricos podem ser classificados nas seguintes categorias (WANG et al., 2018):

- a) Materiais cristalinos (como quartzo);
- b) Piezocerâmicas;
- c) Semicondutores piezoelétricos;
- d) Polímeros;
- e) Compósitos piezoelétricos;
- f) Cerâmicas de vidro.

Os diversos materiais possuem características piezoelétricas e mecânicas várias, os mais comuns são os polímeros e os materiais cerâmicos. [4]

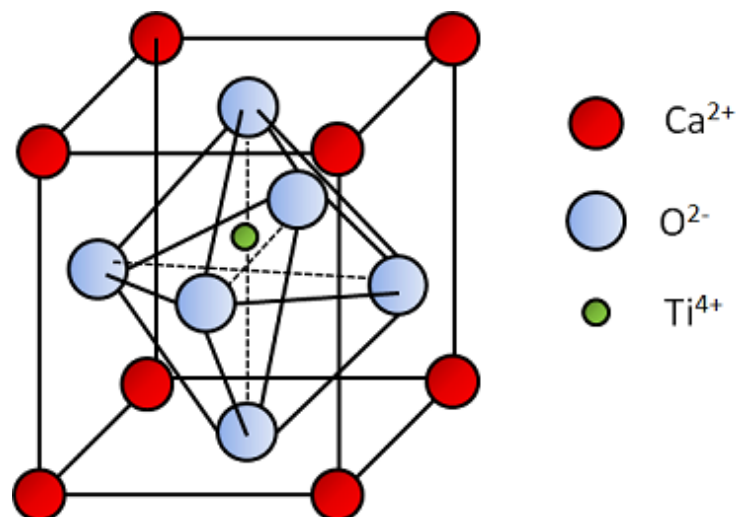


Figura 7: Materiais cristalinos.
Fonte: WANG et al., 2018

2.5. Efeito Piezoelétrico

A piezoelectricidade é uma propriedade que alguns materiais possuem, que é definida como a polarização elétrica produzida por uma deformação mecânica em certos cristais. O material piezoelétrico cria um campo elétrico interno ao sofrer uma deformação.

Na figura abaixo mostra a polarização de um material ao sofrer uma deformação, onde (a) mostra o estado de repouso e (b) o estado de compressão do material ao sofrer deformação.

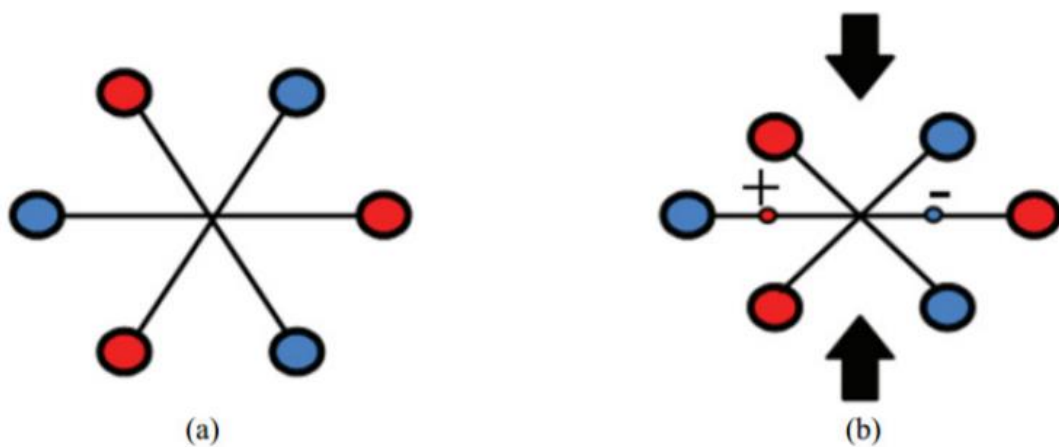


Figura 8: Polarização de um material piezoelétrico. Fonte: ÖZEMIR, OY, 2016

O efeito piezoelétrico nada mais é que a conversão da energia mecânica em energia elétrica ou vice-versa, o modo direto é a conversão da energia mecânica em elétrica e o modo inverso é a conversão da energia elétrica em mecânica. Por conseguinte, o sistema constitui-se de dois sistemas físicos acoplados, que são o mecânico e elétrico.

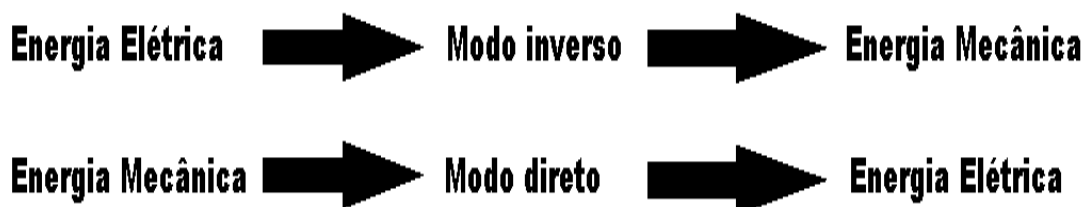


Figura 9: Conversão de energia de uma cápsula piezoelétrica. Fonte: Elaborado pelo Autor

Podemos definir o modo de conversão direto pela mudança da polaridade conforme deformação aplicada. Portanto o material é definido como piezoelétrico ao

se aplicar uma força externa obtendo uma polarização elétrica interna, tendo a intensidade relacionada diretamente a simétrica do material.



Figura 10: Efeito piezoelétrico de modo direto. Fonte: Ceramtec, 2017

Na figura 10 mostra uma conversão de modo direto que apresenta o uso de uma força externa para gerar uma carga elétrica, a proporção da força aplicada determinará a quantidade de energia gerada.

O modo de conversão inverso é definido ao aplicar um campo elétrico externo, que deforma o cristal. Os efeitos mostram-se da mesma propriedade dos cristais acêntricos.

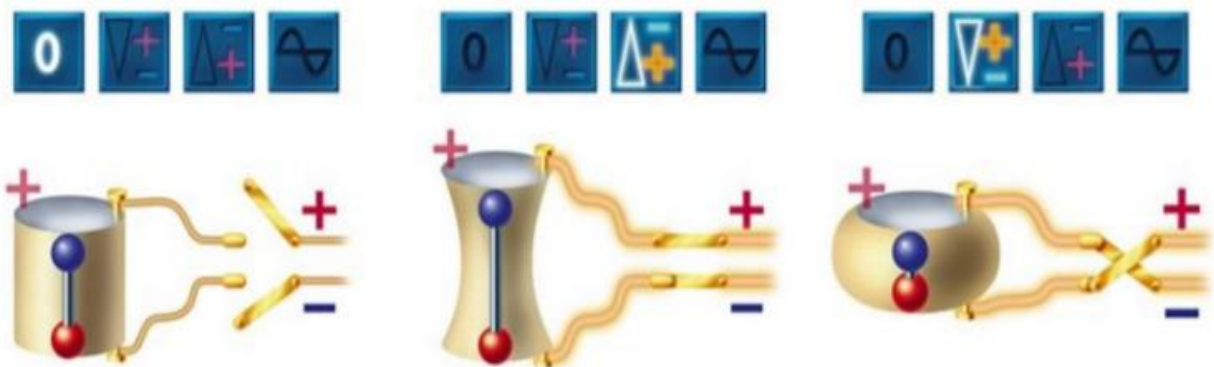


Figura 11: Efeito piezoelétrico de modo inverso. Fonte: Ceramtec, 2017

Na figura 11 mostra a conversão de modo inverso que apresenta um campo elétrico paralelo à direção da polarização, induzindo uma expansão do material. [5]

2.6. Aplicações de materiais piezoelétricos para geração de energia elétrica

Nos dias atuais a procura por energias renováveis que não utilizam combustíveis fósseis, ou que pelo menos utilize a menor quantidade possível, tem se tornado uma grande preocupação. Na utilização de combustíveis fósseis têm-se três fatores que devem ser levados em consideração: disponibilidade, custo e por fim poluição. Dessa forma, o desafio atual é gerar um modelo energético o mais sustentável possível e que este tenha influência na sociedade e na economia de vários países. [6]

2.6.1. Pneus capazes de gerar energia

Dois engenheiros da universidade de Ontário, Noaman Makki e Remon Popliiev (2011), realizaram um projeto no qual iriam inserir nanogeradores piezoelétricos dentro de pneus.

Esses dois engenheiros perceberam que, para gerar a maior quantidade de energia possível era necessário cobrir uma área maior da superfície interna dos pneus com nanogeradores. Utilizaram um protótipo com uma malha de 4 x 40 fios, instalados no interior de um pneu aro 14 polegadas com um adesivo flexível.

No momento em que o veículo chegava a velocidade de 100 km/h, o material piezoelétrico produziu 2,3 Watts de forma sustentável por pneu. Em um segundo teste utilizando-se uma camada de nanogeradores, superposta a primeira, a produção curiosamente duplicou para o valor de 4,6 Watts. [20]



Figura 12: Pneus regenerativos da Goodyear. Fonte: <https://gizmodo.uol.com.br/pneus-eletricidade/>

2.6.2. Piezoeletricidade junto à força do vento

Uma empresa de design de Nova York criou um conceito que substitui as lâminas de turbinas eólicas por hastes, muito parecidas com as finas tábuas chamadas de windstalks. Os designers elaboraram essa ideia para a cidade de Masdar, que possui aproximadamente 2,3 quilômetros de área livre, a ser construída na parte de fora da cidade de Abu Dhabi.

Esse projeto necessita de aproximadamente de 1203 “caules”, cada um medindo aproximadamente 55 metros de altura, possuindo uma base de concreto entre 10 e 20 metros de largura. As hastes são constituídas de fibra de carbono, reforçadas de resina. Cada haste conterá camadas alternadas de eletrodos e discos de cerâmicas feitas de materiais piezoelétricos, que gera uma corrente quando colocada sob pressão. No caso dos pés, os discos irão comprimir conforme eles balançam ao vento, gerando dessa forma uma carga.

Uma windstalk deve ser capaz de produzir tanta eletricidade quanto comparada a uma turbina de vento comum, porém possuindo uma vantagem da produção de energia poder ser aumentada com uma utilização maior de hastes. [21]

2.6.3. Piezoeletricidade nas estradas

Outra aplicação de piezoeletricidade seria a utilização de geradores piezoelétricos em estradas. Esta ideia faz com que a energia mecânica transmitida pelo automóvel à estrada seja convertida em energia elétrica.

Um projeto, realizado por uma empresa chamada Innowattech no ano de 2010, num trecho de 10 metros de comprimento da estrada, utilizando geradores piezoelétricos de aproximadamente 5,5 centímetros de espessura situados em uma camada de asfalto, a 6 centímetros do nível superior da estrada. Deste projeto foram obtidos uma produção de 1 kW/h, produzido pelo conjunto das duas colunas de 10 metros de geradores instalados. Para se determinar a quantidade de energia a ser produzida levaram em consideração a frequência e a velocidade de um caminhão (1000 caminhões por hora com velocidade de 72 km/h).

Segundo os cálculos realizados por essa empresa Innowattech, um total de 20 carros passam por uma via expressa a cada 1 minuto, e com isso esse trânsito poderia gerar 200 kW/h, energia essa que poderia abastecer uma residência por mês. [3]

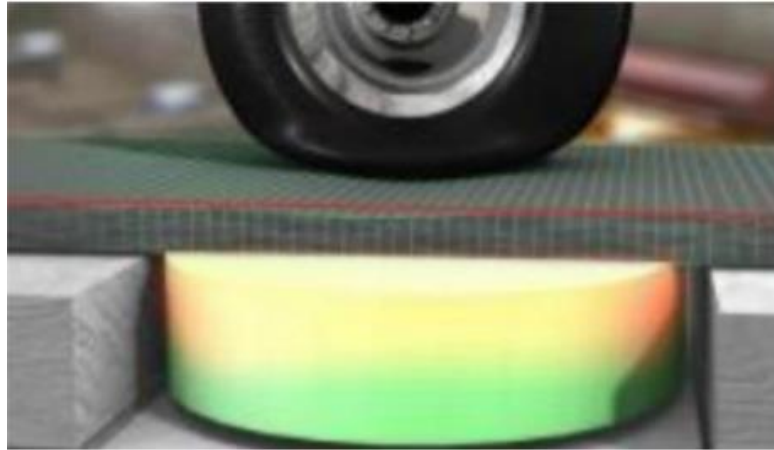


Figura 13: Deformação do piezoelétrico transformando energia mecânica em energia elétrica. Fonte: Perlingeiro; Pimenta; Silva, 2016.

2.6.4. Geradores piezoelétricos em trilhos de trem

Com o princípio da geração de energia através de estradas, desenvolveu-se um projeto que tinha como objetivo substituir os coxins de trilhos feitos a partir de borracha por coxins desenvolvidos pela empresa Innowattech de Israel, os IPED PAD, figura 9.

Os IPED PAD possuem as mesmas dimensões dos coxins tradicionais, entretanto são produzidos com elementos piezoelétricos que transformam energia mecânica em energia elétrica.

Durante o projeto, foram testados 32 coxins com essa nova tecnologia, assim testes mostraram que em certas áreas onde passam 10 a 20 trens por hora podem produzir aproximadamente 120 kW/h. [3]

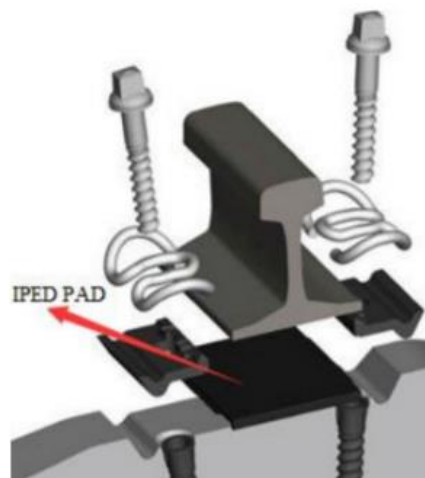


Figura 14: IPED PAD. Fonte: Perlingeiro; Pimenta; Silva, 2016

2.6.5. Sistema de captação de energia em calçadas

A utilização de energia gerada através de calçadas e pisos, figura 15, vem ganhando cada vez mais espaço. Se esse tipo de tecnologia for aplicado em lugares onde se tem alto fluxo de pessoas, pode-se gerar grande quantidade de energia.

É possível que possa ser gerado 1kW a cada 100 metros de piso ou calçada com tecnologia piezoelétrica se 3 mil pessoas passarem a cada hora em certo local.

[3]



Figura 15: Geração de energia a partir de placas instaladas em calçadas. Fonte: Perlingeiro; Pimenta; Silva, 2016

2.6.6. Piezoeletricidade na música

Os materiais piezoelétricos como ditos anteriormente apresentam várias aplicações, eles apresentam uma aplicação fantástica no conceito musical. Materiais piezoelétricos vêm sendo utilizados em violões elétricos e em outros instrumentos de corda, estes materiais transformam as vibrações das cordas em sinais elétricos que são então aproveitados e convertidos em som por meio de um amplificador. [22]



Figura 16: Violão elétrico. Fonte:

https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_UFSC/Materiais_EEL_7051/7_Materiais_Piezoeletricos.pdf

2.6.7. Piezoelectricidade na estrutura óssea

Alguns elementos da estrutura da matriz óssea tais como hidroxiapatita e colágeno apresentam características de materiais piezoelétricos, visto que sob deformação mecânica (como a produzida por tração, compressão ou torção) esses materiais podem sofrer modificações espaciais, produzindo uma polarização elétrica. A estrutura centro-simétrica do cristal de hidroxiapatita exclui a possibilidade de observar essa propriedade piezoelétrica, como demonstrado em osso sem colágeno (Marino e Becker, 1975). Minary-Jolandan e Yu (2009), observaram que fibrilas de colágeno isoladas tem polarização axial unipolar e comportam-se como material piezoelétrico.

Fukata e Yasuda (1957) foram os primeiros autores a observar que cargas elétricas são formadas na face oposta do osso devido a sua deformação mecânica, sendo este efeito devido as características da matriz óssea. A remodelação óssea seria controlada pela polaridade originada pelas cargas compressivas, onde as cargas positivas favoreceriam a ação dos osteoclastos e as negativas a ação dos osteoblastos. Essa descoberta desencadeou o desenvolvimento de vários estudos sobre o efeito piezoelétrico no osso e demais tecidos do corpo, sendo mostrados em estudos atuais que o mecanismo acústico, o piezoelétrico e o térmico podem acelerar o reparo ósseo (Rosa et al., 2015).

Assim, devido a formação de dipolos elétricos, a pressão no osso produziria polarização elétrica que, por sua vez, estimularia a formação óssea pelos osteoblastos. Desse modo, minerais (principalmente o cálcio) seriam depositados na parte óssea que está sofrendo a pressão. Acredita-se que por esse mecanismo, o efeito piezoelétrico pode aumentar a densidade óssea, levando a aceleração da recuperação e/ou remodelação óssea (Rajabi et al., 2015). [23]

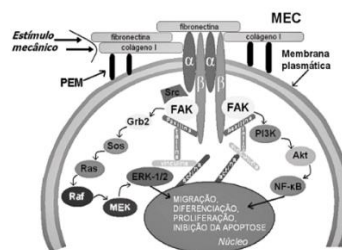


Figura 17. Piezoelectricidade na estrutura óssea.
Fonte: Rajabi et al., 2015

2.7. Material Piezoelétrico

Conforme dito por Kaltembacher (2007) e *apud* Schulz (2012) os materiais piezoelétricos são divididos em cristais isolados, cerâmicas piezoelétricas e polímeros. Nos cristais o efeito piezoelétrico é fraco e torna-se necessário a utilização de sensores nas cerâmicas.

Os materiais piezoelétricos possuem origem natural ou artificial e conforme dito por Santos (2016) em condições normais os materiais não têm um acoplamento eletromecânico entre os comportamentos mecânico e elétrico forte o suficiente que permita que seja usado em aplicações de engenharia. Portanto, é essencial que ocorra um tratamento metalúrgico para que o efeito piezoelétrico apresente uma forma que possa ser aplicado num material com essas propriedades.

Ainda segundo Santo (2016) ao realizar a polarização de um material deve-se seguir alguns passos: primeiro é aquecer o mesmo até a temperatura de Curie (Temperatura de Curie é a temperatura onde os materiais ferroelétricos e piezoelétricos deixam de apresentar as propriedades elétricas diferenciadas). Depois de perder a propriedade magnética o material deve ser submetido a um campo elétrico forte, o que altera os dipolos conforme o campo. Após o material tem que ser resfriado, assim os dipolos vão manter a orientação que o campo elétrico induz, o que permite o material fique polarizado, apresentando então o efeito piezoelétrico desejado. Por isso, ao orientar os dipolos eles amplificam a piezoeletricidade do material. Observe o processo na figura abaixo.

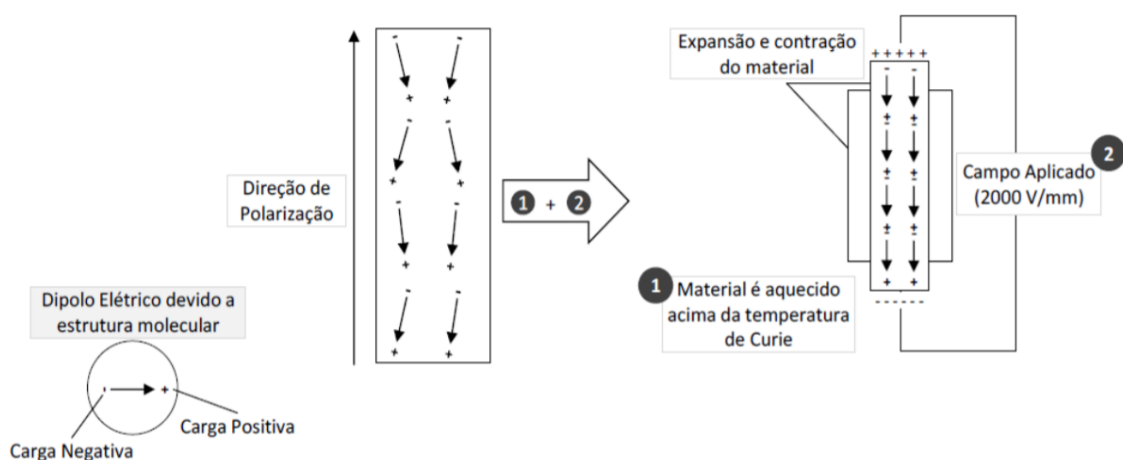


Figura 18. Processo de Polarização dos Materiais Piezoelétricos. Fonte: LEO, 2007 *apud* Santos, 2016.

Hoje em dia os materiais piezoelétricos são aplicados a tecnologias que usam desde frequências baixas, Hertz, até frequências altas, Giga-hertz, assim podem ser utilizados como atuadores e sensores, como materiais policristalinos. Os polímeros, cerâmicas e compósitos são utilizados para realizar aplicações de baixa frequência, já os cristais e filmes finos são utilizados para alta frequência.

Os cristais, em especial o quartzo, foi o primeiro material utilizado para a aplicação de piezoeletricidade, mas com o avanço os piezoelétricos cerâmicos foram descobertos no PZT (TitanatoZirconato de Chumbo) na década de 50 e a partir disso são empregados em várias aplicações.

Para se obter eficientes aplicações tecnológicas devem ser analisadas as seguintes propriedades: dielétricas, elásticas e piezoelétricas, apesar de que nem sempre é necessário determinar todas essas propriedades, depende da aplicação que o material será utilizado. [7]

Os materiais piezoelétricos mais utilizados são:

2.7.1. Quartzo (SiO₂)

É um material que possui a palavra proveniente da Germânia, logo a seguir será descrito detalhadamente o significado do quartzo.

s.m. Mineral comum, encontrado em muitas rochas. (Sin.: cristal de rocha.); sua fórmula química é SiO₂. Pode ser facilmente reconhecido porque se assemelha a pedaços de vidro quebrado. Também se apresenta sob a forma de pequenos grãos em arenito, quando calcita ou mica o aglutinam. O quartzo é o mais duro de todos os minerais comuns. Somente minerais raros como topázio, coríndon e diamante são mais duros. O quartzo não é facilmente alterado por condições climáticas ou pela umidade (PORTUGUÊS, 2009).

Segundo Eiras (2004), o quartzo são cristais encontrados na natureza ou podem ser feitos artificialmente, como por exemplo em processos hidrotérmicos. O processo hidrotérmico é a dissolução e recristalização do cristal quando submetidos a altas pressões e temperaturas.

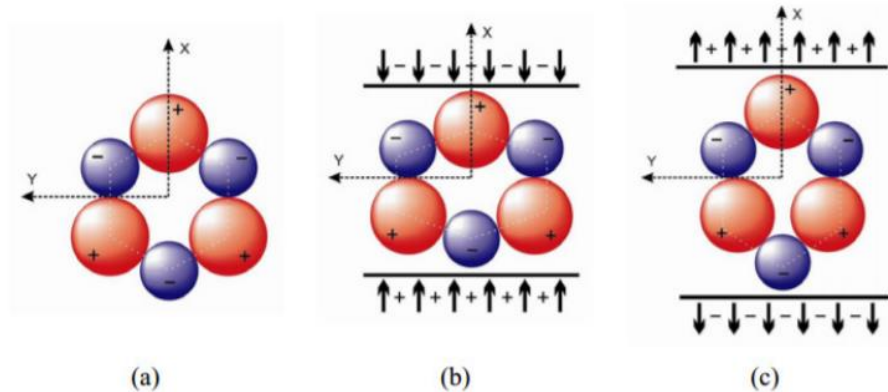


Figura 19: Estrutura atômica do quartzo. (a) Estado natural; (b) Efeito de compressão; (c) Efeito de tração. Fonte: Sakamoto, 2006

De acordo com Brice (1985) *apud* Luz e Lins (2008) o quartzo é o material mais utilizado na produção de dispositivos piezoelétricos com a finalidade de medir as grandezas físicas através do monitoramento da frequência de ressonância no domínio dos ultrassons. Na indústria mundial o cristal de quartzo que é encontrado no Brasil possui um papel de destaque no fornecimento para diversos segmentos, sendo assim o segundo material mais utilizado na indústria eletrônica, logo atrás do Silício. No entanto, desde o descobrimento por Roberts de que as cerâmicas de titanato de bário (BaTiO_3) podem ser polarizadas e proporcionar o efeito piezoelétrico, são os materiais mais utilizados para produzir piezoeletricidade na grande parte das aplicações tecnológicas.

Conforme Silva *et al* (2009) os locais com quantidade significativa de quartzo no Brasil e no mundo são descritos na tabela a seguir:

Brasil:

- Na Bahia (Campo Formoso); Novo Horizonte – quartzo rutilado);
- Goiás (Depósito do granito Pedra Branca);
- Minas Gerais (Distrito Pegmatítico de Juiz de Fora, Araçuaí, Jequitinhonha, Corinto e Diamantina; Lavra da Ilha, em Itinga);
- Pará (Depósitos de Alto Bonito, Pau D'Arco e Conceição do Araguaia – ametista);
- Piauí (Pedro II – opala);
- Rondônia (Depósito de Bom Futuro, em Ariquemes);
- Mato Grosso do Sul;
- Tocantins;
- Amazonas;

- Rio Grande do Sul (maior produtor de ametista do mundo, no Alto e Médio Uruguai – Ametista do Sul, e ágata, no Salto do Jacuí).

Mundo

- Afeganistão (Depósitos de Pech, Kunar e Nuristan);
- Alemanha (Idar-Oberstein);
- Austrália (Broken Hill, em Nova Gales do Sul – opala);
- Canadá (minas de ThunderBay e Rose Quartz, Quadeville, em Ontário – quartzo róseo);
- Casaquistão (Agadir);
- Egito (Depósitos da Península do Sinai);
- Escócia (CairngormMountains – quartzo enfumaçado);
- Espanha (depósitos de Valência);
- Estados Unidos da América (minas de Oxford, no Maine; HotSprings, no Arkansas – cristal-de-rocha; Little Falla, Herkimer e Ellenville, em Nova Iorque – cristal-derocha; Virgin Valley e Humboldt, em Nevada – opala; PikesPeak, no Colorado – quartzo-enfumaçado; Jaspe, no Oregon - Jaspe);
- França (La Gardette - cristal-de-rocha);
- Índia (depósitos de Swda, jalgaon e Maharashtra);
- Inglaterra (depósitos de Dover);
- Itália (Ossola, em Novara; Montes Apeninos, Carrara, Ilha de ELba, Turim e Grosseto – opala);
- Madagascar (depósitos de Maharitra, Betafo e Ambrosita – quartzo-róseo);
- Marrocos (Monte Atlas – calcedônia);
- México (Minas de Julimes, em Chihuahua e Queretaro – opala; Charcas, em São Luís de Potosí – citrino);
- Polônia (Szklary – crisoprásio);
- República Tcheca (minas de PodrIKonosí, Ofiovice e Nova Paka – cornalina, Suki e Netín);
- Romênia (minas de Baldut e Cavníc, em Maramures);

- Rússia (minas de Murzinka, nos Montes Urais – ametista e Jaspe; FirstSovietskyi, em Dalgenorsk);
- Suíça (São Gotardo, em Uri; Maderanertal, Grimsel, Furka e Mont Blanc);
- Ucrânia (Maciço de Korostenskiy);
- Uruguai (Departamento de Artigas – excepcionais ametistas).

Atualmente o quartzo que possui aplicações piezoelétrica necessita ter elevada pureza, livre de imperfeições, inclusões minerais ou de fluidos e geminações óticas ou elétricas

Hoje em dia a procura do quartzo de alta qualidade, utilizado para gerar piezoelectricidade, está impulsionando os estudos para conseguir produzir sinteticamente.

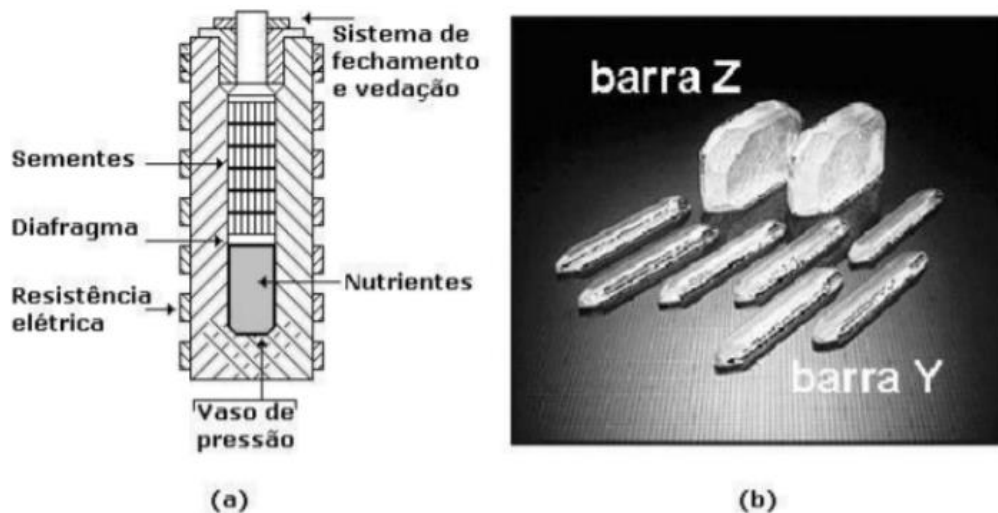


Figura 20: Esquema de uma autoclave (a) Quartzo cultivado com base em sementes barra Y e placa Z. Fonte: DIANA, F. R., 2004(a) adaptado de Brice, 1985(b) apud Domingos; Weiss; Wolf, 2013

O quartzo sintético nada mais é que a recristalização do quartzo natural em solução aquosa em temperaturas e pressão elevadas.

2.7.2. Cerâmicas

Considera-se o início de uma nova era, das piezocerâmicas, o período que sucede o descobrimento de que as cerâmicas possuem propriedades piezoelétricas.

As piezocerâmicas são materiais ferroelétricos que se obtém através de métodos de preparação de cerâmicas avançadas. Em seu estado não polarizado (e não texturadas) são isotrópicas. Para sua utilização como elementos piezoelétricos precisam ser polarizadas sob a aplicação de um campo elétrico dc da ordem de alguns quilovolts por milímetro (Kv/mm). O

fato de ser ferroelétrico permite que se reorienta a polarização espontânea, na direção do campo de polarização (EIRAS, 2004).

A perovskita, como se chama originalmente as estruturas de titanato de bário, é a estrutura utilizada em maior escala como elemento piezoelétrico. Pode ser representada pela fórmula $((A_1A_2)(B_1B_2)O_3)$. O titanato de bário, as soluções sólidas de titanatozirconato de chumbo (PZT) e perovskitas complexas (EIRAS, 2004) tem sido as composições bases que estão em foco nos estudos em cerâmicas da família das perovskita.

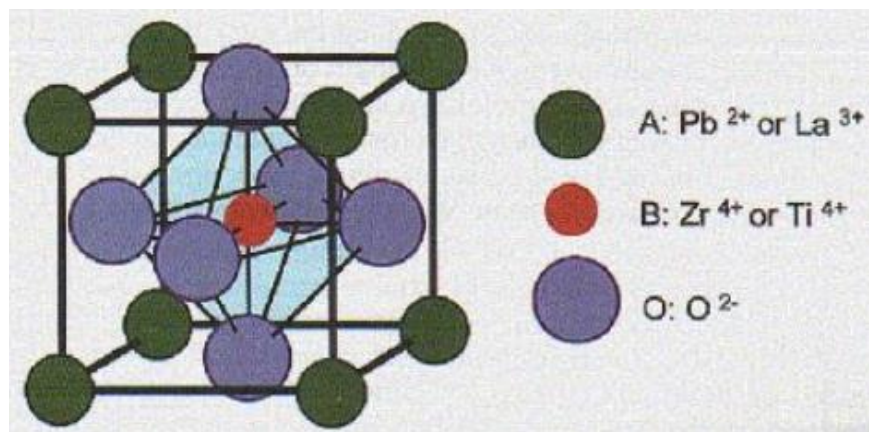


Figura 21. Representação esquemática de uma célula unitária com estrutura perovskita. Fonte: EIRAS, 2004.

Dentre as vantagens dos materiais cerâmicos comparados aos cristais podemos destacar, processo de aquisição mais barato, flexibilidade no processo de preparação, permitindo controle e alteração de propriedades físicas, bem como uma grande variedade de geometrias. (FREITAS, 2012).

2.7.3. Polímeros

Polímeros são compostos orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos de alto peso molecular, caracterizados pelo seu tamanho, estrutura química e interações intermoleculares.

Após descobrir que os bipolímeros apresentavam características piezoelétricas, com o experimento de polarizar filmes de PVDF (polifluoreto de vinilideno), novas pesquisas sobre piezoeletricidade foram direcionadas para os polímeros. A flexibilidade, menor massa específica e maior facilidade de fabricação são algumas das vantagens dos polímeros em relação aos materiais cerâmicos.

Porém, após certas falhas em testes de outras estruturas moleculares bipolar para obtenção de características piezoelétricas, as pesquisas foram direcionadas para

obter coeficientes piezoelétricos mais elevados. Dando origem então, aos materiais conhecidos como compósitos, que juntam os altos coeficientes das cerâmicas com a flexibilidade dos polímeros. [6]

2.7.3.1. Polímeros Eletroativos

Estes polímeros atuam rapidamente e à temperatura ambiente, mantêm a deformação sob a aplicação de um campo elétrico DC e são capazes de utilizar forças com intensidade maior à dos polímeros eletroativos iônicos. Por outro lado, estes materiais necessitam de uma aplicação de campos elétricos maior, na ordem dos 150 MV/m. Os polímeros eletroativos eletrônicos são majoritariamente aplicados em mecanismos de deformação longitudinais e transversais.

No grupo dos polímeros eletroativos iônicos encontra-se os polímeros de gel iônicos, os compósitos polímero-metal ionoméricos, os polímeros condutores, os nanotubos de carbono e os fluidos eletrorreológicos. Nos polímeros eletroativos iônicos a deformação do material é originada pela mobilidade ou difusão dos iões através do polímero quando é aplicado o campo elétrico. Estes têm a vantagem de requererem baixas voltagens, 1 V a 2 V, e promover processos de dobras mais eficazes, mas a sua resposta é mais lenta e a força aplicada é menor que no caso do uso de polímeros eletroativos eletrônicos.

2.7.3.2. Polímeros piezoelétricos

O fenômeno físico mais usado, em aplicações de polímeros eletroativos é a piezoelectricidade. Este fenômeno, inicialmente descoberto em apenas alguns cristais, como quartzo, turmalina e sal de Rochelle, foi mais tarde descoberto em polímeros tais como nylon-11, ácido polilático (PLLA) e o polifluoreto de vinilideno (PVDF). A piezoelectricidade consiste na criação de um tipo de sinal elétrico quando o material é colocado a uma tensão mecânica ao longo de um determinado eixo, bem como no efeito inverso, comum aos materiais eletroativos, isto é, na deformação do material em resposta a um sinal elétrico aplicado.

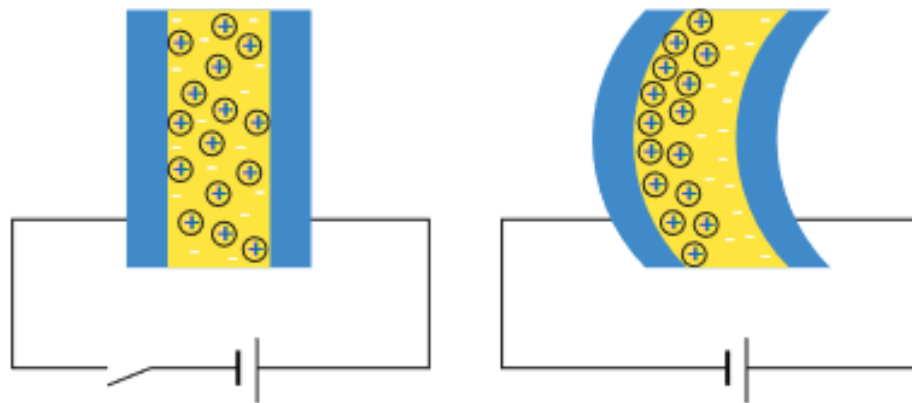


Figura 22: Mecanismo de dobra (bending) característico de um polímero eletroativo iônico. Fonte: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/115/article/937/pdf>

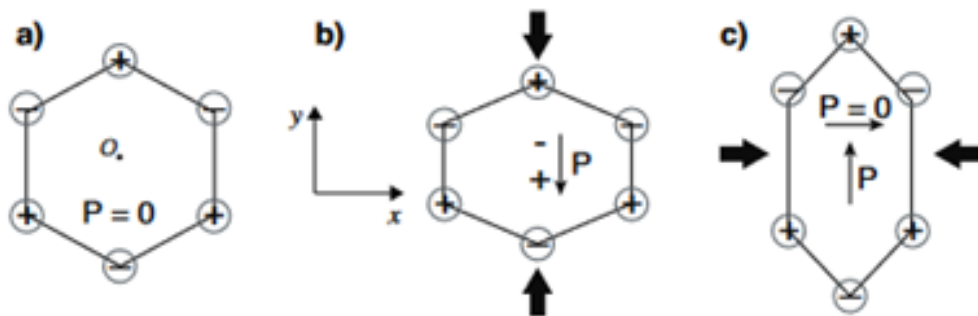


Figura 23: Representação esquemática do efeito piezoelétrico. Fonte: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/115/article/937/pdf>

A piezoeletricidade, que está sujeita a uma variação da polarização do material quando este é colocado a uma tensão mecânica, é observada em materiais não-centrossimétricos (materiais cuja célula unitária não possui centro de simetria). No entanto, quando essa tensão é aplicada sobre a célula unitária, sofre uma deformação que leva ao deslocamento dos centros de massa das cargas positivas e negativas, originando a polarização da rede. A direção da deformação mostra a direção da polarização induzida. Geralmente, a aplicação de uma tensão em uma determinada direção, ocasiona uma polarização induzida numa outra direção.

Estes polímeros, apesar de apresentarem uma resposta piezoelétrica mais simples quando comparados com os cerâmicos, permitem uma maior e diferenciada gama em suas aplicações, uma vez que são leves, flexíveis, podendo ser produzidos em larga escala e sendo facilmente transformados nas configurações desejadas. Estas características são muito importantes para processos de microfabricação, e

alguns destes polímeros até são biocompatíveis. De todos estes, o polímero com maior resposta piezoelétrica é o PVDF e os seus copolímeros.

2.7.3.3. Polifluoreto de vinilideno (PVDF)

De todos os polímeros piezoelétricos, aquele que mais chamou a atenção da comunidade científica, tecnológica e industrial foi o PVDF, devido às suas boas propriedades mecânicas, baixo preço, resistência a solventes, ácidos... No entanto, as suas características que mais se diferenciam dos outros polímeros são a sua elevada resposta dielétrica, piezoelétrica, piroe-létrica (criação de um tipo de potencial elétrico quando é submetido a uma variação de temperatura) e ferroelétrica (polarização espontânea podendo ser invertida com uma aplicação em um campo elétrico externo), sendo assim possui um interesse científico e tecnológico elevado.

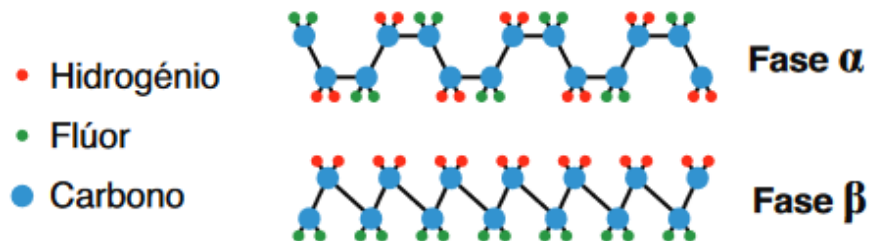


Figura 24: Representação esquemática da conformação da cadeia polimérica das fases alfa e beta do PVDF. Fonte: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/115/article/937/pdf>.

São exemplos de materiais utilizados na nucleação da fase β o titanato de bário, o dióxido de titânio, as argilas, os sais iónicos hidratados, o polimetilme-tacrilato ou as nanopartículas de ferrita, paládio ou ouro. A nucleação da fase β deve-se ao efeito da interação eletrostática entre os momentos dipolares do polímero e a carga superficial dos materiais durante o processo de cristalização do polímero. O desenvolvimento dos copolímeros como o polifluoreto de vinilideno-trifluoretileno, o polifluoreto de vinilide-no-cloro-trifluoretileno contribuiu para a obtenção de um polímero na sua fase mais eletroativa através de algumas estratégias de modificação do monómero, como a colocação de um terceiro flúor no monómero de trifluoretileno, favorecendo a conformação total da cadeia polimérica, independentemente do tipo de processamento. No entanto a utilização de inclusões na matriz polimérica não se resume apenas à obtenção da fase β do PVDF. Na maioria das vezes a sua incorporação tem em vista trazer ao nanocompósito novos efeitos que abram um leque maior de aplicações.

2.8. Colheita de Energia

A colheita de energia é o processo onde se realiza a obtenção da energia de um sistema, convertendo em energia elétrica. As pesquisas relacionadas nessa área vêm aumentando nesses últimos anos, devido ao avanço tecnológico.

Os mecanismos básicos da conversão de energia por meio de vibrações são: piezoelétricos, eletrostático, eletromagnético e magnetoestrutivo.

Com a criação de dispositivos que possuem auto alimentação é algo a ser estudado, procurando realizar formas de utilização de energia produzida pelas vibrações mecânicas se transformando em energia elétrica.

Uma das estruturas mais utilizadas para retirar energia cinética do ambiente e transformar em energia elétrica por dispositivos piezoelétricos é a viga de balanço.

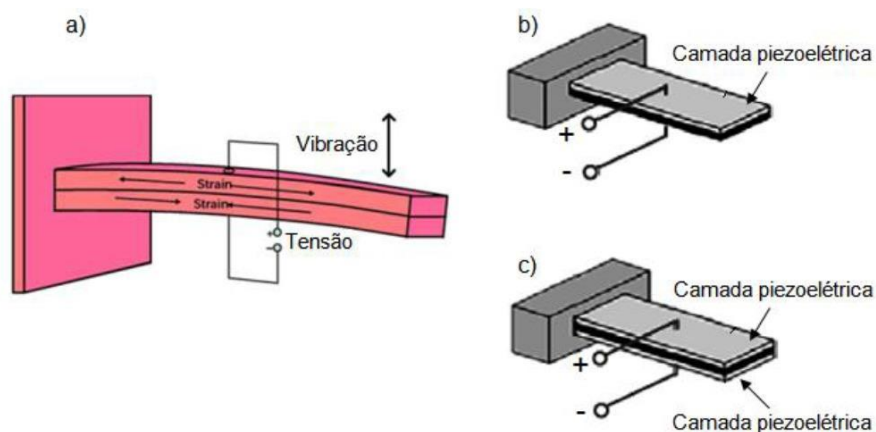


Figura 25: Captação através de viga (a) uniforme, (b) bifurcada e (c) ramada. Fonte: Modelo de captação por viga. Fonte: <http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Energia%20atrav%C3%A9s%20de%20Materiais%20Piezoel%C3%A9tricos.pdf>.

2.8.1. Modelagem do transdutor piezoelétricos

A colheita da energia cinética por sistemas inerciais e modelado com sistemas de amortecimento massa mola de segunda ordem.

2.9. Armazenamento de Energia

Apesar do otimismo, os pesquisadores ressaltam que para usar essa tecnologia em larga escala ainda é necessário superar um obstáculo: o do armazenamento da energia. Usá-la à medida que é gerada não tem mistério. O problema é armazená-la para usos futuros. Atualmente o armazenamento só é possível com grandes capacitores (equipamentos que armazenam energia), que ainda são caros e ocupam muito espaço.

A energia gerada nem sempre será consumida no momento que for gerada. O armazenamento possui um preço elevado. As baterias de elevada densidade de energia são dispendiosas, feitas de metais caros e, ou escassos— como o lítio, cobalto— ou que não são uma solução sustentável, por agredir o meio ambiente— como o chumbo. Outro problema é durabilidade da placa, que se alcançar uma temperatura, muda a estrutura cristalina do material, impossibilitando a polarização do material. Contudo, a utilização de pisos feitos desses materiais são convenientes para abastecer pequenas demandas de energia, que dispensam capacidade de armazenamento.

Para armazenar essa conversão de energia mecânica em elétrica, é feita através de supercapacitores

Os supercapacitores têm como função armazenar a energia gerada em um curto tempo, inclusive naquelas que requerem pulsos intermitentes de alta energia. Atualmente os capacitores de dupla camada, estão fazendo um progresso mais rápido em relação a características como tamanho, preço e a sua resistência. Por ser uma tecnologia nova, o seu custo é consideravelmente alto, assim utilizam-se uma bateria simbolizando um banco de supercapacitores representando o seu armazenamento dos seus pulsos elétricos da pastilha. [8]



Figura 26: Supercapacitores. Fonte: <https://pt.slideshare.net/GluciaFernandes1/pdf-tcc-pronto>.

2.10. Limitações dos Materiais Piezoelétricos

Com o conhecimento das propriedades e aplicações que se deve escolher o material mais adequado, não garantindo o seu bom funcionamento e vida útil.

Em vista disso, é de grande importância saber as limitações que esses materiais possuem.

As principais limitações são:

- Envelhecimento natural;
- Limites de excitação elétricos e mecânicos;
- Instabilidade das propriedades em função da variação da temperatura.

2.11. Transformadores Piezoelétricos

Um transformador piezoelétrico é bem diferente dos transformadores convencionais, que utilizam do magnetismo como meio principal, tem funcionamento baseado na vibração.

É aplicada uma tensão de entrada em um curto espaço de uma barra (feita de material piezoelétrico), esta tensão causa uma vibração nessa barra por meio de um efeito piezoelétrico inverso.

A frequência com que essa barra vibra é bem próxima a sua frequência de ressonância, com isso em outra seção da barra uma tensão ainda maior é desenvolvida.

2.12. Motores Baseados no Princípio Piezoelétrico

Os motores piezoelétricos funcionam transformando as alterações de curvatura de um material em giros contínuos de um eixo de transmissão.

Eles possibilitam a criação de motores planos tão finos como, por exemplo, discos de vinil. Esses motores apresentam elevado torque, porém baixa velocidade.

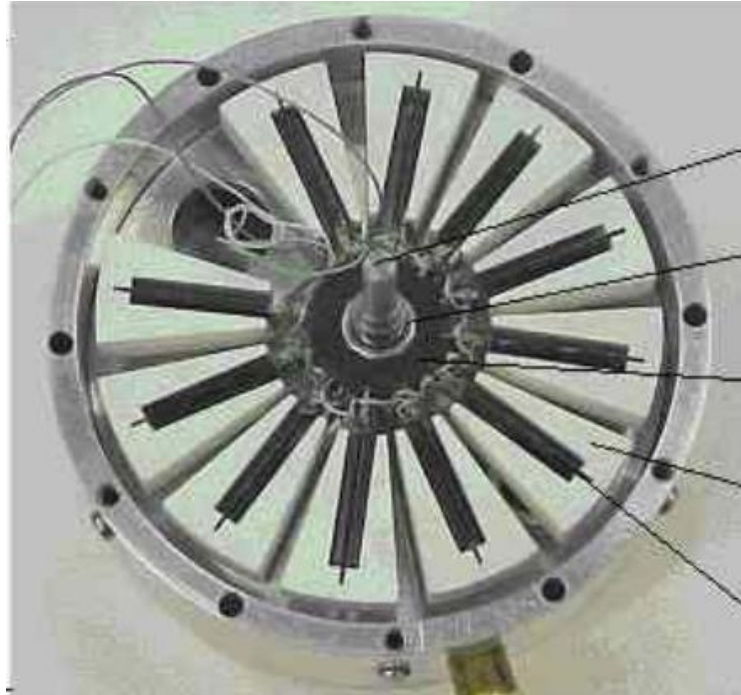


Figura 27: Motor piezoelétrico. Fonte:

https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_UFSC/Materiais_EEL_7051/7_Materiais_Piezoelétricos.pdf.

2.13. Sensores Piezoelétricos

Para utilizar o princípio piezoelétrico para utilizar como sensores é necessário medir a carga elétrica na superfície do material, então é necessário possuir duas placas de metal nas extremidades expostas, tornando-o capacitor. Quanto maior a carga elétrica na superfície maior a força aplicada na deformação do cristal. Esta carga resulta em uma tensão de $q=C$, onde q é a carga resultante de uma força F , e C é a capacitância do componente.

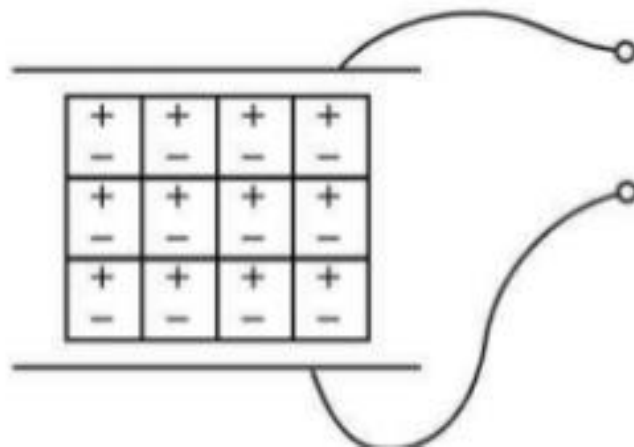


Figura 28: Duas placas de metal com um material piezoelétrico no centro. Fonte: <https://pt.slideshare.net/LeonardoVilarinho/materiais-piezoelétrico>.

Pelo método usado acima, os cristais piezoelétricos funcionam como transdutores transformando uma força em carga elétrica que logo após pode ser transformada em tensão. [10]

2.14. Projeto de PEH para pavimentação asfáltica

Como o coletor de energia piezoelétrica será carregado diversas vezes durante o período de serviço, deverá ter boa capacidade de compressão, resistência à fadiga, desempenho à prova d'água e anticorrosivos. Houve muitas pesquisas na área de materiais de pavimentação, assim os coletores piezoelétricos foram pré-fabricados e incorporados no pavimento de um local de teste. Considerando a área de contato dos pneus, o coletor foi projetado para ter 30 cm de largura e 30 cm de comprimento, nessa dimensão terão melhor contato com as rodas dos veículos que viajam. A espessura do HPE é de 8 cm, um pouco mais fina que a camada superficial do pavimento do local do teste (9 – 10 cm). Possui 12 unidades piezoelétricas, um circuito interno de retificação e dois cabos de saída de energia. Além de um coletor retangular, também foi fabricado um coletor circular com um diâmetro de 30 cm e uma altura de 8 cm, contendo 12 unidades piezoelétricas.

Consistem em quatro partes: as unidades piezoelétricas, os materiais de embalagem, as placas de circuito interno e outros componentes de fixação de vedação. A estrutura interna é mostrada abaixo:

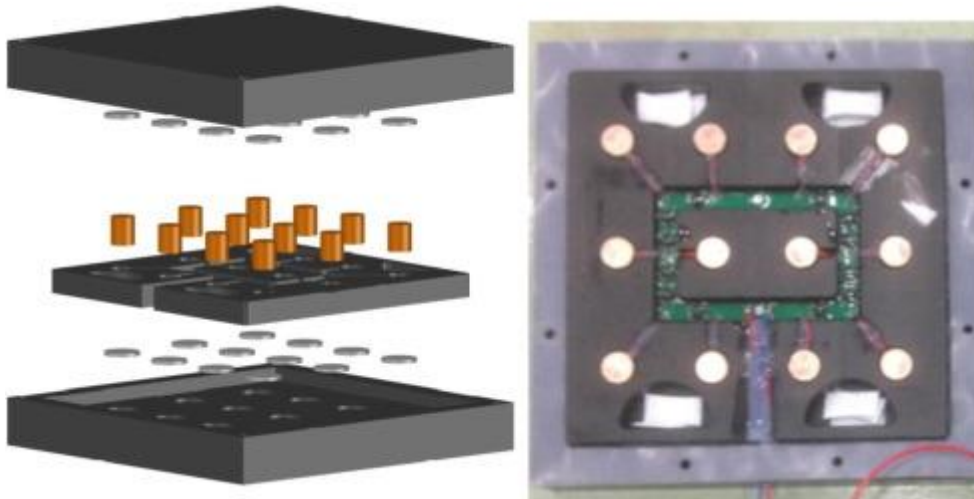


Figura 29: A estrutura interna do PEH. Fonte:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

O componente principal é o material piezoelétrico. Este estudo adotou a cerâmica piezoelétrica PZT-5H. Para cada unidade, três fatias PZT-5H são empilhadas juntas e conectadas em paralelo. A dimensão do tamanho da unidade piezoelétrica é de $\pm 20 \times 23,2$ mm.

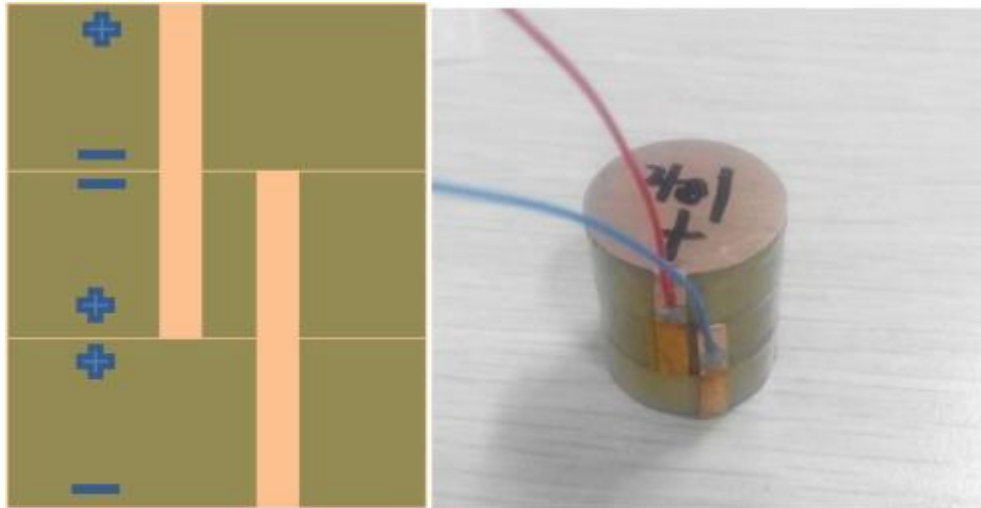


Figura 30: A unidade piezoelétrica. Fonte:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

Nylon (modelo: PA66 com fibra de vidro de 30%) é selecionado para ser o material de embalagem protetor da energia piezoelétrica. Possui alta resistência à carga, alta tenacidade e alta resistência a choques repetidos. A estrutura de proteção se divide em três camadas: a superior, a intermediária e a inferior. A camada superior assumiu diretamente a carga do veículo e a inferior suportada pela força de reação do solo. A camada do meio reservava os orifícios para 12 unidades piezoelétricas e posicionamento do dessecante, e ranhuras para os fios e a placa de circuito interna.

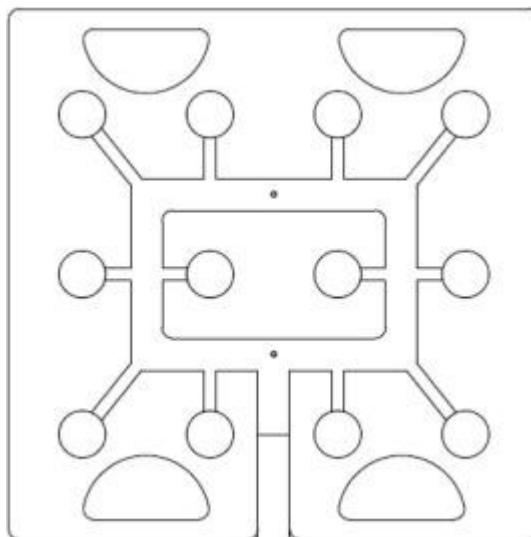


Figura 31: Diagrama da camada intermediária protetora. Fonte:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

Após conectar as unidades piezoelétricas à placa de circuito, a saída de energia será retificada e retirada pelo cabo. A ponte retificadora é selada com cola eletrônica

para evitar o curto-circuito causado pelo vazamento de água. Os métodos de vedação foram os seguintes: aplicação de junta de silicone entre a estrutura de encapsulamento superior e a inferior; colocar a junta de aço inoxidável com um diâmetro de 40 entre os materiais piezoelétricos e envolvê-la usando um pacote de proteção, para evitar a concentração de tensão. Portanto, a coleta de energia tem um bom desempenho de compressão, resistência à fadiga e desempenho à prova d'água. [12]

2.14.1. Projeto de demonstração

O projeto de demonstração do nosso sistema de fornecimento de energia piezoelétrico está localizado na K90 + 700 da rodovia Ma-Zhao, perto da cidade de Zhaotong, província de Yunnan na China, onde o comprimento total da seção de pavimentação experimental é de cerca de 50 m. 20 PEHs fabricados são instalados em pavimentos reais, incluindo 10 retangulares e 10 circulares. A rodovia Ma-Zhao é uma rodovia de seis pistas com duas direções. Os PEHs são instalados na faixa principal, próxima à faixa de emergência e ao longo do percurso das rodas dos veículos. Para reduzir os danos causados pela construção de estradas, o espaçamento é de 2,5 m entre dois PEHs ao longo da estrada e o espaçamento horizontal é de 1,875 m, que é consistente com a estrutura dos eixos dos caminhões de reboque. Uma sala de cabos é construída na posição intermediária da estrada de demonstração. Os fios de saída dos PEHs e os fios de entrada da placa de LEDs estão conectados na sala de cabos. A placa de LED está localizada no final da seção de teste, a 30 m do PEH mais próximo.

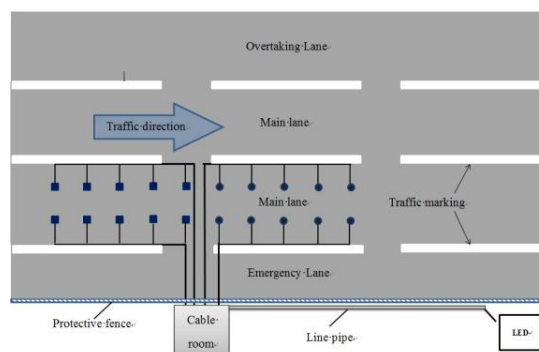


Figura 32: O diagrama esquemático da colocação de HPE. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

O processo de instalação do coletor de energia inclui os seguintes passos: determinação da posição de cada coletor, corte da superfície da estrada, tomada de

núcleo, poço de acabamento, instalação do coletor, colocação do cabo e enchimento da costura.

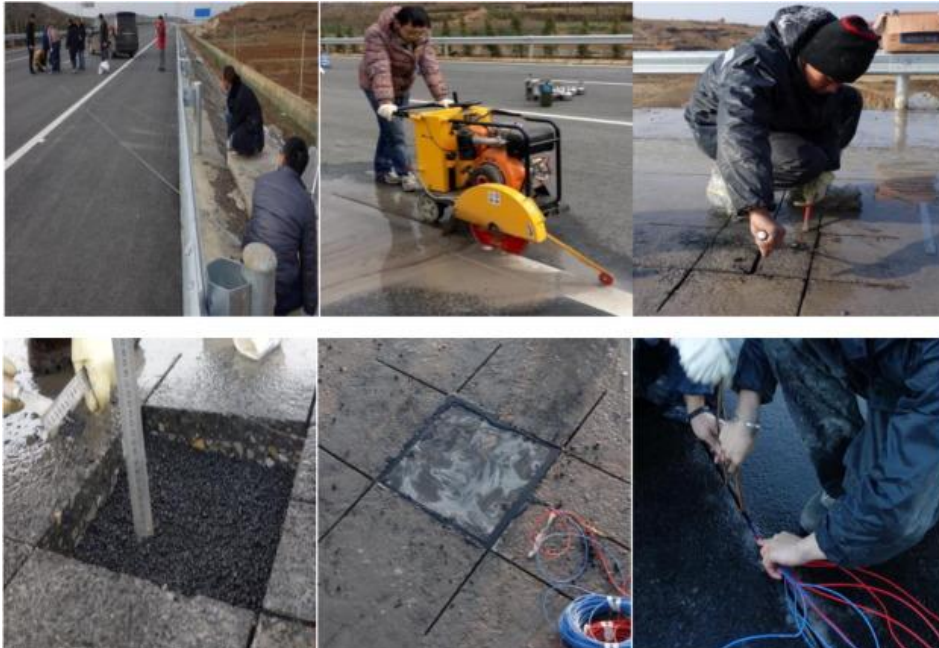


Figura 33: O processo de instalação. Fonte:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

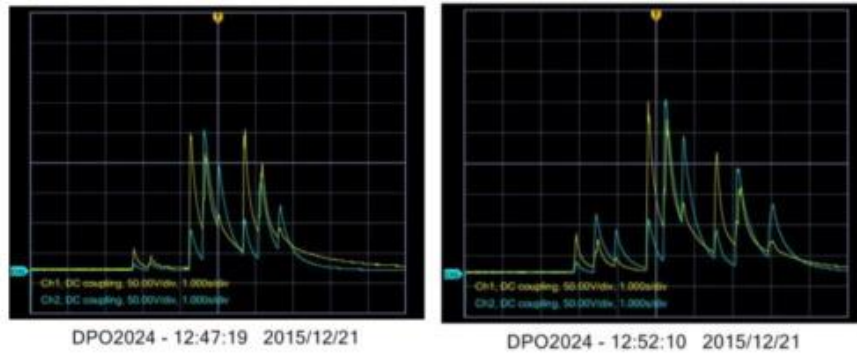
Durante o processo de construção do pavimento, as posições dos sensores foram determinadas e as coordenadas foram registradas. As posições estão marcadas para facilitar o processo de tomada de núcleo.

O primeiro passo é encontrar o local de acordo com as coordenadas gravadas. O segundo passo é abrir o pavimento usando uma máquina de corte. As cavidades e os slots para os fios são cortados nesta etapa. O terceiro passo é remover o núcleo de asfáltico. O fundo é achatado para garantir que a distância entre o fundo e a superfície da estrada seja igual à espessura do coletor na quarta etapa. O quinto passo é instalar os coletores. Antes de encher o poço, é necessário garantir que o poço esteja limpo e seco. O sexto passo é colocar os fios dos sensores ao longo dos slots. Em seguida, preencha a costura com o asfalto modificado misturado com diatomita. [12]

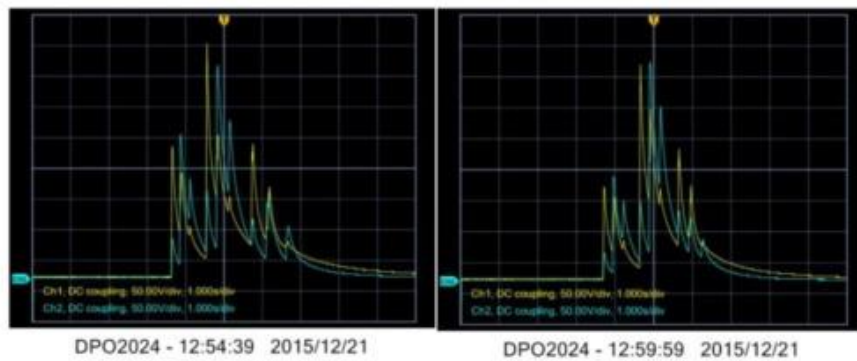
2.14.2. Teste de campo

Em um teste usado na China no carro Toyota Highlander SUV para aplicar carga nos sensores na velocidade da roda de 20 km / h, 40 km/h, 60 km/h e 80 km/h, respectivamente. O peso do veículo é de 1,8 toneladas, a carga do eixo é de 4,5 kN e

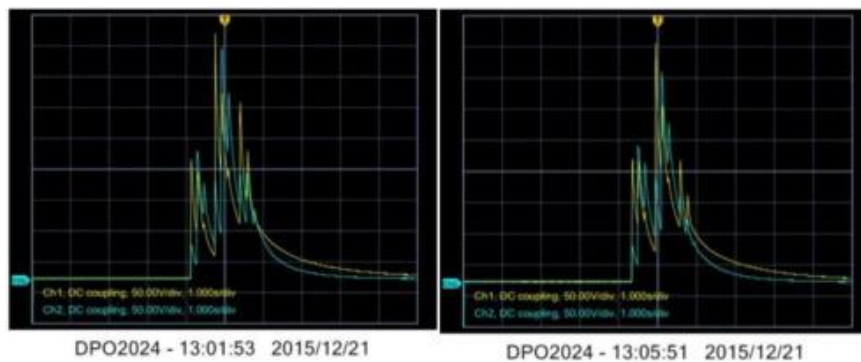
a pressão dos pneus é de 0,7 MPa. O osciloscópio foi usado para monitorar a tensão do circuito aberto de dois PEHs (os números de série são F2 e Y10). Os dois valores de pico em cada velocidade foram medidos e o valor médio é obtido. As tensões de pico de circuito aberto de F2 e Y10 são mostradas nas figuras abaixo.



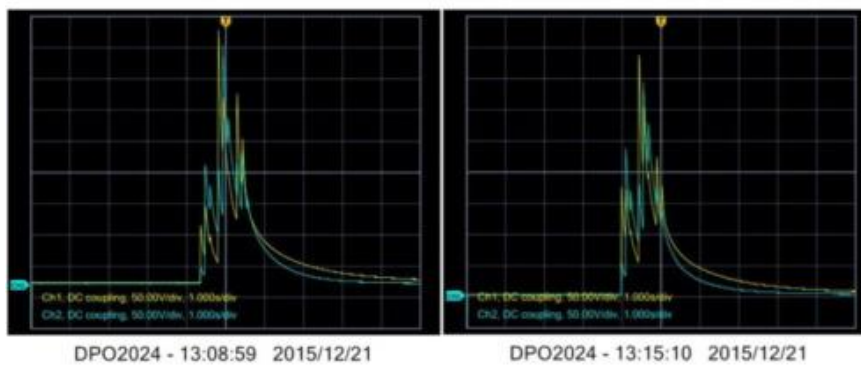
(a) Speed is 20 km/h



(b) Speed is 40 km/h



(c) Speed is 60 km/h



(d) Speed is 80 km/h

Figura 34: Tensões de pico de circuito aberto de F2 e Y10. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

As curvas de tensão de circuito aberto de F2 e Y10 em diferentes velocidades.

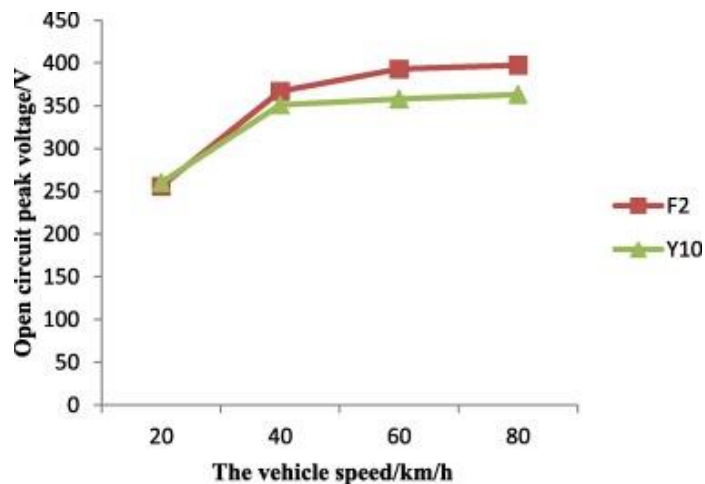


Figura 35: A tensão de pico do circuito aberto de F2 e Y10 em diferentes velocidades. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

À medida que a sua velocidade aumenta, a tensão do circuito aumenta e mais energia elétrica é produzida. Além disso, a influência da velocidade na potência gerada pela PEH é maior a uma velocidade baixa. Na figura abaixo a principal razão para a diferença entre as duas curvas é que a geometria de energia piezoelétrica debulhadora no modelo F2 é diferente do modelo Y10. A seção transversal de F2 é quadrada e Y10 é circular; portanto, quando a carga passa do pavimento para o coletor de energia piezoelétrico, o processo de carregamento do coletor de energia piezoelétrico é diferente. A carga dos coletores de energia piezoelétricos circulares varia mais suavemente e, em seguida, o pico de tensão de Y10 é menor que F2.

A tensão do circuito aberto varia entre 250 e 400 V quando o Toyota Highlander SUV passa os PEHs incorporados na velocidade entre 20 km / h e 80 km/h, que são bons o suficiente para ser a fonte de alimentação da placa de LED.

Vinte dispositivos PEH foram incorporados no projeto de demonstração. A tensão do circuito aberto de cada dispositivo coletor atende à tensão operacional dos caracteres de LED e fornece energia para um caractere. Os métodos de conexão do fio entre o dispositivo do coletor e o caractere chinês do LED são mostrados nas figuras 40 e 41.

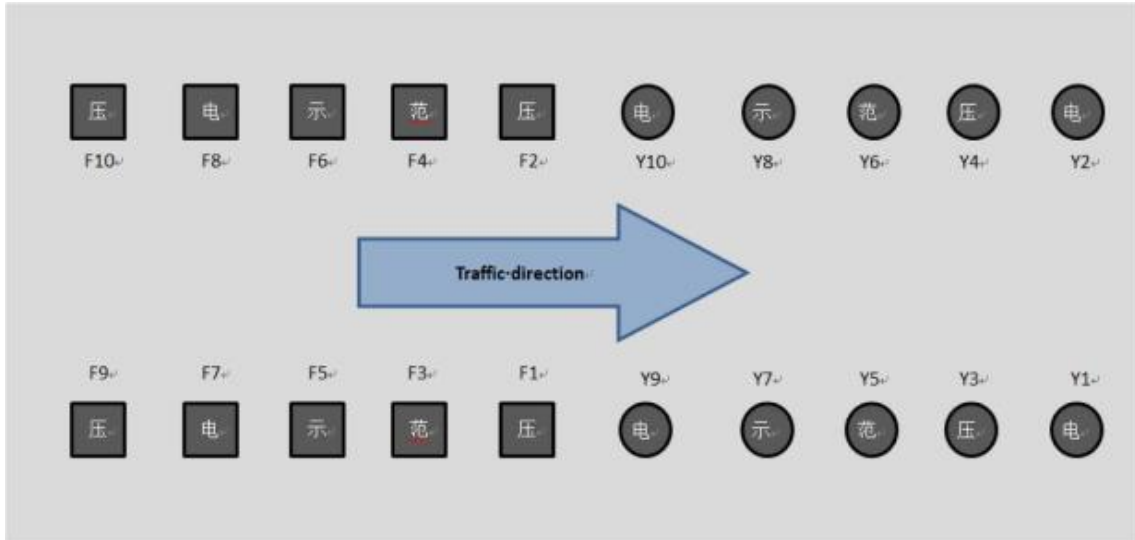


Figura 36: Cada PEH correspondente LED caracteres. Fonte:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

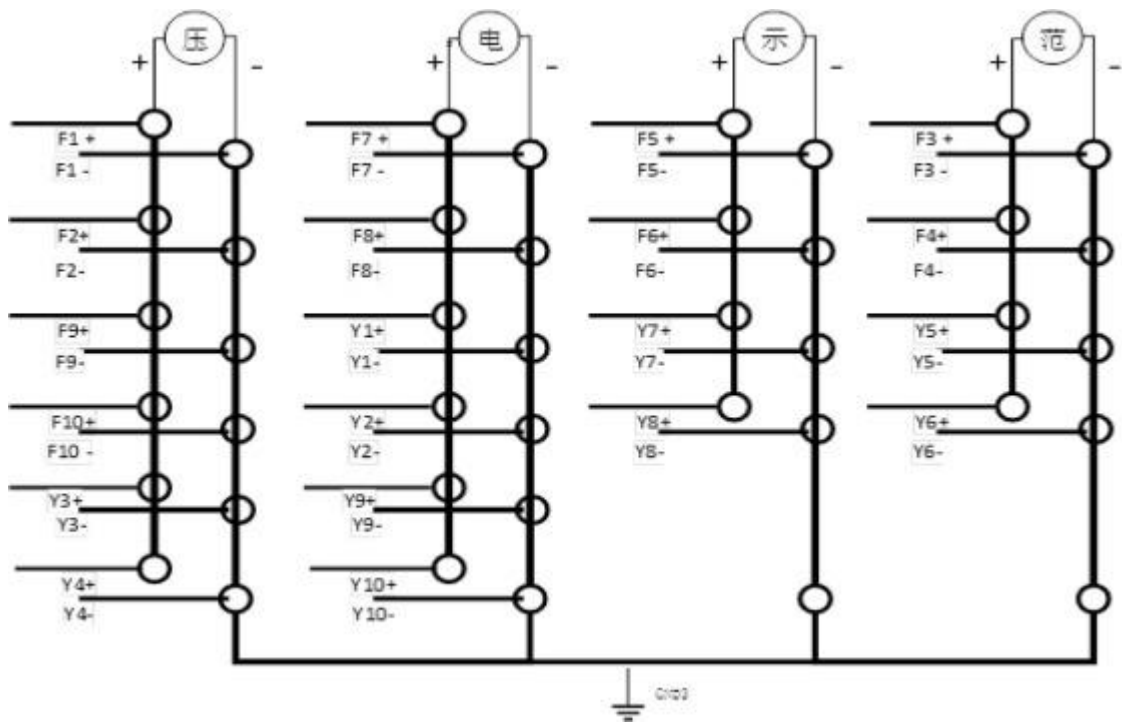


Figura 37: Diagrama de fiação da fonte de alimentação PEH. Fonte:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

Quando o veículo passa pela estrada de demonstração, o caractere chinês do LED que está conectado ao dispositivo do sensor correspondente acende. Os quatro caracteres de LED piscam alternadamente durante a passagem dos veículos pela estrada de demonstração. A duração das lâmpadas LED acesas depende da velocidade do veículo (menos tempo indica velocidade mais rápida). Além disso, o

brilho do LED é afetado pela velocidade do veículo e pela carga da roda. O LED ficará aceso e mais brilhante com maior velocidade e carga. [12]



Figura 38: SUV passando pela estrada de demonstração. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

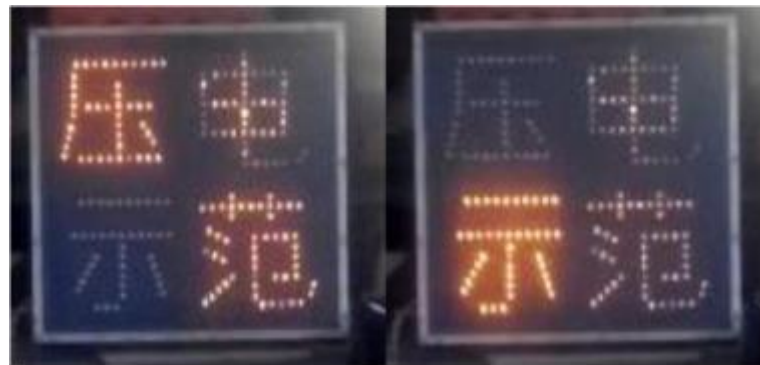


Figura 39: As luzes LED foram acesas por dispositivos PEH. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>

2.15. Cenário atual da piezoeletricidade no mundo

O cenário piezoelétrico tem sido um tema recorrente na busca pela geração de energias sustentáveis, estudada a partir de 1987, em diferentes apresentações dos cristais e, com eles, a localização de aplicação varia, onde estão suas aplicações. Avaliadas através de diferentes hipóteses, sempre com o objetivo de compilar e aprimorar estudos anteriores, que se tornam uma fonte essencial para a avaliação de pontos críticos desses sistemas.

É por esse motivo que, percorrendo os avanços e desenvolvimentos dessa tecnologia, verifica-se que sua primeira aplicação ocorre nos campos aeronáutico, médico, automóvel e, posteriormente, no setor rodoviário.

Avançando nessa linha cronológica, verificou-se que 13 anos depois, com base nessa tecnologia, foi desenvolvido um dispositivo capaz de fornecer energia a rádios e diferentes equipamentos utilizados pelas expedições.

Foi em 2006, quando a empresa JR East iniciou a primeira fase e decidiu usar e instalar as usinas piezoelétricas no piso de registro da estação de Marunouchi do metrô de Tóquio, para 2008 a segunda fase foi realizada com a instalação do sistema na estação Yaesu, em Tóquio, com a diferença de que, nesta segunda fase, os dispositivos foram instalados nas escadas para obter um maior campo de ação.

Por volta de 2007, dois arquitetos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts desenvolveram o sistema em um nível mais alto, onde pedestres estavam envolvidos em sua operação, criando um bloco composto de piezoelétricos para gerar energia mecânica com base no princípio básico dessa tecnologia, que é baseada na frequência e no peso, essa foi uma das primeiras abordagens reconhecidas em todo o mundo desde que essa ideia inovadora venceu o concurso de construção sustentável promovido pela Holcim na Suíça e tornou-se o modelo base para implementação .

O maior desenvolvimento dessa tecnologia na esfera civil ocorreu em 2010, quando a empresa Innowattech decidiu explorar a estrada, com um sistema piezoelétrico capaz de gerar energia elétrica por meio da vibração produzida pela passagem de veículos no pavimento de asfalto. Dos últimos eventos registrados em tecnologia no nível latino-americano, foi encontrado em 2012, quando a cidade de Medellín instalou esse sistema em um trecho próximo a um shopping center, essa

cidade é o ícone de desenvolvimento tecnológico mais próximo de Bogotá, que sua última invenção ocorreu em 2014, quando eles decidiram instalar piezoelétricos na sola de seus sapatos.

Pode-se observar que empresas como JR East e Innowattech, em suas investigações, foram capazes de determinar a quantidade de kW que essa tecnologia pode fornecer, enquanto a JR Easten entre suas fases 1 e 2 teve um aumento de mais de 100% na produção de energia esperada, uma vez que passou de produzir 10 kW por dia em sua fase inicial, para 500 kW por dia na segunda etapa, começou na estação de Yaesu e estimam que essa energia é capaz de acender uma lâmpada de 10 W por 80 min.

Por outro lado, temos a Innowattech, que é listada como uma das empresas pioneiras na invocação de tecnologia, em seus testes piloto eles obtiveram como resultado que em uma seção de 1 km foram gerados aproximadamente 200 kW por hora, onde estimavam que era energia suficiente para iluminar a seção.

Ao comparar a produção de cada empresa, que é baseada em um sistema instalado e em um local diferente, mas que compartilham o mesmo princípio básico da piezoelétrica, é aqui que a magnitude do desenvolvimento da tecnologia é evidente e como é a sua apresentação. Torna-se um fator diretamente proporcional à eficiência na produção de energia elétrica.

O resumo de todas as informações mencionadas acima é encontrado na tabela a seguir:

Tabela 1: Avanço da Piezoeletricidade

Companhia	Localização	Detalhes	Ano de aplicação	Observações
Comparison Microstrain	Estados Unidos	Seu principal mercado e a implantação de sensores piezoelétricos em campos aeronáuticos.	1987	Durante o desenvolvimento da tecnologia piezoelétrica foram dadas múltiplas aplicações e uma delas era a geração de eletricidade por meio de vibração.

Scheider Electric	Estados Unidos	Um dispositivo portátil que transforma energia mecânica em energia elétrica por meio da tecnologia piezoelétrica	2000	Esse é um dos usos mais comuns dessa tecnologia em todo o mundo.
Jr East	Japão	A empresa Jr East realizou a instalação de usinas piezoelétricas localizadas na passagem dos registros de acesso a estação de Marunouchi, no metrô de Tóquio.	2006	Essa tecnologia é usada para iluminar sinais luminosos nas estações de metrô.
James Graham	Estados Unidos	Eles propuseram a criação de um ladrilho que gera energia mecânica através do peso dos pedestres através de material piezoelétrico.	2007	Esse tipo de tecnologia já é encontrada em diversos locais no mundo.
Innowattech	Israel	Estes piezoelétricos foram instalados sob a camada de asfalto, a energia gerada é utilizada para iluminar as pistas e monitorar os dados de circulação.	2010	Tecnologia utilizada em todo mundo, onde é reconhecida pela alta eficiência.
Rota N	Colômbia	A instalação piezoelétrica foi	2012	Tecnologia utilizada na Colômbia

		utilizada em uma avenida muito movimentada pelos cidadãos nos finais de semana devido as visitas geradas para o centro comercial da cidade.		
Universidade Nacional	Colômbia	A eficiência e a vida útil dos elementos plantados nos sapatos são melhores procuradas, como os elementos são constituídos por material piezoelétrico.	2014	Tecnologia utilizada na Colômbia

3. Metodologia

Com base em estudos e pesquisas realizadas, iremos utilizar com base uma pesquisa realizada pelo Instituto de Tecnologia Technion de Israel e de acordo com uma revista “Isto é” publicada em 2016, que mostra resultados que podem ser utilizados aqui no Brasil.

O professor Haim Abramovich, fundador do instituto, afirma que um modelo de placa que utiliza cristais de origem piezoeétrica embutidos no asfalto, em uma rua com pelo menos 1,6 quilômetros, que possua quatro faixas e circulem aproximadamente 1000 veículos por hora, poderia gerar aproximadamente 0.4 MW, energia essa o suficiente para alimentar 600 residências.

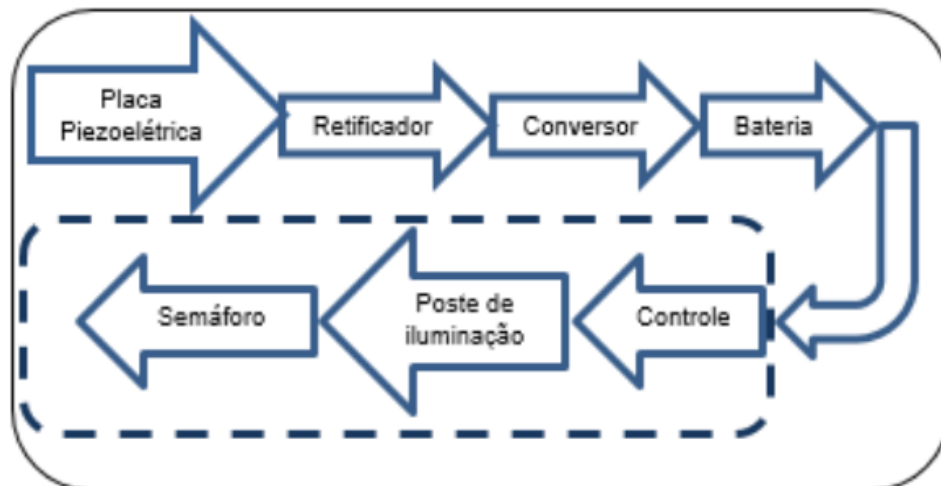


Figura 40: Fluxograma para ilustrar o funcionamento do sistema. Fonte: Autor

A nossa ideia inicial era projetar um quebra-molas, mas o mesmo precisaria de estudos em laboratório, o que não seria possível com o corona vírus. Então depois nos tivemos uma segunda ideia que seria projetar para a FOA, porem de acordo com as novas pesquisas seria necessário um fluxo constante de veículos pesados para obter um retorno financeiro mais rápido. E como na FOA não seria possível isso, decidimos mudar para a avenida Getúlio Vargas, onde tem um dos maiores fluxos de carros e veículos pesados da cidade de Volta Redonda.

Considerando que a instituição a ser adaptado esse sistema, apresentem somente duas faixas que serão utilizadas os cristais piezoeétricos, esse pavimento possui aproximadamente um quilômetro e que a circulação de veículos apresenta horários de pico, será utilizado a média de aproximadamente 150 automóveis por hora.

Adaptando os valores do estudo para a faculdade obtemos aproximadamente 0,0375 MW diários que podem alimentar aproximadamente 56 residências de acordo com o estudo.

Como se quer alimentar somente uma pequena região e se evitar um custo muito elevado de projeto, será utilizado somente 2 metros de asfalto para geração de energia, portanto obtemos aproximadamente 0,000075 MW diários ou 75 Watts diários.

A aplicação dessa tecnologia como solução para gerar energia elétrica de forma sustentável, não requer grandes obras, seu funcionamento ocorreria independentemente das condições climáticas, para a instalação sob o asfalto, as placas seriam instaladas com 5 cm de profundidade, não ocorre nenhum tipo de absorção do combustível dos veículos, não alteram as características da pista e não ocupam nenhum espaço público (JULIÃO, 2017). Esse tipo de tecnologia sendo implementadas, pode ser instalado em qualquer lugar da pista em diferentes metragens ao longo da avenida, o que já não é possível dizermos o mesmo para uma Hidroelétrica ou Termoelétrica, essa facilidade de concatenação é uma vantagem, sendo comparada com as gerações de energia elétrica convencional (G1.GLOBO, 2008). [11]

3.1. Modo de investigação

O método de pesquisa utilizado para a elaboração deste projeto, como já mencionado, consiste em quatro etapas, sendo a primeira etapa a abordagem metodológica empírica analítica, onde a partir das experiências encontradas em todo o mundo, a formulação e abordagem do problema, buscando determinar um resultado preliminar da viabilidade da instalação do sistema piezoelétrico em uma seção transversal piloto.

A segunda etapa incluiu pesquisa bibliográfica baseada em fontes de informação secundárias, uma vez que as fontes documentais utilizadas como informação de base correspondem principalmente a artigos científicos feitos a partir de outras investigações com maior profundidade e amplitude em sua aplicação, como é o caso da empresa Innowattech.

A terceira etapa foi baseada na análise e compreensão das informações coletadas inicialmente na arena internacional, onde esses dados foram essenciais para determinar os fatores necessários para a aplicação na cidade de Volta Redonda.

Por fim, na quarta etapa, a partir da análise dos volumes dos veículos, foi selecionado o perfil da seção transversal do piloto, que foi analisado em detalhes para determinar sua composição em um dia de aferição, estabelecendo o tipo de veículo e a porcentagem que eles os compõem, seguidos de uma projeção que reflete que outros perfis são atos para a instalação do sistema, em busca de gerar energia sustentável para o meio ambiente.

3.2. Parâmetros para implementação

Ao analisar as diferentes implementações apresentadas neste capítulo, tanto em sua forma como nos resultados obtidos com o uso da tecnologia piezoelétrica em todo o mundo e focando naquelas que envolvem veículos, como principal ferramenta do sistema, extraiu-se que existem fatores determinantes para que o sistema atinja a eficiência esperada, que será retomada novamente para a escolha do perfil da seção piloto, dentro da qual foram encontrados os seguintes:



- Volume constante de tráfego de veículos, da ordem de 600 veículos pesados por hora;
- Trânsito de veículos pesados;
- Capacidade do número de veículos, para saber o volume máximo;
- Condições de instalação;
- Custo de implementação.

A tecnologia da Innowattech propõe que 200 kWh possam ser produzidos em uma rodovia de 1 km, esse valor foi obtido com base em geradores embutidos ao longo da estrada em duas faixas. Com um trânsito de aprox. 600 veículos pesados por hora. Essa tecnologia, que é organizada abaixo da superfície do pavimento, consiste em pastas plásticas com pastilhas produtoras de energia da Innowattech.

O custo para 1 km de instalação é de U\$ 650.250, valor que cobre a implementação do sistema em termos de sistemas de coleta, armazenamento, distribuição. [18]

A seguir uma tabela da Innowattech onde mostra as características da tecnologia:

Tabela 2: Características da Tecnologia Innowattech

Site do aplicativo	Características descrição	Imagem
Nas estradas	200kwh/h podem ser produzidos em uma rodovia de 1km, esse valor foi obtido com base nos geradores embutidos ao longo da estrada em duas linhas. Com um trânsito de aproximadamente 600 veículos pesados por hora, a uma velocidade média de 72 km por hora.	
Pesagem em movimento (sensor I-WIm)	Tecnologia que é organizada sob a superfície do pavimento, considerando em pastas de plástico com almofadas de produção.	

Com a tecnologia da empresa Innowattech, a energia elétrica é gerada na cidade de Haifa, usando a pressão gerada pelos pneus de um veículo, esses dispositivos são instalados com uma profundidade relativa entre 3 e 6 cm em relação ao grau do caminho. A seguir tabela da diferença da Innowattech e Genziko

Tabela 3: Diferença da Innowattech e Genziko

	Números da Innowattech	Genziko Números	Diferença entre Genziko e Innowattech
Veículos por hora	600	600	0.0
Velocidade do veículo (mph)	45	65	0.5
Energia reivindicada gerada, 1km(kw)	150	13600	89.7
Número de colheitadeiras	9800	2037	-0.8
Custo por km	\$650.250	\$27.200.000	40.8

Em todo o mundo, o pioneiro no desenvolvimento dessa tecnologia nos trilhos é a Innowattech Energy Harvesting Systems de Israel, encarregada de desenvolver o fenômeno da piezoelectricidade, a fim de transformar energia mecânica externa em energia elétrica com eficiência, esse efeito é conhecido como piezo-mecânico comprimido. A tecnologia de coleta de energia piezoelétrica baseia-se em aproveitar a energia do pavimento usando a pressão dos veículos devido à gravidade, onde a eletricidade é gerada através da deformação dos materiais do pavimento. Essa tecnologia também serve para monitorar a estrada e com a eletricidade produzida para iluminá-la, ou para ser usada em semáforos, câmeras de segurança, sinais de trânsito, entre outros, esses são os benefícios que a implementação do IPEG oferece. O material piezoelétrico produz eletricidade quando submetido a tensão ou vibração, são cerâmicas cristalinas onde a tensão e a tensão paralelas à direção da polarização de um material piezoelétrico produzem a carga elétrica. Olhando para ela do ponto de vista físico e matemático, essa energia é produzida de maneira uniaxial, o que significa apenas em uma direção.

3.3. Estudo da Avenida Getúlio Vargas

O trabalho foi realizado através de estudos bibliográficos acerca do tema, da utilização de sensores piezoelétricos em rodovias ou avenidas muito ou pouco movimentadas. A avenida que foi escolhida na cidade de Volta Redonda, foi a Presidente Getúlio Vargas, sendo essa a mais movimentada da cidade, possuindo assim o maior percentual de retorno financeiro num menor intervalo possível.

Após estudos e dados obtidos, será constatada a medição do fluxo de veículos que passam pelas duas faixas dessa avenida, considerando a relação média entre horários de picos e pouco com movimento, tanto de automóveis, quanto de caminhões e motocicletas.

Serão estabelecidas regiões específicas para a instalação dos sensores, evitando um grande custo de projeto, foram escolhidas duas regiões da Avenida Getúlio Vargas, essas regiões apresentarão 100 metros cada de sensores piezoelétricos.

Os estudos bibliográficos, tais como os dados obtidos de levantamento de fluxos de veículos na avenida especificada fazem parte de uma etapa inicial do projeto, que tem por objetivo implantar esse sistema de sensores em qualquer localidade. Com base nos dados obtidos dos fluxos de veículos nota-se uma grande viabilidade da instalação do conjunto de sensores.



Figura 41: Localização no Mapa da Avenida Getúlio Vargas. Fonte:

https://www.google.com/maps?q=google+maps+avenida+getulio+vargas+volta+redonda&um=1&ie=UTF-8&sa=X&ved=2ahUKEwjTOrJ5LbpAhXeG7kGHRtGBM4Q_AUoAXoECA0QAw.



Figura 42: Avenida Getúlio Vargas, no horário noturno. Fonte: http://www.focoregional.com.br/Noticia/testes-na-getulio-vargas-tem-bons-resultados?fb_comment_id=1451391851574179_1451513011562063.

A próxima etapa do projeto tem como foco gerenciar o sistema de energia e se possível alimentar os postes de luz da região com tapetes piezoelétricos, que serão alocados abaixo do asfalto com o devido tratamento mecânico para assim os elementos conversores de energia mecânica em elétrica possam suportar cargas mais elevadas, por ser uma região onde passam muitos veículos pesados, como caminhões e ônibus.

O módulo retificador transforma o sinal de pulsos de corrente gerado pela passagem dos carros nesse tapete piezoelétrico na frequência de passagem dos mesmos em um sinal de corrente contínua, necessária para o armazenamento na bateria. O módulo conversor controla o nível do sinal de corrente contínua para que o sinal possa carregar o banco de baterias do módulo posterior. Logo assim esses dois módulos são responsáveis por modificar tanto a forma quanto o módulo do sinal elétrico gerado para fornecer ao banco de baterias.

E, por último, o módulo de bateria será responsável por alimentar o sistema de controle dos postes de luz da região a ser implantado o sistema, um fator importante por questão de segurança, o módulo de bateria deverá conter um controlador de cargas para gerenciar o nível de carga das baterias, para passar informações ao sistema de controle para evitar níveis críticos de descarregamento.

3.4. Estudo sobre o fluxo de veículos

Com a ocorrência da Covid-19 não foi possível se obter dados direto das instituições responsáveis por essa avenida, portanto foi necessário a constatação de outros meios para se obter tais dados.

Foram escolhidos dois pontos específicos da avenida para realização desse estudo, vamos utilizar pontos de referências para facilitar o entendimento da localidade, são eles: em frente à entrada da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) na Vila Santa Cecília e em frente ao posto do Detran localizado na Amaral Peixoto.

Os seguintes dados foram obtidos considerando os horários de picos durante a semana:

Intervalo	Motos/minuto	Carros/minuto	Veículos Pesados/minuto
Segunda-feira das 07:00 às 09:00	25	45	9
Sexta-feira das 17:00 às 19:00	25	45	9
Segunda-feira a sexta-feira, exceto horário de pico	10	37	8
Sábado das 08:00 às 14:00	8	20	5
Sábado das 14:00 às 22:30	4	10	2
Sábado das 22:30 às 00:00	5	6	1
Domingo de 07:00 às 00:00	5	6	1

Para as motos:

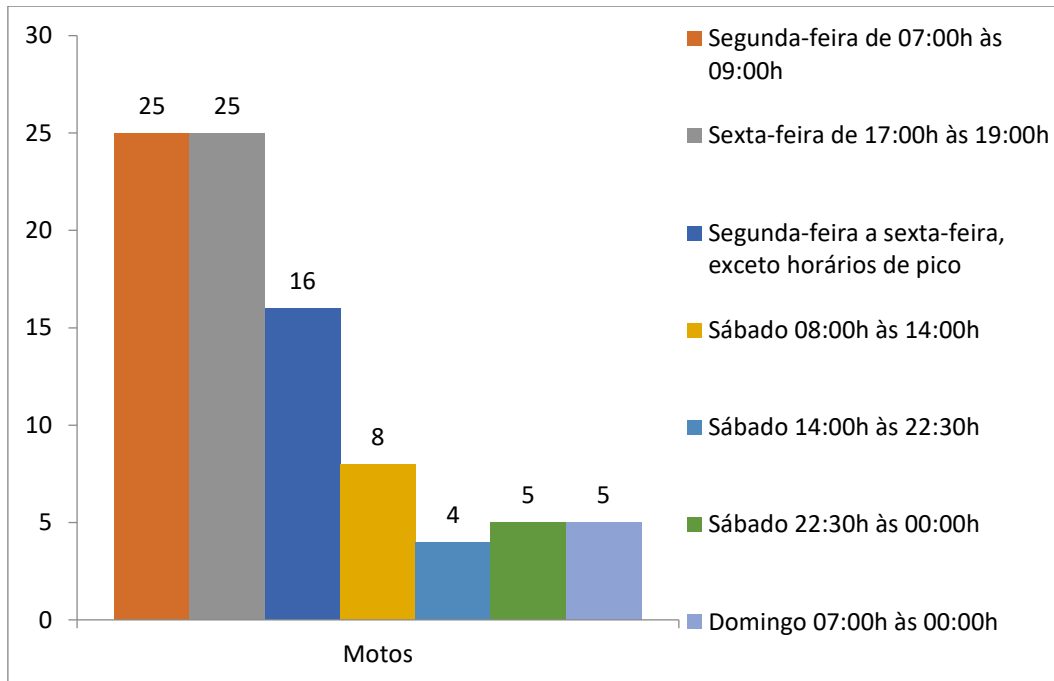


Gráfico 1: Média de motos/minuto. Fonte: Autor.

Para os carros:

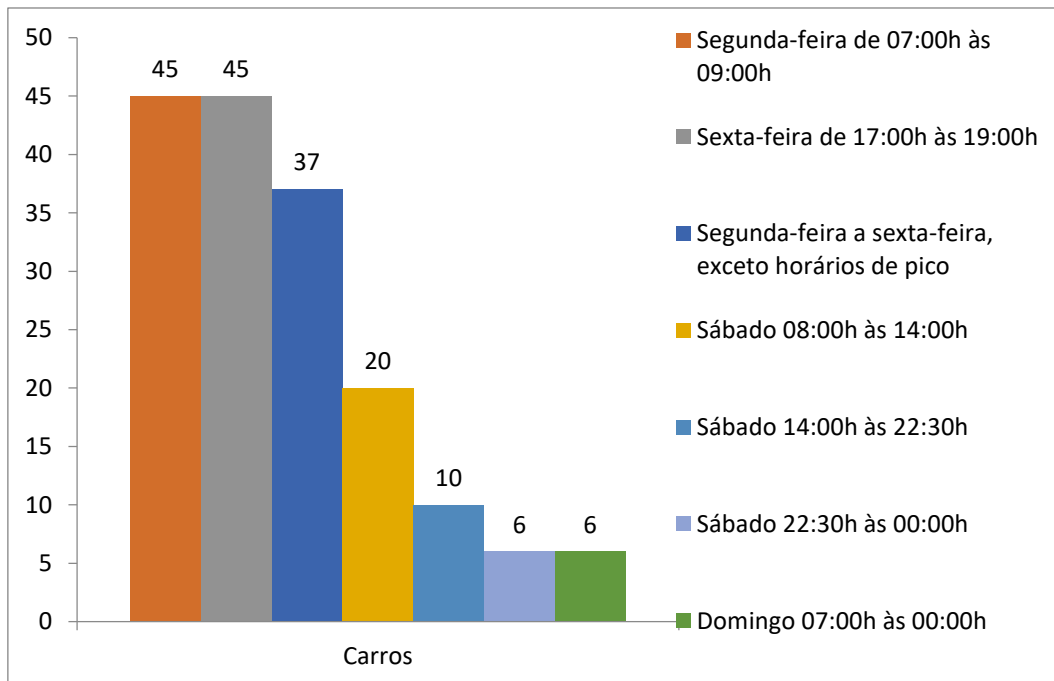


Gráfico 2: Média de carros/minuto. Fonte: Autor.

Para veículos pesados:

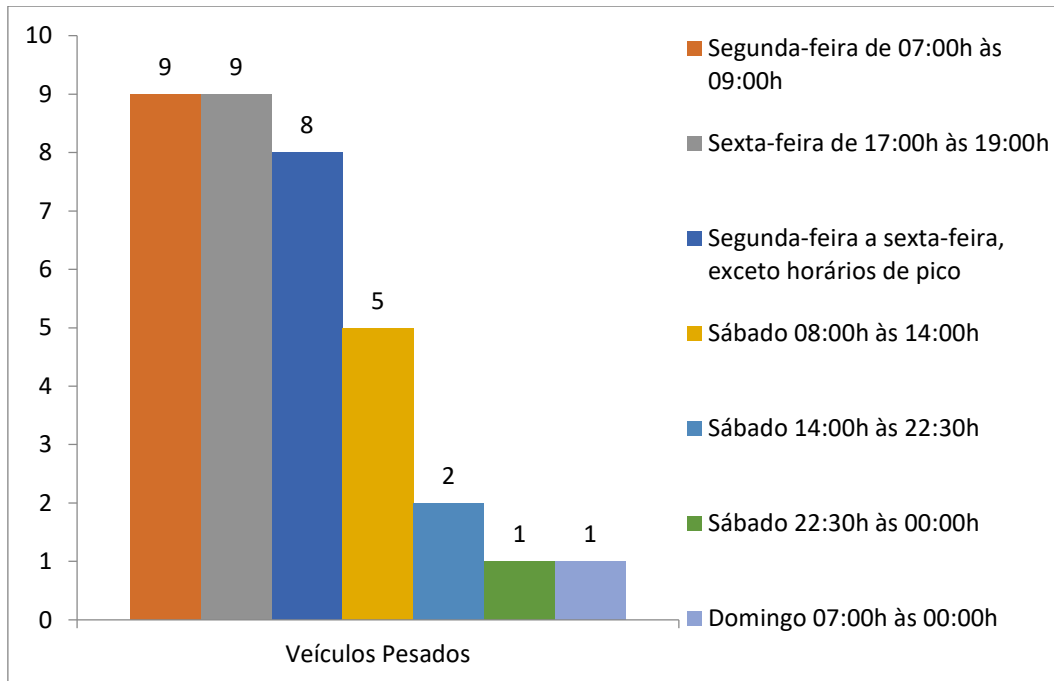


Gráfico 3: Média de veículos pesados/minuto. Fonte: Autor.

3.4.1. Estimativa para o cenário sem o isolamento social

Lembrando que os valores apresentam diferença em relação ao valor real, ou seja, a quantidade de carros no momento que não existia a pandemia. De acordo com a Globonews a circulação de veículos caiu de 50% a 80% em regiões do Rio de Janeiro, segundo dados da prefeitura.

Devido essa situação e se querer dados o mais próximo do real, vamos utilizar um fator multiplicador de 1,5 vezes no fluxo de veículos, para considerar uma situação normal do fluxo de veículos nos dias de semana e na hora especificada.

A seguir uma tabela considerando “dias normais” durante a semana e nos horários que consideramos como de pico:

Intervalo	Motos/minuto	Carros/minuto	Veículos Pesados/minuto
Segunda-feira de 07:00h às 09:00h	38	68	14
Sexta-feira de 17:00h às 19:00h	38	68	14

Segunda-feira a sexta-feira, exceto horário de pico	25	56	12
Sábado de 08:00h às 14:00h	12	30	8
Sábado de 14:00h às 22:30h	6	15	3
Sábado de 22:30h às 00:00h	8	9	2
Domingo de 07:00h às 00:00h	8	9	2

Para motos:

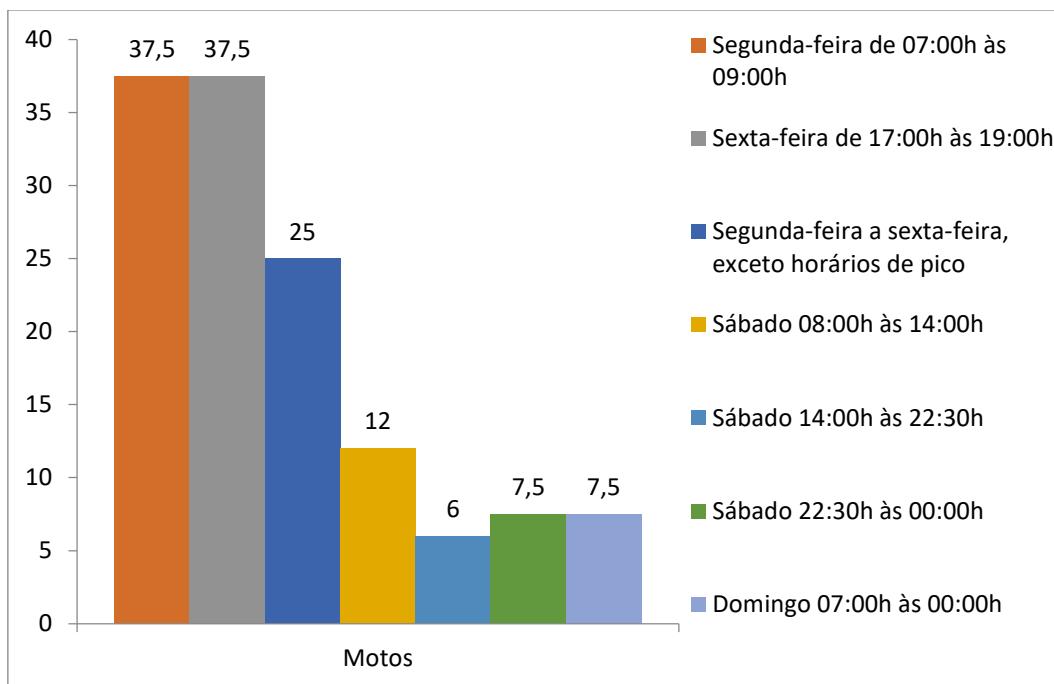


Gráfico 4: Média de motos/minuto. Fonte: Autor.

Para carros:

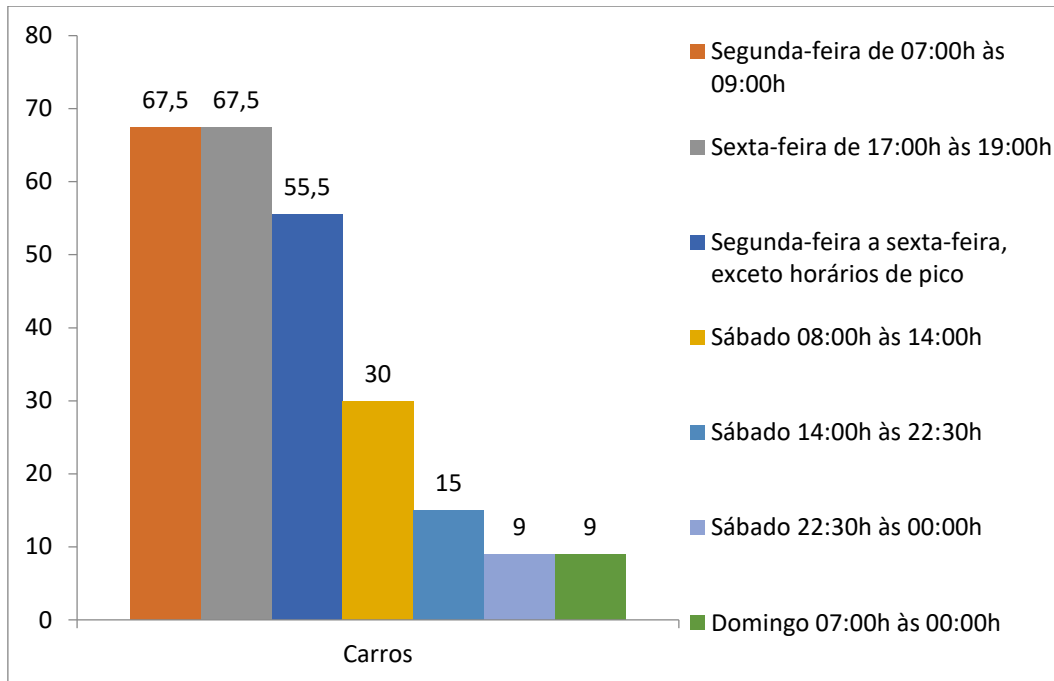


Gráfico 5: Média de carros/minuto. Fonte: Autor.

Para veículos pesados:

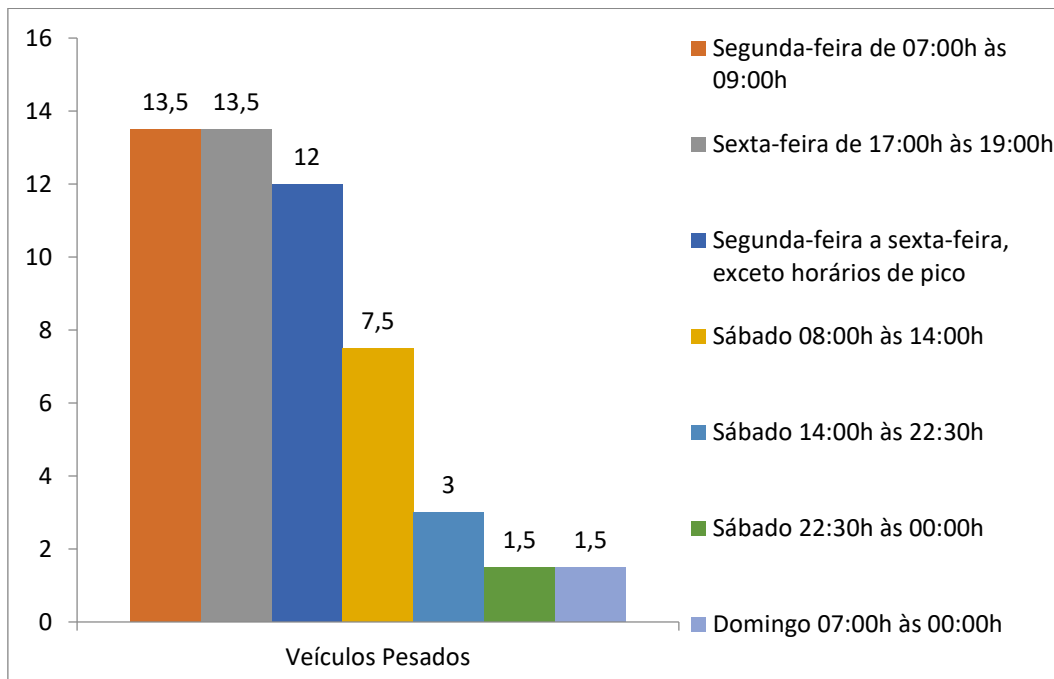


Gráfico 6: Média de veículos pesados/minuto. Fonte: Autor.

4. Resultados e Discussões

4.1. Projeção Na Avenida Getúlio Vargas

Com o Estudo do fluxo de veículos foi possível observar que a Avenida Getúlio Vargas apresenta um fluxo de veículos superior a 600 veículos pesados por hora, sendo assim possível a implementação do sistema piezoelétrico proposto pela empresa Innowattech, que propõe a utilização de sensores abaixo do asfalto.

Como foi citado anteriormente a tecnologia da Innowattech apresenta a possibilidade de se obter 200 kWh por 1 quilômetro de estrada em uma faixa de pista.

Agora o importante para realizações dos cálculos, é fazer as devidas conversões em relação ao peso dos veículos já que o projeto idealizado por Haim Abramovich prevê o fluxo de 600 veículos pesados, portanto foi constatado que um veículo pesado apresenta o peso médio de 10 toneladas, veículos leves apresentam em média 1,2 toneladas, e motos apresentam um valor médio de 150 quilos. Com base nessas informações é possível realizar a conversão de veículos leves e motos em veículos pesados.

No caso de automóveis teremos uma relação de 8,3 automóveis equivalentes a 1 veículo pesado (considerando ônibus e caminhões de porte médio). E em relação as motos, teremos 66,7 motos para 1 veículo pesado.

Os cálculos serão apresentados de duas formas, uma em situação normal, ou seja, sem apresentar o Covid-19, e outra considerando a presença da Covid, ou seja, maior parte da população de quarentena diminuindo assim consideravelmente o fluxo de veículos.

4.1.1. Considerando dias normais

Fluxo de veículos em dias normais apresentaram uma média aproximada de 36 veículos leves (carros de passeio) por minuto (2160 por hora), 19 motos por minuto (1140 por hora) e 8 veículos pesados por minuto (480 por hora).

Realizando as conversões realizadas anteriormente em relação ao peso desses veículos temos um total de aproximadamente 757 veículos pesados por hora circulando nessa avenida.

Como nosso valor obtido foi diferente da empresa Innowattech iremos fazer um pequeno reajuste no valor que seria utilizado considerando o trecho de 1 km.

$$600 \text{ veíc/h} \rightarrow 200 \text{ kWh}$$

Considerando a estimativa de 757 veículos nessa avenida, que possui 3 faixas, então podemos dizer que circulam 252 veículos por faixa.

$$252 \text{ veíc/h} \rightarrow 84 \text{ kWh (por faixa)}$$

Uma geração de 84 kWh foi obtida por 1 km, portanto em 100 m de uma pista iremos obter 8,4 kWh.

$$1000 \text{ m} \rightarrow 84 \text{ kWh.}$$

$$100 \text{ m} \rightarrow 8,4 \text{ kWh}$$

Como a pista apresenta 3 faixas tem-se:

$$1 \text{ faixa} \rightarrow 8,4 \text{ kWh}$$

$$3 \text{ faixas} \rightarrow 25,2 \text{ kWh}$$

Este projeto irá gerar 25.2 kWh por zona de aplicação, razão pela qual ao longo da seção transversal da Avenida Getúlio Vargas, teremos uma geração de 605 kW por dia.

$$1 \text{ hora} \rightarrow 25,2 \text{ kW}$$

$$24 \text{ horas} \rightarrow 605 \text{ kW.}$$

4.1.2. Cálculo realizado em condições da Covid-19:

Fluxo de veículos em dias normais apresentaram uma média de 25 veículos leves (carros de passeio) por minuto (1440 por hora), 13 motos por minuto (780 por hora) e 5 veículos pesados por minuto (300 por hora).

Realizando as conversões realizadas anteriormente em relação ao peso desses veículos temos um total de aproximadamente 450 veículos pesados por hora nessa avenida.

Como nosso valor obtido foi diferente da empresa Innowatech iremos fazer um pequeno reajuste no valor que seria utilizado durante 1 quilometro.

$$600 \text{ veíc/h} \rightarrow 200 \text{ kWh}$$

Considerando a estimativa de 450 veículos por hora nessa avenida, que possui 3 faixas, então podemos dizer que circulam 150 veículos por faixa.

$$150 \text{ veíc/h} \rightarrow 50 \text{ kWh (por faixa)}$$

Uma geração de 50 kWh foi obtida por 1 km, portanto em 100 m de uma pista iremos obter 5 kWh.

1000 m → 50 kWh.

100 m → 5 kWh

Como a pista apresenta 3 faixas tem-se:

1 faixa → 5 kWh

3 faixas → 15 kWh

Este projeto irá gerar 15 kWh por zona de aplicação, razão pela qual ao longo da seção transversal da Avenida Getúlio Vargas, teremos uma geração de 360 kW por dia.

1 hora → 15 kW

24 horas → 360 kW

Descobrimos que a aplicação em 1 km tem um valor de U\$ 650.250 (seiscentos e cinquenta mil e duzentos e cinquenta dólares) por faixa, portanto, para um comprimento de 100m, o custo de implementação será de U\$ 65.020 (sessenta e cinco mil e vinte dólares) por faixa.

1000 m → U\$ 650.250

100 m → U\$ 65.020

Para as 3 faixas o projeto terá um custo de U\$ 195.061, custo que envolve apenas o custo de implementação da tecnologia com seus respectivos pontos de coleta, armazenamento e distribuição para a iluminação pública.

4.2. Análise de obra civil

Foi realizado um levantamento de dados para uma estimativa de quanto será o custo da obra de acordo com o DNIT. [17]

A seguir uma figura onde apresenta o custo de pavimentação e despesas com manutenções futuras:

<small>MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES</small> DNIT <small>DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA E ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT</small> <small>SAN - QUADRA 3 LOTE "A" EDIF. NÚCLEO DOS TRANSPORTES - CEP 70040-802 - BRASÍLIA DF</small> <small>COPLAN / DPP / DNIT</small>			
MODAL RODOVIÁRIO			
OBRA / SERVIÇO	INTERVALO		MÉDIA R\$ / Km
	Lim.Inferior	Lim.Superior	
CONSTRUÇÃO			
IMPLANTAÇÃO/PAVIMENTAÇÃO (Pista Simples) Faixa 3,6m e Acostamento 2,5m		2.450.724,65 a 3.464.544,82	2.958.000,00
IMPLANTAÇÃO/PAVIMENTAÇÃO (Pista Simples) Faixa 3,6m e Acostamento 1,0m (até Classe III)		1.800.200,77 a 2.307.381,74	2.054.000,00
ADEQUAÇÃO DE CAPACIDADE	CONSTRUÇÃO DE TERCEIRA FAIXA E RESTAURAÇÃO DA PISTA EXISTENTE	1.683.937,35 a 1.955.503,69	1.820.000,00
	DUPLICAÇÃO C/ CONSTRUÇÃO DE PISTA NOVA (2 Faixas) + RESTAURAÇÃO DE PISTA EXISTENTE + CANTEIRO CENTRAL	3.498.348,27 a 7.671.255,42	5.585.000,00
MANUTENÇÃO			
RESTAURAÇÃO		359.384,95 a 1.121.545,63	740.000,00
RECONSTRUÇÃO		1.198.663,59 a 1.947.697,44	1.573.000,00
PROGRAMAS	RESTAURAÇÃO C/ MELHORAMENTOS	1.101.767,94 a 1.436.085,53	1.269.000,00
	CREMA 1ª ETAPA (previsão)	198.357,40 a 298.850,50	249.000,00
	CREMA 2ª ETAPA (previsão)	596.713,20 a 697.455,50	647.000,00

Figura 43: Detalhamento do custo de obra civil. Fonte: DNIT, 2017.

E a seguir despesas com sinalização:

SINALIZAÇÃO			
HORIZONTAL - Emulsionada em solvente (1 ANO - 0,4mm)	6.219,00	6.200,00	R\$ 13,82 / m ²
HORIZONTAL - Emulsionada em água (2 ANOS - 0,5mm)	7.983,00	8.000,00	R\$ 17,74 / m ²
HORIZONTAL - Emulsionada em solvente (2 ANOS - 0,6mm)	15.525,00	15.500,00	R\$ 34,50 / m ²
HORIZONTAL - Material Termoplástico - HotSpray	22.342,50	22.300,00	R\$ 49,85 / m ²
VERTICAL	6.416,32	6.400,00	R\$ 641,63 / m ²

Figura 44: Detalhamento do custo de sinalização. Fonte: DNIT, 2017.

Valores de conservação:

CONSERVAÇÃO			KM / ANO
CONSERVAÇÃO ROTINEIRA PISTA SIMPLES	15.400,00	a 60.200,00	37.800,00
CONSERVAÇÃO ROTINEIRA PISTA DUPLA	26.600,00	a 110.600,00	68.600,00
CONSERVAÇÃO ROD. NÃO PAVIMENTADA	36.400,00	a 81.200,00	58.800,00
OBSERVAÇÕES:			
1) P/ os casos específicos de TRÁFEGO PESADO considerou-se as soluções:			
PAVIMENTO INVERTIDO - IMPLANTAÇÃO/PAVIMENTAÇÃO (Pista Simples)	4.392.778,22	a 5.761.472,24	5.077.000,00
PAVIMENTO RÍGIDO - IMPLANTAÇÃO/PAVIMENTAÇÃO (Pista Simples)	3.520.028,48	a 5.227.340,75	4.374.000,00

Figura 45: Detalhamento do custo de conservação do trecho. Fonte: DNIT, 2017.

Portanto temos:

Tabela 4: Custo para implementação da tecnologia

Obra/ Serviço	Custo médio por km	Quantidade	Total
Implantação/pavimentação (pista simples 3,6 metros)	2.095.800,00 R\$	0,3 Km	628.740 R\$
Manutenção (restauração)	740.000,00 R\$	0,1 Km	74.000 R\$
Sinalização Vertical	6.408,16 R\$	0,1 km	640,81 R\$
Conservação rotineira (pista simples 3,6 metros)	37.800,00 R\$	0,3 Km	11340 R\$
Total			714.720 R\$

Passando o valor para o dólar atual (2020) que vale 5,89 reais na data de 13/05/2020 temos um valor de U\$121.344,65.

Valor de implementação piezoelétrica mais obra civil temos:

Tabela 5: Valor da implementação da piezoeletricidade.

Valor sensores mais instalações	U\$ 195.061,00
Valor médio da obra civil	U\$ 121.344,65
Total do projeto	U\$ 316.405,65

4.3. Análise Econômica Financeira

Com base nas análises realizadas neste estudo percebemos a viabilidade do empreendimento. Pode ser gerado em média 605kWh por dia na avenida, logo aproximadamente 217.800 kWh por ano, com o preço do kwh saindo por aproximadamente 0.626 R\$/kWh. Com o valor total convertido em reais ficaria o custo total do projeto em R\$: 1.863.629,28, isso significa que o investimento no período de análise demoraria 14 anos para conseguir retornar o capital investido. Comparando com os sistemas de geração de energia já consolidados no país, podemos destacar:

A geração de energia por meio de PCH's, que são pequenas centrais hidrelétricas, que se caracterizam por possuírem uma potência instalada de até 30MW, apresentam um retorno de investimento que gira em torno de 8 anos. No caso de usinas hidrelétricas, pode-se alcançar um prazo de 30 a 50 anos por conta do alto custo financeiro de sua construção. [14] [15]

A geração de energia eólica, que apresenta um payback que pode variar de 11 a 20 anos, em locais que apresentam condições eólicas favoráveis, que não é o caso de nossa região. Os sistemas de captação de energia fotovoltaicos, seja em usina ou até mesmo em sistemas independentes instalados em residências, demoram em torno de 16 anos no caso das usinas e de 5 a 8 anos quando se fala em sistemas residenciais para retorno do capital investido. [13] [15] [16]

Por fim, a geração de energia por meio de usinas termoelétricas, as quais possuem um tempo de 30 anos para se obter o retorno financeiro esperado. Podemos observar, na tabela a seguir, a comparação do tempo de retorno das fontes de geração de energia citadas:

Tabela 6: Tempo de retorno das fontes de geração de energia

Fonte geradora	Payback
Piezoelasticidade	14 anos
Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)	8 anos
Usina Hidrelétrica	30 a 50 anos
Usina Eólica	11 a 20 anos
Usina Fotovoltaica	16 anos
Placa Solares	5 a 8 anos
Usina Termoelétrica	30 anos

5. CONCLUSÃO

Piezoelétricidade é uma fonte nova de energia, apesar de ser uma energia limpa e sustentável, os investimentos realizados em suas pesquisas e aprimoramentos são de certa forma limitada. No entanto, é indiscutível os benefícios de uma fonte de energia limpa, que não agrida o meio ambiente.

Com o grande consumo da energia elétrica, é necessário buscar certos meios alternativos para suprir essa demanda de consumo, mas que não tenham tanto impacto ambiental. Na natureza é possível encontrar certos cristais que conseguem obter energia elétrica limpa e de baixo custo, usando o efeito piezoelétrico.

De acordo com os avanços tecnológicos, foram desenvolvidas as cerâmicas piezoelétricas com uma ampla área de aplicação e molde, além de ser uma excelente área de estudo podendo trazer grandes progressos futuramente na engenharia. É um tipo de aplicação que pode ser implementada em qualquer lugar, onde haja fluxo, sendo de pessoas ou automóveis, utilizando a energia dissipada no solo pelo fato das pessoas caminharem ou os automóveis rodarem nas ruas, podendo através dessas cerâmicas piezoelétricas aproveitar essa energia mecânica convertendo-a em elétrica, minimizando assim os impactos ambientais que uma usina pode causar no meio ambiente.

Sendo assim, pode-se dizer que é possível nos dias atuais a utilização desse sistema em avenidas ou derivados, visto que o tempo de retorno do capital investido aqui apresentado mostra que é uma alternativa viável aos meios de geração de energia mais utilizados. Tal competitividade se confirma pelo fato de ser um sistema que se aproveita de uma atividade corriqueira e essencial do ser humano que é seu deslocamento, seja qual for a motivação do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RODRIGUES, Tatiane Lucio. **Gerador de energia Piezoelétrico**. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20102/1/2017_TatianeLucioRodrigues.pdf>. Acesso em: 19/10/2019.
- [2] Empresa de pesquisa energética -EPE. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 21/10/2019.
- [3] PERLINGEIRO, A. R.; PIMENTA, G. M.; DA SILVA, S. E. **Geração de energia através de materiais piezoelétricos**. Disponível em: <<http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Energia%20atrav%C3%A9s%20de%20Materiais%20Piezoel%C3%A9tricos.pdf>>. Acesso em: 23/10/2019.
- [4] Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT. **Estratégias de eficiência energética em praças de pedágio rodoviário**. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/2018/08/22/Relatorio_Final.pdf>. Acesso em: 23/10/2019.
- [5] CERAMTEC T. C. E. **“Conceitos Básicos da Tecnologia Piezocerâmica: Princípio de Funcionamento Piezoelétrico, Perovskite e Polarização”** <https://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/piezoceramicos/basicos/>, acesso em 24/10/2019.
- [6] PRADO JUNIOR, H. **“Efeito Piezoelétrico”**. Disponível em: <<http://artesmedicas.com/piezoelétrica.htm>>. Acesso em: 11/11/2019
- [7] EIRAS, J. A. **Materiais Piezoelétricos**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAghqQAH/capitulo-2-materiais-piezoelétricos>>. Acesso em 15/11/2019
- [8] DA SILVEIRA, Evanildo. **Pesquisadores desenvolvem material que gera energia elétrica quando pressionado**. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2012/07/072-075-171.pdf>>. Acesso em: 16/11/2019.
- [9] HILL, Davion; AGARWAL, Arun; TONG, Nellie. **Assessment of piezoelectric materials for roadway energy harvesting: Cost of Energy and Demonstration Roadmap**. California, jan. 2014.

- [10] MARINHO. A. R. et al. **Materiais Piezoelétricos**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/LeonardoVilarinho/materiais-piezoelétrico>>. Acesso em: 11/02/2020.
- [11] DA SILVA. M. G. F.; DE OLIVEIRA. J.M. L.; OLIVEIRA. L. S. **Gerando energia elétrica sustentável através dos efeitos piezoelétricos**. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_marcia_publicacao_revisado.pdf>. Acesso em: 11/02/2020.
- [12] Revista Internacional de Pesquisa e Tecnologia de Pavimentos, Volume 11, Edição 2, março de 2018, Páginas 168-175. **Um estudo preliminar sobre o sistema de fornecimento de energia piezoelétrico em rodovias**. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S199668141630195X>>. Acesso em: 20/03/2020.
- [13] TAVARES, Estevão. **Energia Eólica: Viabilidade Técnica e Econômico-Financeira**. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/208/1/MONOGRAFIA_EnergiaE%C3%B3licaViabilidade.pdf>. Acesso em: 05/05/2020.
- [14] HOMRICH, A. S.; FILHO. N.C. **Análise comparativa de investimentos no setor elétrico: implantações de pequenas centrais hidrelétricas x linhas de transmissão**. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2006_tr510342_8178.pdf>. Acesso em: 06/05/2020.
- [15] BRACIANI, Urian. **Estrutura de custos para implantação das usinas de geração de energia elétrica no Brasil**. Disponível em: <<http://tcc.bu.ufsc.br/Economia303023.pdf>>. Acesso em: 20/05/2020.
- [16] WA SOLAR ENERGIA SOLAR. **Tempo de retorno do investimento em energia solar**. Disponível em: <<http://www.wasolar.com.br/tempo-de-retorno-do-investimento-em-energia-solar>>. Acesso em: 20/05/2020
- [17] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. **Custos Médios Gerenciais, janeiro de 2018**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/custos-e-pagamentos/custo-medio-gerencial/copy_of_ANEXOIXCUSTOMDIOGERENCIALJULHO2017.pdf>. Acesso em: 13/05/2020.

- [18] ZAPATA, D. A. T.; GUTIÉRREZ, N. K. C. **O uso de Piezoelectricidade para a geração de energia sustentável como projeto piloto em um perfil de estrada de Bogotá.** Disponível em: < <https://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/14488/1/Proyecto%20de%200grado%20piezoelectricos%20en%20perfil%20vial%20piloto%20en%20Bogot%C3%A1.pdf>>. Acesso em: 15/04/2020.
- [19] DECICINO, Ronaldo. **Desenvolvimento sustentável – Como surgiu esse conceito?** Disponível em < <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/desenvolvimento-sustentavel-2-como-surgiu-esse-conceito.htm>>. Acesso em 18/10/2019.
- [20] Redação do site Inovação Tecnológica. **Pneus produzem energia para recarregar baterias.** Disponível em: < <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=geradores-piezoelectricos-pneus-geradores-energia&id=010170110524#.XtQT6jpKjIU>>. Acesso em: 20/11/2019.
- [21] ROSA, Mayra. **Designers criam alternativa em energia eólica para Masdar City.** Disponível em: < https://ciclovivo.com.br/inovacao/tecnologia/designers_criam_alternativa_em_energia_eolica_para_masdar_city/>. Acesso em 20/11/2019.
- [22] MARGRAF, R.; SALVIATO, V. **Materiais piezoelétricos e piezoelectricidade.** Disponível em: < https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_UFSC/Materiais_EEL_7051/7_Materiais_Piezoelectricos.pdf>. Acesso em: 20/11/2019.
- [23] SASSO, G. R.S.; SIMÕES, R. S.; FLORENCIO-SILVA, R. **Estímulo mecânico e formação óssea – Como exercício físico estimula a formação do osso?** Disponível em: < <http://atualidadesmedicas.com.br/revistas/estimulo-mecanico-e-formacao-ossea-como-o-exercicio-fisico-estimula-a-formacao-do-osso>>. Acesso em: 21/11/2019.