



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR PAU DOS FERROS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ANTÔNIO JOSÉ RODRIGUES CORDEIRO

**UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS NA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM RODOVIAS**

PAU DOS FERROS

2016

ANTÔNIO JOSÉ RODRIGUES CORDEIRO

**UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS NA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM RODOVIAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Adelson Menezes Lima
– UFERSA

PAU DOS FERROS

2016

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

R794u Rodrigues Cordeiro, Antônio José.
UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM RODOVIAS / Antônio
José Rodrigues Cordeiro. - 2016.
65 f. : il.

Orientador: Adelson Menezes Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2016.

1. Crise Energética. 2. Fontes Alternativas.
3. Piezoeletricidade. 4. Rodovias. I. Menezes
Lima, Adelson, orient. II. Título.

ANTÔNIO JOSÉ RODRIGUES CORDEIRO

**UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM RODOVIAS**

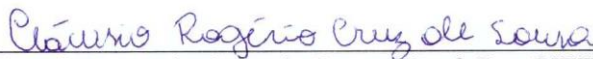
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência em Tecnologia.

Defendida em: 08 / 11 / 2016.

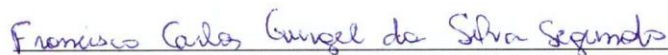
BANCA EXAMINADORA



Adelson Menezes Lima, Prof. Me. (UFERSA)
Presidente



Cláudio Rogério Cruz de Sousa, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Francisco Carlos da Silva Segundo, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

A **Genecilda Augusto de Sousa** (in memoriam), que foi minha avó, mãe e para sempre modelo de pessoa a seguir sua coragem, força e instinto protetor sem remediações de esforços.

A **Cíntia Maria Rodrigues de Sousa** (in memoriam), que foi minha tia, que muito amou seus filhos e sobrinhos com muito zelo e carinho. Exemplo de mulher batalhadora, humilde e sempre fazendo, durante em vida, das desventuras do cotidiano uma comédia para alegrar nossos dias.

Dedico este trabalho à minha avó **Zilma da Costa Cordeiro**, fonte de incentivo, carinho, garra e confiança nesse percurso.

AGRADECIMENTOS

Aos docentes que me acompanham nessa minha caminhada, em especial à Marília Cavalcanti Santiago por, além de ser uma magnífica docente e de enorme caráter, ter aceito o desafio em ser minha orientadora. Porém, decorrentes fatores maiores, precisou afastar-se. No entanto, nem por isso se fez ausente, sendo de suma importância para tal realização, visto que seus materiais antes enviados foram de enorme utilidade. E a Adelson Menezes Lima por ter tido a disponibilidade em dar continuidade ao trabalho, mesmo tido o convite repentino, e ter estado sempre à disposição a suas orientações e materiais.

Aos meus amigos Karla Honorina de Lima Gomes, Bianca Bezerra Duarte Gomes e Kátia Lilianna Nascimento Nunes, que me deram apoio e abrigo quando precisei em fases difíceis, Élson dos Santos Júnior, Rafael Vieira Abrantes, que foram um dos primeiros quem conheci em uma local novo e distante dos parentes, dentre os demais, como Julia Figueredo, onde tiramos diversos momentos alegres, além do total apoio sempre quando precisei.

À minha avó Zilma da Costa Cordeiro que, por mais conversas divergentes às suas opiniões viessem lhe falar, nunca deixou de acreditar na minha personalidade e de me incentivar a seguir o caminho na qual eu fosse ser feliz.

À minha mãe Sangia Aparecida Rodrigues de Sousa, a minha irmã Paloma Rodrigues Cordeiro, ao meu irmão João Pedro Rodrigues Cordeiro e a minha tia Sênia Aparecida Rodrigues de Sousa Torres que, apesar dos atritos, sempre estão ao meu lado quando os chamo.

Aos meus amigos Jefferson Kelvin Celestino Nogueira e Antônio Pedro Neto que esteve ao meu lado nas diversões, no auxílio com o trabalho, no cuidado, por serem umas das poucas pessoas mais generosas que já conheci.

E, primordialmente, à Fabiola Luana Maia Rocha, à Gabriel Ferreira da Silva, Gizele Nogueira e Gledson de Araújo Lopes que me incentivaram e me deram força quando pensei em desistir. Por estarem ao meu lado em todos os momentos sejam felizes ou tristes. Obrigado!

[...]uma capacidade de escrever sua própria história, informa-se permanentemente do que está acontecendo em todo o mundo, criar culturas e recuperar valores essenciais da condição humana e, acima de tudo, refletir sobre o futuro do planeta.

Aziz Ab'Saber

RESUMO

Diante da crise energética atual, novos estudos de aplicações em fontes já conhecidas, mas antes não percebidas, vem surgindo, como os estudos sobre a produção da energia piezoelétrica, gerada por materiais na qual sua estrutura cristalina quando submetidos a um esforço mecânico, ocasionando deformação ao material, respondem com um sinal elétrico diretamente proporcional à esta. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo bibliográfico sobre a utilização de materiais piezoelétricos em rodovias pavimentadas, como uma nova fonte alternativa de geração de energia elétrica no Brasil. Inicialmente, foram pesquisados os meios de geração elétrica e a influência da crise hídrica no país em questão, assim quanto dados quantitativos da malha rodoviária e sua frota veicular circulante. Além, de ser abordado conceitos relativos à energia piezoelétrica e sua forma de obtenção. Em seguida, com base em aplicações já realizadas em outros países, descreve-se os resultados obtidos, como a profundidade que melhor impulsiona sinais elétricos dado a variação de velocidade é a de 5 cm de profundidade à superfície do pavimento, e a partir destes, faz-se as considerações finais quanto a sua utilização e quais os desafios dessa nova fonte alternativa.

Palavras-chave: Crise Energética. Fontes alternativas. Piezoeletriciade. Rodovias

ABSTRACT

Considering the current energy crisis, new studies of applications of already known sources, but rather unnoticed, it has emerged, as the studies on the production of piezoelectric energy, generated by materials in which their crystalline structure when subjected to mechanical stress, causing deformation to the material, respond with an electrical signal directly proportional to it. In this sense, the present work aims to carry out a bibliographical study on the use of piezoelectric materials in paved highways, as a new alternative source of electricity generation in Brazil. Initially, the means of electric generation and the influence of the water crisis in the country in question were investigated, as well as quantitative data of the road network and its circulating vehicular fleet. In addition, to be approached concepts related to piezoelectric energy and its way of obtaining. Then, based on applications already made in other countries, it was described the results obtained, such as the depth that best boosts electrical signals given the speed variation is 5 cm deep at the pavement surface, and from these, The final considerations regarding its use and the challenges of this new alternative source are made.

Key Words: Energy crisis. Alternative sources. Piezoelectricity. Highways.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação do PIB e da energia consumida em porcentagem (1998 - 2007).....	22
Figura 2: Matriz de energia elétrica do Brasil	24
Figura 3: Perfil esquemático da usina hidrelétrica	24
Figura 4: Perfil esquemático da produção elétrica por meio do gás natural	25
Figura 5: Geração de energia elétrica por tipo de combustível (1973 – 2006)	26
Figura 6: Esquematização da geração elétrica a partir do petróleo	27
Figura 7: Perfil esquemático da produção elétrica pelo carvão mineral	28
Figura 8: Perfil esquemático de uma usina nuclear	29
Figura 9: Perfil da produção de energia elétrica pela biomassa	32
Figura 10: Usina Eólica Bons Ventos (Aracati, CE)	33
Figura 11: Potencia eólica brasileira.....	33
Figura 12: Sistema heliotérmico	35
Figura 13: Sistema fotovoltaico.....	35
Figura 14: Potência instalada de células fotovoltaicas no mundo (MW)	35
Figura 15: Variação de radiação solar no Brasil.....	36
Figura 16: Usina maremotriz do Porto do Pecém (CE)	37
Figura 17: Ilustração de Usina da maré por meio de hélices.....	37
Figura 18: Perfil esquemático da produção elétrica pelo biogás	38
Figura 19: Diagramas de cargas de um sensor piezoelétrico	41
Figura 20: Estrutura atômica do PZT.....	42
Figura 21: Polarização da cerâmica PZT	43
Figura 22: Tipos de rodovias no Brasil.....	45
Figura 23: Cinco estados brasileiros com maior porcentagem de frota circulante.....	46
Figura 24: Ilustração esquemática de aplicação	47
Figura 25: Esquema da produção elétrica em rodovias pelo efeito piezoelétrico	48

Figura 26: Cristal de Quartzo	51
Figura 27: PVDF à esquerda e PZT à direita	51
Figura 28: Vigas Betuminosas.....	52
Figura 29: Processo de implantação do sistema Wayenergy Vehicles	52
Figura 30: Resposta do PZT na viga betuminosa.	53
Figure 31: PZT após o teste da viga betuminosa	53
Figure 32: Resposta do PVDF na viga betuminosa	54
Figura 33: Furo com materiais piezoelétricos nas três profundidades.....	54
Figura 34: Resposta dos materiais (PZT e PVDF) à passagem de um veículo	55
Figura 35: Resposta dos materiais (PZT e PVDF) à 10cm de profundidade	55
Figura 36: Resposta dos materiais (PZT e PVDF) à 5cm de profundidade.	56
Figura 37: Resposta dos materiais (PZT e PVDF) à 1cm de profundidade.	56
Figura 38: Energia elétrica gerada em um dia pelo Wayenergy Vehicles	57
Figura 39: Eletricidade gerada durante um mês pelo Wayenergy Vehicles	57
Figura 40: Instalação do material piezoelétrico em estradas, <i>Innowattech</i>	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Geração elétrica por fonte no Brasil em GWh (2006 – 2010).....	50
Gráfico 2 - Geração elétrica por fonte no Brasil em GWh (2006 – 2010).....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Geração nuclear por região no mundo (TWh).....	30
Tabela 02 - Geração nuclear no mundo – 10 maiores países em 2012 (TWh).....	31
Tabela 03 - Extensão rodoviária federal pavimentada por região, Brasil 2005/2015.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
N_2	Nitrogênio
H_2	Hidrogênio
O_2	Oxigênio
H_2S	Gás sulfídrico
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
PVDF	Polivinilo de Flúor
NaClO_3	Clorato de Sódio
ZnS	Sulfureto de Zinco
$\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$	Cloroborato de Magnésio
ZnCO_3	Carbonato de Zinco
$\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Sal de Seignette

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PCJ	Comitês das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climáticos
INPE	Instituto Nacional de Meteorologia
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CCEE	Câmara de comercialização de Energia Elétrica
IEA	<i>International Energy Agency</i>
BIG	Banco de Informações de Geração
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
IPEG	Geradores Piezoelétricos <i>Innowattech</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos específicos.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	PROBLEMÁTICA DA ENERGIA ELÉTRICA NO MUNDO E NO BRASIL	22
2.2	PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	23
2.2.1	Hidráulica	24
2.2.2	Gás Natural	25
2.2.3	Petróleo	26
2.2.4	Carvão Mineral	27
2.2.5	Nuclear.....	28
2.2.6	Biomassa	31
2.2.7	Eólica	32
2.2.8	Solar	34
2.2.9	Marítima.....	36
2.2.10	Biogás.....	38
2.3	USINAS HIDRELÉTRICAS DIANTE A CRISE HÍDRICA	39
2.4	ENERGIA PIEZOELÉTRICA.....	40
2.5	ESTUDOS DESENVOLVIDOS PARA ALTERNATIVA DA ENERGIA PIEZOELÉTRICA	43
2.6	RODOVIAS BRASILEIRAS	44
2.7	FROTA CIRCULANTE NO BRASIL	46
2.8	APLICAÇÃO DO MATERIAL PIEZOELÉTRICO EM RODOVIAS.....	46
3	METODOLOGIA.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61
	ANEXO A – Estrada N206 para a instalação na cidade de Guimarães, Portugal.....	65
	ANEXO B – Localização para a instalação piloto na cidade de Covilhã, Portugal.	66

1 INTRODUÇÃO

A maior parcela da energia elétrica gerada no Brasil tem procedência de usinas hidrelétricas, que respondem por cerca de 60% da capacidade instalada do País e de aproximadamente 28% por usinas termoeletricas de fontes de geração distinta, seja nuclear à biomassa, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016).

A redução do estoque de água nos reservatórios pode resultar em uma dificuldade de suprimento, caso ocorra uma seca severa (Interesse Nacional, 2013). Como exemplo, pode-se citar as dificuldades sofridas pela população localizada ao longo do principal canal do rio Amazonas e afluentes, quando da seca intensa que ocorreu no ano de 2005. Onde o CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) juntamente com o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) notificou pelo site da INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), no tal ano, registrando que as chuvas se apresentaram com valores de até 350 mm menores que a média histórica.

Tornando exemplo um fator mais recente, desde o mês de maio de 2014, os rios que abastecem as regiões de Campinas e Piracicaba, no interior paulista, entraram no período de estiagem com as vazões mais baixas dos últimos dez anos, segundo monitoramento dos Comitês das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ).

Sem chuvas, a produção elétrica se reduz, sendo necessário a ativação de uma produção de energia mais cara, por meio das usinas nucleares, denominadas energia termoeletrica que se utilizam do bombardeamento de neutrões levando a divisão de um núcleo de átomo pesado, como urânio (U) e plutônio (Pu), em dois ou vários fragmentos, além da utilização de outras fontes alternativas como: Energia Eólica, utilizando da força do vento; e a Energia Solar, através da radiação solar.

Embora muitos estejam de acordo que as hidrelétricas sejam uma fonte de energia limpa, no entanto esta fonte traz grandes impactos ambientais negativos durante e após sua instalação. Segundo o trabalho Claudina Valichski, pôde-se citar como exemplos destes impactos o fato das árvores e plantas, que foram submersas na inundação do lago, apodrecem e liberam bolhas de gás metano (CH_4); a inundação pela água danificando sítios arqueológicos que podem existir no local; as perdas dos animais que ali viviam e dos que não se adaptaram ao novo habitat posto. Além dos impactos sociais, na qual milhares de pessoas deixam suas casas e tem que recomeçar sua vida em outro local.

A segunda maior modalidade de geração elétrica do País é a energia térmica, fazendo-se uso de gás natural, biomassa, a óleo, a carvão mineral, nucleares e o gás industrial residual

(ANEEL, 2016). Uma geração de energia que causa impactos marcantes na relação de liberação de gases poluentes, além da acidificação das águas quando nesses gases possuem ácidos ocasionando as chuvas ácidas que podem precipitar a centenas de quilômetros, o impacto ocasionado pela alteração de temperatura nos rios podendo acarretar mortes dos seres que ali habitam, mais comum em usinas nucleares que despejam as águas de resfriamento do sistema.

Outras modalidades de geração, com participação ainda reduzida, são as renováveis em cerca de 8% (ANEEL, 2016). As principais energias alternativas aplicadas no Brasil são: a Energia Eólica que é produzida por meio de aerogeradores, os quais se utilizam da força do vento para movimentá-los. Estes encontram-se ligados a turbinas que transformam a energia cinética em energia elétrica. A Energia Solar, onde em uma de suas maneiras de exploração se dá através da coleta por lâminas ou painéis, os quais capturam a radiação solar transformando-a em energia elétrica.

Entre estas principais vem surgindo novas tecnologias para a geração de energia limpa, a exemplo da energia piezoelétrica gerada por materiais possuíntes de cristais que quando submetidos a uma força mecânica respondem com um sinal elétrico proporcional à força aplicada (SAKAMOTO, 1983).

Muitos países, como Israel e Estados Unidos, entraram na corrida para essa tecnologia utilizando nas estradas utilizando-se da energia mecânica do fluxo de pedestres e automóveis nas rodovias para a geração de eletricidade.

No Brasil os pesquisadores pioneiros dessa tecnologia são Walter Katsumi Sakamoto e Maria Aparecida Zaghete Bertochi, onde desenvolveram um material composto por polímeros como o PVDF (fluoreto de polivinilideno) e PZT (cerâmicas piezoelétricas de titanato zirconato de chumbo). Segundo a pesquisadora, promovendo menor contaminação ambiental por chumbo (Pb).

Assim, mostrar que a utilização desses materiais piezoelétricos para a captação da energia mecânica ocasionada pelo fluxo automobilístico sobre as vias e a transformação em energia elétrica, é uma alternativa forte para complementar às demais fontes e encaminhar-se para a uma maior diversificação na geração energética brasileira. Visto que no Brasil predomina o sistema rodoviário, contendo cerca de 1,7 milhões de quilômetros de rodovia (CNT, 2015), este trabalho teve como objetivo realizar um estudo bibliográfico sobre a utilização de materiais piezoelétricos em rodovias pavimentadas, como uma nova fonte alternativa de geração de eletricidade no Brasil.

1.1 JUSTIFICATIVA

A estiagem no país tem afetado não só o abastecimento de água, mas principalmente o impacto na produção energética brasileira com mais de 60% (ANEEL, 2016) da eletricidade gerada no país é proveniente de hidrelétricas e os reservatórios que abastecem tais usinas estão com níveis irrisórios por conta da seca. Esta seca por sua vez é consequência do manejo inadequado dos solos, das fontes naturais como rios, riachos e nascentes, do desmatamento desenfreado e outros tantos ataques à natureza inaceitáveis. No Sul, Sudeste e Centro Oeste o nível médio está abaixo de 18%, afetando sobremaneira a produção a energia elétrica por hidrelétricas. Todo este cenário tem motivado estudos de novas alternativas para a geração de energia elétrica, sem provocar grandes impactos ao meio ambiente. Estudos sobre a produção de energia piezoelétrica vem ganhando espaço em suas aplicações recentemente. Basicamente sua produção se dá pela transformação da energia mecânica de alguns movimentos (veículos trafegando nas vias e rodovias, pessoas caminhando num shopping, entre outros) é transformada em energia elétrica. A energia piezoelétrica vem sendo estudada pelos israelitas, onde um projeto de 2008 teve a instalação de equipamentos IPEG (gerador piezoelétrico *Innowattech*) em uma extensão de cem metros de uma estrada pavimentada com a expectativa de obter cerca de 400 quilowatts, onde os resultados foram positivos.

Baseando-se nos estudos israelita de utilização dos materiais piezoelétricos em estradas e considerando que a principal rede de transporte no Brasil é a rodoviária, operando na maioria das vias com grande volume de tráfego, toda a energia mecânica dos veículos poder-se-ia converter em energia elétrica e ser utilizada, por exemplo, para o funcionamento de sinais de trânsito e até mesmo, dependendo da capacidade, ser aproveitada para iluminação de ambientes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo bibliográfico sobre a utilização de materiais piezoelétricos em rodovias pavimentadas, como uma nova fonte alternativa de geração de energia elétrica em rodovias.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir-se o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a variação na energia hidrelétrica produzida nos últimos dez anos;
- Apresentar dados sobre o sistema rodoviário brasileiro quanto ao volume de veículos em circulação em estradas pavimentadas;
- Compreender como a energia pode ser captada através de materiais piezoelétricos;
- Apresentar a utilização de materiais piezoelétricos no mundo e no Brasil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

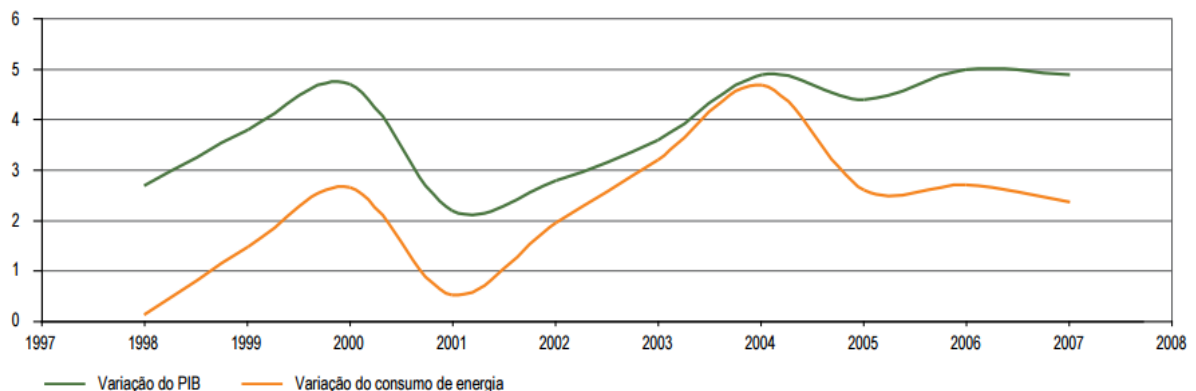
2.1 PROBLEMÁTICA DA ENERGIA ELÉTRICA NO MUNDO E NO BRASIL

A energia é imprescindível na vida humana. Atuando ao lado de transportes, telecomunicações e águas e saneamento, compõe a infraestrutura necessária para incorporar o ser humano ao denominado modelo de desenvolvimento vigente (REIS, 2015). Sendo a energia elétrica uma das formas mais utilizadas de energia.

Com o desenvolvimento tecnológico, o homem veio extraindo os recursos naturais para a geração de energia, esta a cada ano mais solicitada para suprir as necessidades da sociedade como observa-se a figura 1, sem pensar sobre maiores consequências decorrentes da poluição e alterações ambientais que viriam a ser acarretadas, como o efeito estufa. Logo, atualmente, com problemas ambientais atenuados e a preocupação com uma futura escassez dessas fontes não renováveis, percebeu-se a necessidade do cuidado com o meio ambiente e a busca por novas fontes alternativas para tal geração, de acordo com Silvia Leonel Leite, 2007.

Os recursos energéticos são o foco dos interesses estatais, gerando disputas geopolíticas desde a primeira Revolução Industrial. Na segunda metade do século XX, com a expansão do meio urbano-industrial, principalmente, na América Latina e Sudeste Asiático e, conseqüentemente, o crescimento populacional, houve o aumento exponencial da demanda energética. (Educação Globo)

Figura 1: Variação do PIB e da energia consumida em porcentagem (1998 - 2007)



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009

Nos últimos anos o Brasil vem passando por secas severas. Um dos exemplos ocorreu em 2005 ao longo do principal canal do rio Amazonas e afluentes, registrando que as chuvas se apresentaram com valores de até 350 mm menores que a média histórica (CPTEC, 2005).

Em maio de 2014, os rios que abastecem as regiões de Campinas e Piracicaba, no interior paulista, entraram no período de estiagem com as vazões mais baixas dos últimos dez anos, segundo os Comitês das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ, 2014).

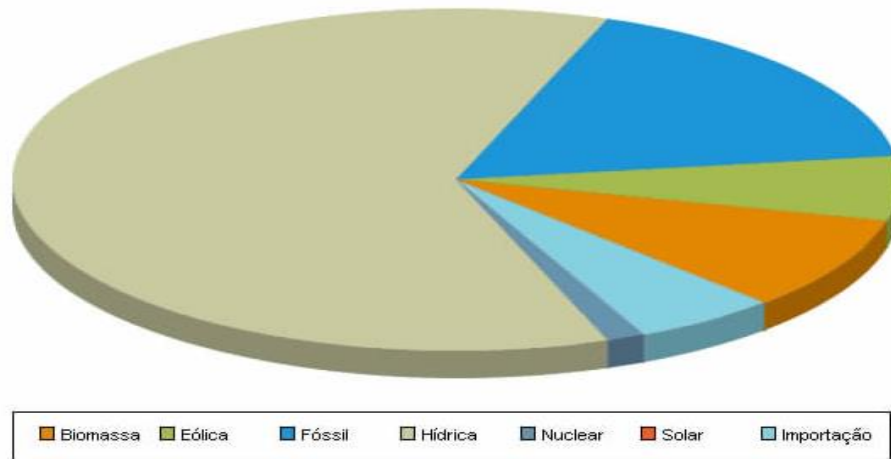
Em virtude da grande dependência hidrelétrica, claramente observada, o Brasil vem passando por dificuldades na geração de energia, visto que a componente aleatória – incidência de chuvas nas bacias das represas - estão com seus níveis baixos. No ano de 2014, o déficit na geração de hidroeletricidade foi de 3,7% em janeiro, 1,7% e fevereiro e 5,2% em março, conforme dados do Morgan Stanley.

As quedas de energia continuam a preocupar os brasileiros e esquentaram o debate entre os parlamentares. Os recentes apagões e a seca que afetou o nível dos reservatórios levaram ao acionamento das usinas térmicas – mais caras e poluentes. E o governo já sinalizou que a conta pode pesar no bolso do consumidor. (Senado Federal, 2014)

2.2 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

O Brasil dotado de uma vasta área territorial estimada em 8.515.767,049 km², conforme publicado pelo Diário Oficial da União em junho de 2016, e constituído por diversos climas e relevos, favoreceu para uma formação matricial energética diversificada.

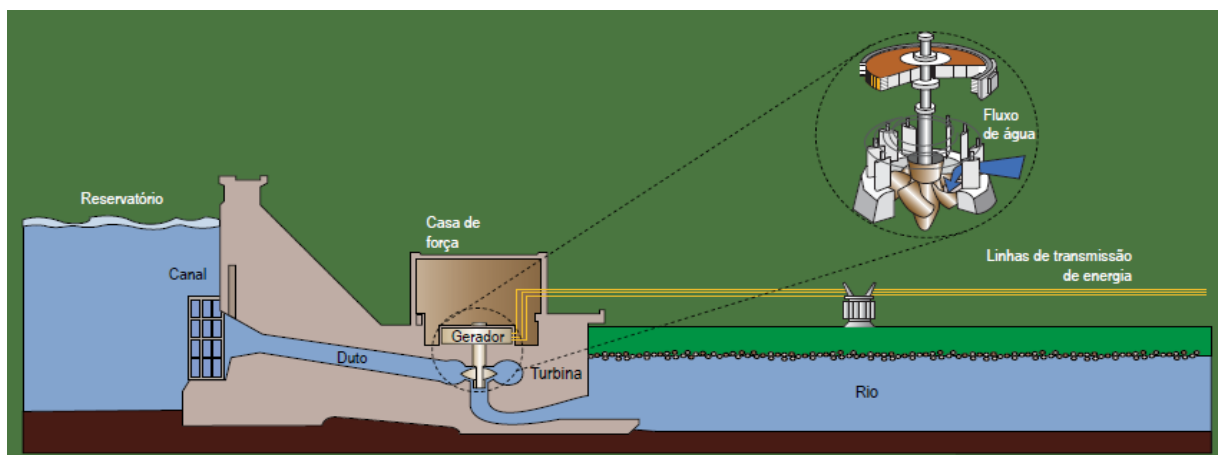
Para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui no total 4.547 empreendimentos de usinas geradoras de energia elétrica em operação, totalizando 145.688.877 kW de potência instalada. Sendo as maiores fontes geradoras de energia provida da biomassa (9%), eólica (6,17%), fóssil (17,1%), hídrica (61,3%), nuclear (1,3%), solar (0,01%) e importada (5,19%), sendo 125MW médios importado da Venezuela para o estado de Roraima. Assim como observado na figura 2, onde proporciona as fontes constituintes da matriz energética brasileira.

Figura 2: Matriz de energia elétrica do Brasil

Fonte: ANEEL, 2016

2.2.1 Hidráulica

O fluxo das águas é o combustível para a geração de eletricidade. Na construção desse tipo de usinas faz-se o represamento da água de rio(s) e seus afluentes, além de um amplo estudo sobre os benefícios e malefícios de tal grande obra, para que a queda d'água alimente as turbinas que estão ligadas a geradores que converterão essa energia mecânica das águas em energia elétrica, esta que será distribuída pelas linhas de transmissão que podem ser de diferentes dimensões dependendo do porte da obra (quanto maior a obra, mais distante do local a se abastecer de energia, logo maior a extensão dessas linhas). A figura 3 apresenta um esquema hidrelétrico.

Figura 3: Perfil esquemático da usina hidrelétrica

Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009

O território brasileiro é abundante em recursos hídricos, possuindo cerca de 20% de toda a água existente no planeta, segundo a Organização das Nações Unidas no Brasil

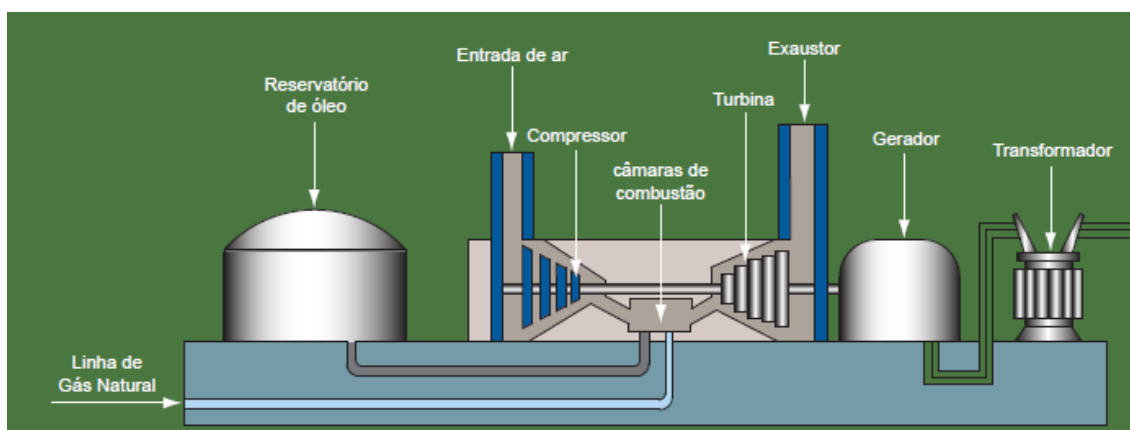
(ONUBR, 2016). Diante disso, houve um grande investimento nessa fonte de geração de energia tornando a maior parcela de energia elétrica brasileira consumida provinda das hidrelétricas, com mais de 95GW (ANNEL, 2016). Segundo dados do Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (Agosto – 2016), as hidrelétricas brasileiras até julho de 2016 geraram correspondeu à 72,7% da energia gerada no país.

2.2.2 Gás Natural

Nas termelétricas, a energia elétrica se dar pela queima de combustíveis, na qual no Brasil o mais utilizado é o gás natural, onde o vapor gerado movimenta as turbinas ligadas à geradores (figura 4). Este gás é oriundo, segundo à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), da matéria orgânica:

O gás natural tem elevado poder calorífico e, em sua queima, apresenta baixos índices de emissão de poluentes, em comparação a outros combustíveis fósseis. Em caso de vazamentos, tem rápida dispersão, com baixos índices de odor e de contaminantes. O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, originados da decomposição de matéria orgânica fossilizada ao longo de milhões de anos. (CCEE, 2016)

Figura 4: Perfil esquemático da produção elétrica por meio do gás natural



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009

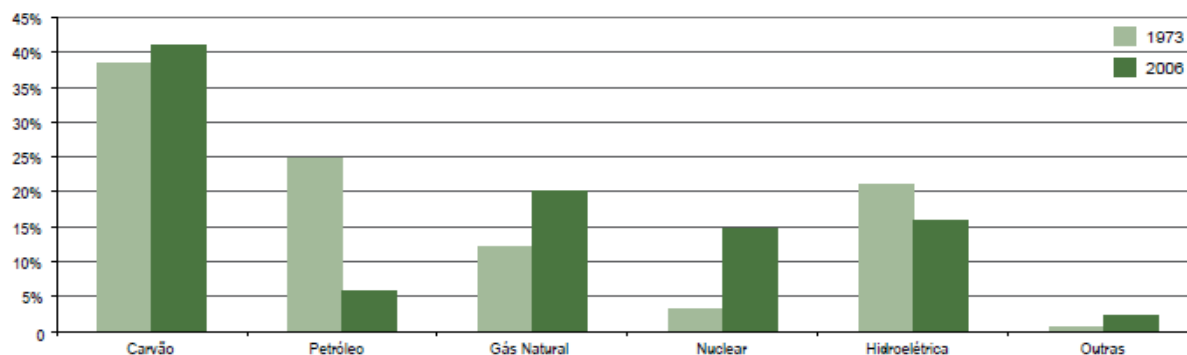
De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica - 2015, o gás natural foi a fonte responsável pela produção de 81075 GWh no ano de 2014, representado cerca de 13,7% de toda energia gerada no país. Um aumento de 17,5% comparado com o ano de 2013 com 69003 GWh. E de acordo com o boletim mensal, em julho de 2016 possuía uma representatividade de 6,4% em toda a geração elétrica nacional.

2.2.3 Petróleo

O petróleo tem origem na decomposição de matéria orgânica, principalmente o plâncton (plantas e animais microscópicos em suspensão nas águas), oriundas da ação de bactérias em meios com baixo teor de oxigênio. Na qual à de milhões de anos, essa decomposição foi acumulando-se no fundo dos oceanos, mares e lagos e, comprimidas pelos movimentos da crosta terrestre, transformou-se, então, em uma substância oleosa (CCEE, 2016).

A pesar da grande concorrência com o carvão mineral na geração de energia elétrica, este passou a ser utilizado em grandes escalas após a invenção dos automotores movidos a gasolina e a óleo diesel, derivados do petróleo (figura 5). E mesmo que sua utilização para a energia elétrica tenha caído significativamente, como mostra o mesmo gráfico, ele ainda é fonte para muitos países no mundo, onde o Brasil faz seu uso para suprir os défices de energia em horários de pico.

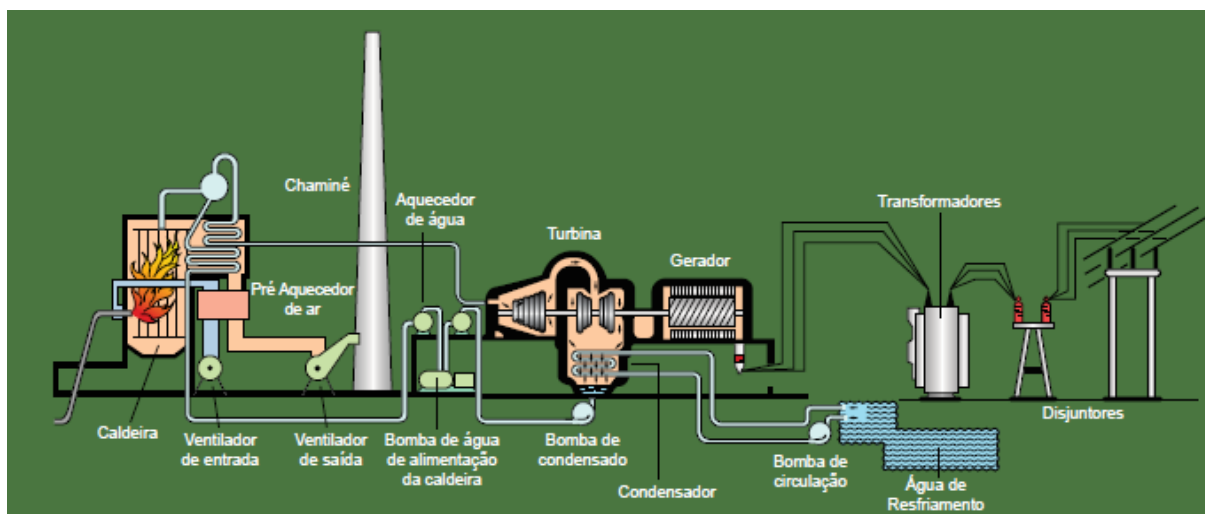
Figura 5: Geração de energia elétrica por tipo de combustível (1973 – 2006)



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009

A geração de energia elétrica por esta fonte se dar pela queima desses combustíveis em caldeiras, turbinas e motores de combustão interna. Na utilização de caldeiras e turbinas o processo se assemelha com as usinas termelétricas e se aplica ao atendimento de cargas de ponta e/ou aproveitamento de resíduos do refino de petróleo, como ilustra a figura 6.

Figura 6: Esquemática da geração elétrica a partir do petróleo



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009

Segundo o Anuário de Estatístico de Energia Elétrica 2015, os derivados de petróleo foram responsáveis por 5,4% da energia gerada, no Brasil, em 2014. Um aumento gritante de 43,4% comparado com a geração do ano de 2013. E, de acordo com o boletim mensal, em julho de 2016 possuía uma representatividade de 1,6% em toda a geração elétrica nacional.

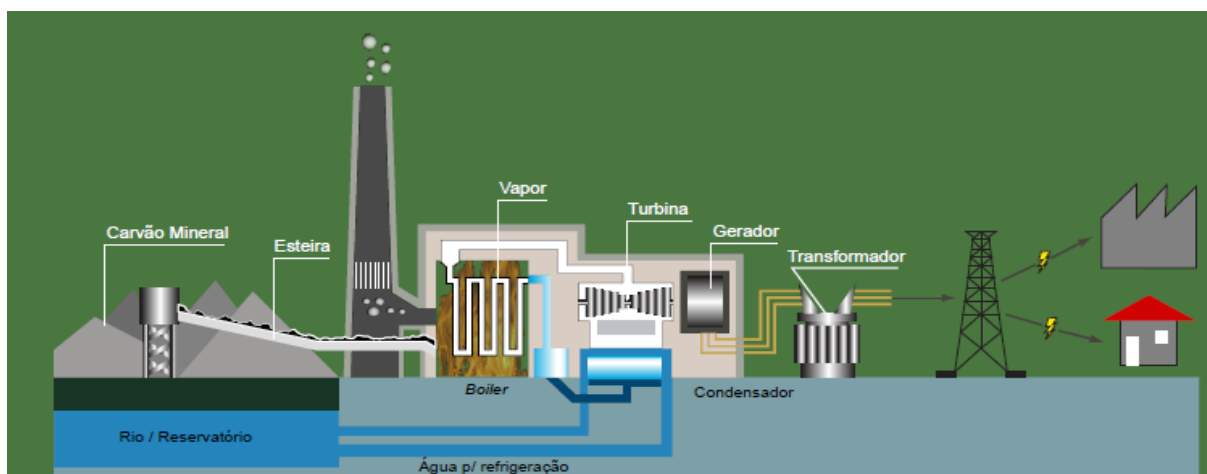
2.2.4 Carvão Mineral

O carvão mineral foi uma das primeiras fontes para geração de energia com a revolução industrial, onde este servia de alimento para as máquinas à vapor. Hoje seu consumo, diferente como o petróleo para a geração de eletricidade, teve um aumento mesmo mediante à influência forte com a preocupação com o meio ambiente, como pode ser observado na figura 5. Podendo até mesmo citar a exemplo, a Austrália, que mesmo sendo um país desenvolvido, tem sua maior fonte de geração de energia elétrica por meio de carvão mineral. Mas, este país, já com projetos de novas gerações tanto em análise como encaminhados de fontes alternativas e renováveis, citando-se como exemplo a energia solar.

O carvão mineral pode ser encontrado em diferentes profundidades da superfície da Terra, e usado além da produção da eletricidade, ou juntamente com ela, utilizada na fabricação de diversos materiais (cerâmicas, polímeros etc). Apesar de tecnologias já terem sido desenvolvidas para melhor aproveitar o poder calorífico do carvão, como a gaseificação, e consequentemente a preservação do meio ambiente, ainda se utiliza muito o método tradicional, de queima para a produção de vapor (figura 7).

O carvão é extraído do solo, fragmentado e armazenado em silos para, posteriormente, ser transportado à usina, onde novamente será armazenado. Em seguida, é transformado em pó, o que permitirá melhor aproveitamento térmico ao ser colocado para queima nas fornalhas de caldeiras. O calor liberado por esta queima é transformado em vapor ao ser transferido para a água que circula nos tubos que envolvem a fornalha. A energia térmica (ou calor) contida no vapor é transformada em energia mecânica (ou cinética), que movimentará a turbina do gerador de energia elétrica. (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009)

Figura 7: Perfil esquemático da produção elétrica pelo carvão mineral



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009

O aproveitamento do carvão mineral para a geração de energia elétrica no Brasil teve início nos anos 1950. Naquela época, foram iniciados estudos e, em seguida, a construção das usinas termelétricas de Charqueadas (RS), com 72 MW de potência instalada, Capivari (SC), com 100 MW, e Figueira (PR), com 20 MW, segundo CCEE, 2016.

Em 2014 foram produzidos 18.385,00 GWh no Brasil pelo carvão mineral, representando cerca de 3,1% do total da geração. Que quando comparada com o ano anterior, indica um aumento de 24,2%. E de acordo com o boletim mensal, em julho de 2016 possuía uma representatividade de 2,7% em toda a geração elétrica nacional.

2.2.5 Nuclear

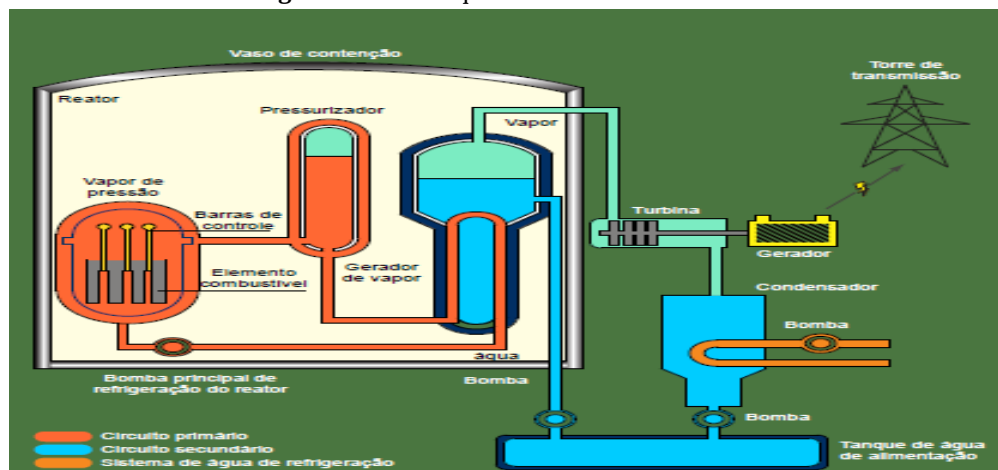
Embora seja de uma complexidade, as usinas termonucleares seguem ao princípio de uma usina termelétrica. Onde por meio da fissão de átomos de urânio ocorre um aquecimento

na água que produzirá vapor. Este que produzirá energia cinética em turbinas conectadas à geradores, para então resultar em eletricidade, como demonstra a figura 8.

As usinas termonucleares são dotadas de uma estrutura chamada vaso de pressão, que contém a água de refrigeração do núcleo do reator (onde fica o combustível nuclear). Essa água, altamente radioativa, circula quente por um gerador de vapor, em circuito fechado, chamado de circuito primário. Esse circuito primário aquece uma outra corrente de água que passa pelo gerador (circuito secundário) e se transforma em vapor, acionando a turbina para a geração de energia elétrica. Os dois circuitos não têm comunicação entre si. (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009)

O urânio utilizado nestas usinas não é de acordo como encontrado na natureza. Eles passam por processo bastante complexo que podem ser divididos em três etapas. Na primeira o minério é extraído e beneficiado, onde ele é purificado e concentrado dando origem à um sal amarelado chamado de *yellowcake*. Na segunda é a conversão, onde o *yellowcake* passa para seu estado gasoso. Na terceira, caracteriza-se pelo enriquecimento, aumentando a concentração de átomos de urânio 235, passando de 0,7%, em geral, para 4%.

Figura 8: Perfil esquemático de uma usina nuclear



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009

Decorrente de diversos fatores como custo e periculosidade para este meio de geração de energia, ela é mais utilizada para casos de emergência, exemplo no Brasil que se fez maior uso em 2014 visto que as hidrelétricas estavam com dificuldade em sua produção elétrica, tendo sua representatividade no mundo da geração desse tipo de energia em 2013 em cerca de 0,7% (tabela 2). Assim como outras regiões mundiais que veio fazer uso recentemente, como o Oriente Médio utilizando-a apenas em 2011 (tabela 01), já outros países que fazem dela

uma das maiores fontes, como Estados Unidos com representatividade de 33,4% da energia no mundo oriunda da usina nuclear em 2013 (visto na tabela 02).

Tabela 1: Geração nuclear por região no mundo (TWh)

	2009	2010	2011	2012	2013
Mundo	2.560,0	2.629,7	2.517,7	2.344,8	2.364,0
Ásia & Oceania	527,2	556,0	459,7	327,1	332,0
América do Sul e Central	19,8	20,5	20,7	21,1	20,0
América do Norte	894,1	898,1	887,8	866,8	897,0
Europa	864,3	896,6	887,2	862,8	855,0
Eurásia	243,0	245,6	249,3	253,3	242,0
África	11,6	12,9	12,9	12,4	14,0
Oriente Médio	0,0	0,0	0,1	1,3	3,9

Fonte: EPE, 2016

Tabela 2: Geração nuclear no mundo – 10 maiores países (TWh)

	2009	2010	2011	2012	2013	$\Delta\%$ (2013/2012)	Part. % (2013)
Mundo	2.560,0	2.629,7	2.517,7	2.344,8	2.364,0	0,8	100
Estados Unidos	798,9	807,0	790,2	769,3	789,0	2,6	33,4
França	391,8	410,1	423,5	407,4	404,0	-0,8	17,1
Rússia	152,8	159,4	162,0	166,3	161,0	-3,2	6,8
Coreia do Sul	141,1	141,9	147,8	143,6	132,0	-8,0	5,6
China	65,7	71,0	82,6	92,7	111,0	19,8	4,7
Canadá	85,1	85,5	88,3	89,1	97,0	8,9	4,1
Alemanha	127,7	133,0	102,3	94,1	92,0	-2,2	3,9
Ucrânia	77,9	83,9	84,9	84,9	78,0	-8,1	3,3
Reino Unido	62,9	56,9	62,7	64,0	64,0	0,1	2,7
Suécia	50,0	55,7	58,1	61,5	64,0	4,1	2,7
Brasil (18°)	13,0	14,5	15,7	16,0	15,4	-4,0	0,7

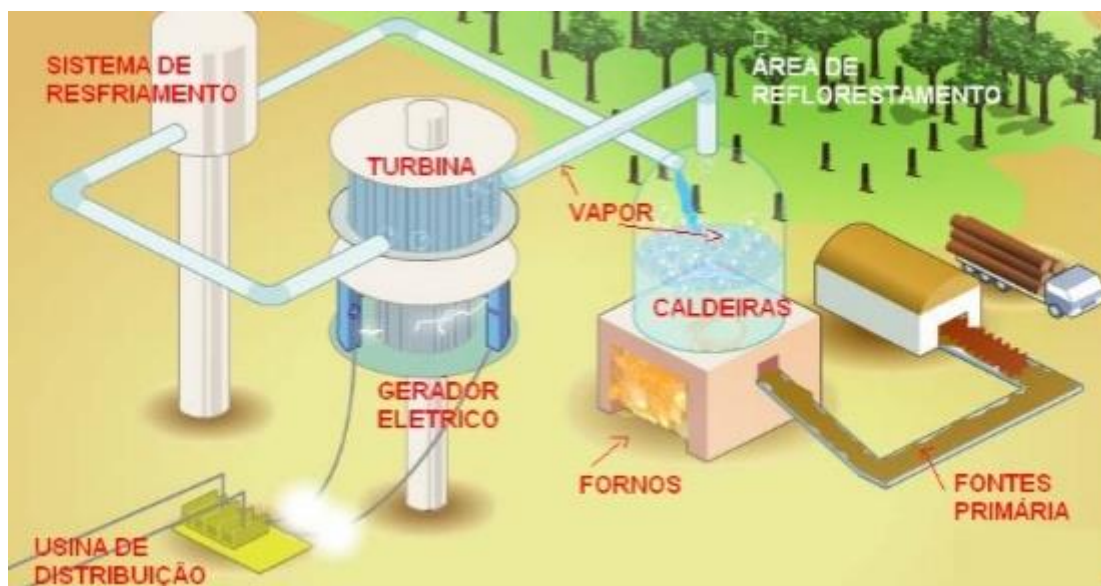
Fonte: EPE, 2016

2.2.6 Biomassa

Biomassa é a massa total de organismos vivos numa área que constitui uma importante reserva de energia, visto que é essencialmente formada por hidratos de carbono. Com uma visão energética, biomassa é o recurso renovável oriundo de matéria orgânica, tanto de origem animal quanto vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. (CCEE, 2016).

Existem várias maneiras de se gerar energia por meio da biomassa, mas todas partes da ideia da conversão da matéria orgânica em um produto intermediário que será utilizado em uma máquina motriz, assim produzindo energia mecânica que fará com que geradores produzam energia elétrica. O convencional segue o princípio das termoelétricas, na qual queima-se a biomassa para a produção de vapor que irão movimentar turbinas produzindo a eletricidade, como a figura 9 esquematiza.

Figura 9: Perfil da produção de energia elétrica pela biomassa



Fonte: Portal Energia, 2016

As principais matérias-primas para esta forma de geração são a lenha, carvão vegetal e licor negro. No Brasil se destaca o bagaço da cana-de-açúcar, este que, além da eletricidade, desenvolve o etanol com custos bem inferiores aos produzidos por outras matérias.

Em 2014, a biomassa foi responsável por 7,6% da produção de energia elétrica do Brasil, um aumento de 12,7% comparado à 2013 (Anuário Estatístico de Energia Elétrica, 2015). E de acordo com o boletim mensal, em julho de 2016 possuía uma representatividade de 2,4% em toda a geração elétrica nacional. Em julho de 2016, o boletim mensal registrou uma porcentagem de 6,8% na geração elétrica total do país.

2.2.7 Eólica

Utiliza-se da energia cinética de translação dos ventos, massa de ar em movimento, na qual estes giram as hélices (energia cinética de rotação) que são turbinas eólicas, também chamadas de aero geradores, gerando, então, a eletricidade, assim como visto na figura 10 da usina eólica na cidade de Aracati-CE. Diante grandes argumentos favoráveis para a utilização dessa fonte, como da renovabilidade, perenidade, grande disponibilidade, independência de importações e custo zero para se obter os suprimentos, o custo para implantação ainda é elevado comparada às demais (ANEEL, 2009). Porém isso não veio a intervir drasticamente no investimento desta. Segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2009), em dez anos a

capacidade instalada da energia eólica no mundo houve um aumento de 1155% entre 1997 e 2007.

Figura 10: Usina Eólica Bons Ventos (Aracati, CE)

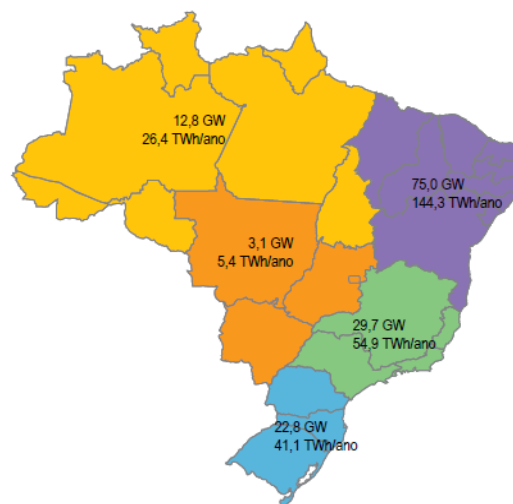


Fonte: BM Construtora, 2015

O Brasil também não fica por trás na implantação dessa fonte, que de acordo com dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015, no ano de 2014 foram gerados 4888 MW, o que representa cerca de 3,7% da energia produzida no país e um aumento de 122% comparada ao ano de 2013. Segundo o boletim mensal, em julho de 2016 possuía uma representatividade de 7,4% em toda a geração elétrica nacional.

A região Nordeste tem surgido como o maior produtor de energia eólica do país visto que em 2007 gerou cerca de 144 TWh/ano (figura 11) e desde então não parou de se investir.

Figura 11: Potencia eólica brasileira



Fonte: EPE, 2007

2.2.8 Solar

A energia solar chega à Terra de maneira luminosa e térmica. Ao passar pela atmosfera grande parte dessa energia é convertida em luz visível. Esta luz pode ser utilizada tanto termicamente como eletricamente.

Na produção térmica faz-se uso de materiais escuros, onde com sua captação essa energia se converte em calor para ser gerada por usinas termelétricas, também chamado de sistema heliotérmico demonstrado na figura 12 a seguir. Este sistema necessita, normalmente, de um ponto concentrado de luz, com isso o ambiente a se aplicar deve ter grande incidência de luz direta, com baixos intensidade de nuvens e índices pluviométricos (características comuns do semiárido brasileiro).

Figura 12: Sistema heliotérmico



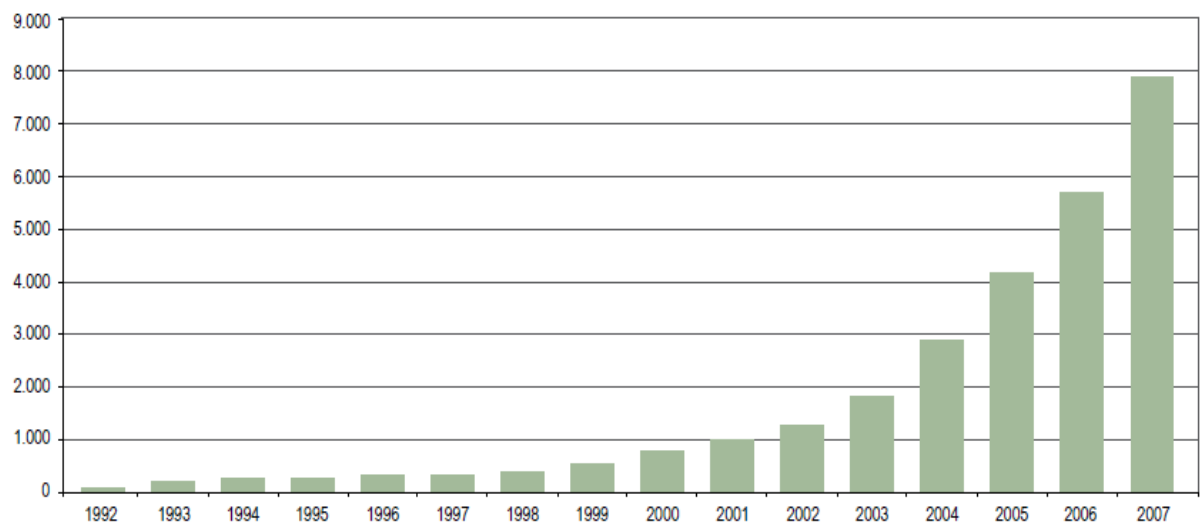
Fonte: culturamix.com, 2011

No sistema fotovoltaico da figura 13, a transformação em eletricidade é direta. Utilizando de placas composta, geralmente, de silício (Si) para que a irradiação estimule o fluxo de elétrons. Logo quando maior a intensidade da luz, maior será a geração de energia elétrica, esta, então, produzindo até mesmo em dias nublados.

Figura 13: Sistema fotovoltaico

Fonte: FRANÇA, 2016

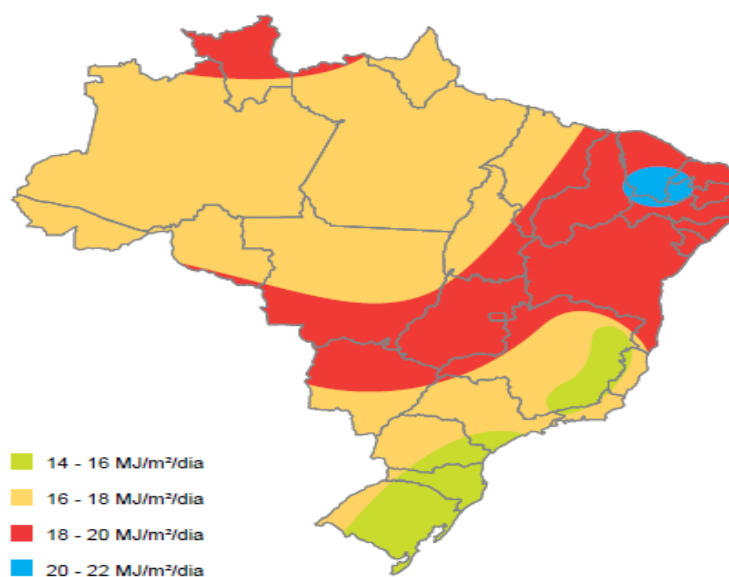
No mundo, esta tem sido a fonte renovável mais investida nos últimos tempos, onde, conforme estudo do *Photovoltaic Power Systems Programme*, da IEA (*International Energy Agency*), entre 1996 a 2006, houve aumento em cerca de 2000% como pode ser observado na figura 14. No entanto, ela ainda é pouco expressiva na matriz elétrica mundial.

Figura 14: Potência instalada de células fotovoltaicas no mundo (MW)

Fonte: IEA, 2007

Apesar da grande potencialidade de irradiação solar no território brasileiro, essencialmente na região nordeste, como mostra a figura 15, pouco se faz uso desta fonte. Sua relevância na matriz energética era tão irrelevante, que a sua geração existente não somava no Balanço Energético Nacional da edição 2008. A partir de programas governamentais, como o Programa Luz para Todos, houve um investimento na implementação dessa fonte.

Figura 15: Variação de radiação solar no Brasil



Fonte: EPE, 2007

Hoje, segundo dados da ANEEL – 2016, o Brasil possui quarenta (40) empreendimentos de fonte fotovoltaica produzindo 22.962,00 kW de potência associada e mais três (3) empreendimentos em construção com previsão de geração de 84.000,00kW de potência. E em julho de 2016, segundo o Boletim, representou cerca de 0,1% da matriz energética brasileira.

2.2.9 Marítima

A eletricidade pode ser adquirida pela energia cinética oriunda do movimento das correntes marítimas ou pela variação do nível do mar entre as marés altas e baixas, conhecida como energia maremotriz e exemplificada na figura 16. Onde processo dessa geração por meio das marés remete processo de geração elétrica das usinas hidrelétricas, na qual com a

passagem de água decorrente das alterações dos níveis do mar, rotacionará turbinas acopladas à geradores que converterá esta energia cinética em elétrica (CCEE, 2016)

Figura 16: Usina maremotriz do Porto do Pecém (CE)



Fonte: BATISTA, 2014

Uma outra forma utilizada, acontece pelo movimento das correntes marítimas que lembra o processo das usinas eólicas. Esta energia cinética da água movimentará hélices fixadas abaixo do nível do mar, e, por meio de geradores, convertendo-as em energia elétrica, como apresentado na figura 17.

Figura 17: Ilustração de Usina da maré por meio de hélices



Fonte: energi10.blogspot.com, 2014

Esta é uma fonte ainda em estudos e em testes aqui no Brasil, mas já sendo aplicada em poucos países (como Reino Unido), na qual sua produção elétrica ainda é irrelevante para

a matriz energética brasileira e mundial. Visto que, como registra a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), o total estimado para a energia potencial da maré é de 22 mil TWh por ano, dos quais 200 TWh seriam aproveitáveis. E em 2008, menos de 0,6 TWh, ou 0,3%, eram convertidos em energia elétrica.

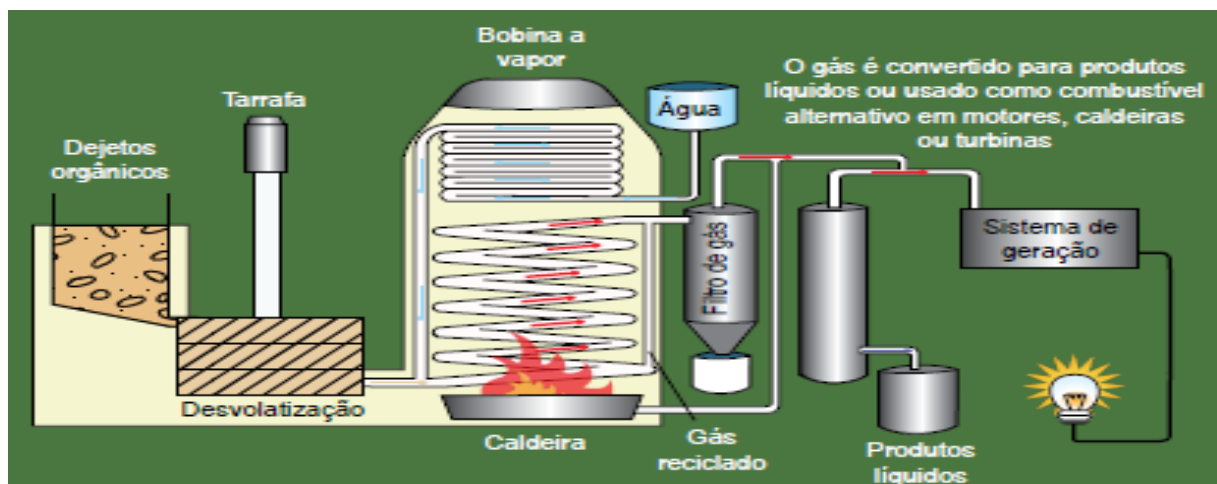
2.2.10 Biogás

Biogás é originado através da decomposição de dejetos orgânicos (urbano, industrial e agropecuário) e esgoto por microrganismos em ambientes anaeróbicos, que passa do estado sólido para o gasoso, quando lançado à atmosfera e passa a contribuir para o aquecimento global, uma vez que é composto por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), oxigênio (O_2) e gás sulfídrico (H_2S) (CCEE, 2016).

Na utilização do lixo para a produção de energia por meio desse gás permite, além da redução do volume dos dejetos em estado sólido e a redução da emissão dos gases causadores do efeito estufa, contribui para o combate à poluição do solo e dos lençóis freáticos.

Existem três formas para a geração elétrica por meio dos rejeitos. A primeira se dar diretamente pela queima dos resíduos sólidos. A segunda é a gaseificação destes onde a produção de calor se dá por meio de reações químicas. E por fim, é a produção artificial do biogás, onde se cria condições favoráveis, de maneira controlada e destinada dos produtos (biogás), para a decomposição desses dejetos. Porém todas seguindo o princípio da produção de vapor para movimentar as turbinas ligadas a geradores de energia, ilustrado na figura 18.

Figura 18: Perfil esquemático da produção elétrica pelo biogás



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2009

De acordo com dados da IEA, em 2005 o lixo urbano deu origem a uma produção de energia elétrica mundial de 50,9 TWh, o industrial 13,3TWh TJ e o biogás 21,8TWh. Onde estes volumes só não foram inferiores ao da energia produzida por outras novas fontes renováveis, como solar e dos oceanos.

No Brasil, segundo o Banco de Informações de Geração (BIG), da Aneel, em novembro de 2008 existiam três usinas termelétricas de pequeno porte movidas a biogás em operação. A primeira delas, inaugurada em 2003, dentro do aterro sanitário Bandeirantes, na cidade de São Paulo, com capacidade instalada de 20 MW foi anunciada na época como a maior usina a biogás do mundo. As demais são: São João, também em aterro sanitário da cidade de São Paulo, com potência instalada de 24,6 MW, e *Energ Biog*, com 30 kW de potência, na cidade de Barueri, região da Grande São Paulo. Além dessas, há mais sete empreendimentos outorgados, totalizando 109 MW de potência nos Estados de São Paulo, Bahia, Rio de Janeiro, Pernambuco e Santa Catarina.

2.3 USINAS HIDRELÉTRICAS DIANTE A CRISE HÍDRICA

As hidrelétricas são as fontes mais utilizados na produção de energia, sendo responsável por cerca de 60% da geração (ANEEL, 2016). Utilizando a água represada, a variante de incidências de chuva em seus reservatórios é muito importante. Porém as épocas de estiagens, com baixa pluviosidade, vêm acarretando uma diminuição no nível de água dos reservatórios, implicando em quedas consideráveis da produção de energia. No ano de 2014, o déficit na geração de hidroeletricidade foi de 3,7% em janeiro, 1,7% e fevereiro e 5,2% em março, segundo dados do Morgan Stanley, finalizando o com uma representatividade da matriz energética do país de aproximadamente 53,08% uma redução de 30,96% comparada ao ano de 2007 onde se teve a maior produção elétrica pelas hidrelétricas nos últimos dez anos (84,04%).

O setor brasileiro de energia elétrica passou por um susto no início de 2013: as chuvas não chegavam e uma ameaça de racionamento de energia elétrica, como o de 2001, pairou no ar. Conforme noticiou a revista Veja, de 16 de janeiro de 2013, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) estimou em 18,7%, naquela semana, a probabilidade efetiva de racionamento ao final do ano, perspectiva bastante sombria para essa época do ano. (TANCREDI; ABBUD, 2013)

Essas alterações no ciclo hídrico, de acordo com Carlos Tucci, são resultadas de modificações antrópicas por meio de ações como:

- Alterações no uso do solo como desmatamento, e uso de diferentes práticas agrícolas;
- Construção de reservatórios de diferentes portes a montante na bacia, aumentando a evaporação do lago;
- Modificação climática devido ao efeito estufa;
- Inconsistência nos dados hidrológicos ao longo de muitos anos de medida e/ou alteração no leito do rio na seção de medição;
- Retirada de água para usos consuntivos.

Assim como pode ser oriundo de um processo natural:

Recentemente, Stevens (1999, reportagem do New York Times) citou as observações do oceanógrafo de Pasadena, na Califórnia, de que existem períodos longos, de aproximadamente 30 anos, de variabilidade climática, que deve ser diferenciada da modificação climática. O primeiro período observado se estendeu de 1940 a 1970, quando ocorreram sequências de El Niños de fraca intensidade e La Niñas de forte intensidade, o que indica períodos mais secos em parte das regiões da América do Sul. O segundo período se estende de 1970 até 2000, quando ocorreram El Niños mais intensos e La Niñas menos intensas. (TUCCI, Carlo E. M., 2002)

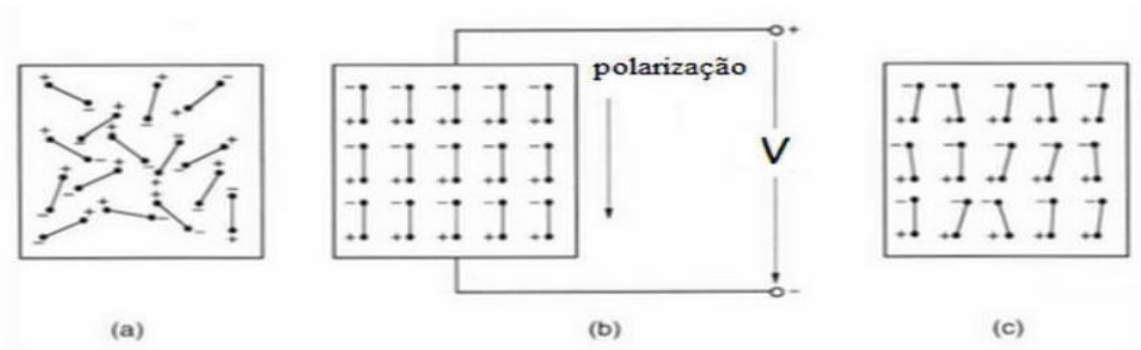
Atualmente os principais reservatórios do país, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) – 2016, a região Sudeste/Centro-Oeste se encontra com 43,65% de sua capacidade; região Sul com 92,25%; Nordeste com 16,82% e a região Norte com 43,84%.

2.4 ENERGIA PIEZOELÉTRICA

O efeito piezoelétrico (do grego, "eletricidade por pressão") foi descoberto pelo pelos irmãos Pierre e Jacques Currie em 1880 (GODOY, 2014). Determinados materiais possuem determinada estrutura cristalina, com seu centro constituinte de átomos plenamente neutros (os polos negativos se cancelam com os positivos) e não simétricos (figura 19.(a), que quando submetido à uma pressão tem sua estabilidade perturbada de tal forma que aconteça a separação dos centros elétricos das cargas positivas e negativas das moléculas, assim, criando dipolos figura 19.(b) e emitindo um sinal de tal forma que estes polos não mais se cancelam figura 19.(c). Esse sinal, que é a polarização elétrica produzida pela deformação mecânica,

denomina-se piezoeletricidade, e entendido como uma corrente que é induzida a movimentar-se (SAKAMOTO, 1983).

Figura 19: Diagramas de cargas de um sensor piezoelétrico



Fonte: NADALIN, 2007.

Este piezoelétrico pode ser definido como conversão de energia mecânica em elétrica (modo direto) ou a conversão de energia elétrica em mecânica (modo inverso). Assim, um piezolétrico é constituído de dois sistemas físicos acoplados; o mecânico e o elétrico (MOHEIMANI, et AL., 2006)

Os cristais que sofrem o efeito piezoelétrico são o sulfureto de zinco (ZnS), o clorato de sódio (NaClO_3), o cloroborato de magnésio ($\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$) ou boracita, a turmalina, o quartzo, o carbonato de Zinco (ZnCO_3) ou calamina, o topázio, o açúcar e o sal Rochelle ou sal de Seignette ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), que são cristais hemiédricos com eixos de simetria polares. Como outros exemplos de materiais temos o Titanato de Bário, PZT (Titanato Zirconato de chumbo) e PVDF (Polivinilo de Flúor), que se trata de um polímero flexível. O PZT é um dos mais eficientes e pode converter até 80% da energia mecânica em elétrica. Segundo o cientista Michael McAlpine " o PZT é 100 vezes mais eficiente do que o quartzo

(Inovação Tecnológica, 2010).

Estes materiais se dividem em: Monocristalinos (Quartzo e Sal de Rochelle); Policristalino (Titanato Ziconato de Chumbo - PZT); Polímeros (Polifluoreto de vinilideno – PVDF); Metais (matérias a base de platina com nanoporos) (PAREDES, 2014).

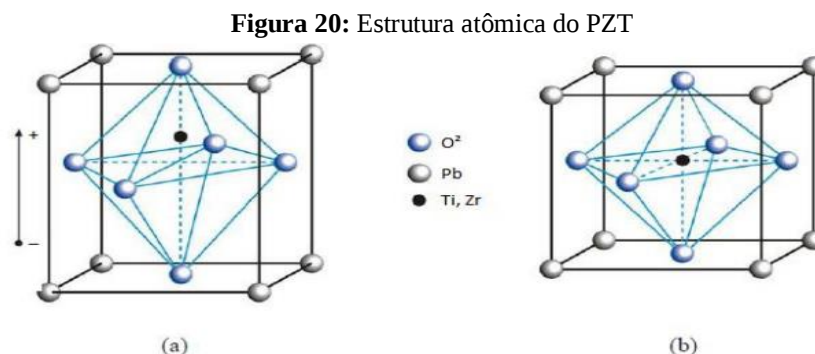
Com o avanço das pesquisas nesta área foram destaca-se as cerâmicas piezoelétricas de titanato zirconato de chumbo (PZT), o titanato de bário (BaTiO_3) e o titanato de chumbo (PbTiO_2) como os melhores materiais piezoelétricos com relação a sua resposta aos esforços e com a maior estabilidade com a variação de temperatura e umidade (MENEZES, 2009).

No Brasil os pesquisadores pioneiros dessa tecnologia são Walter Katsumi Sakamoto e Maria Aparecida Zaghete Bertochi, onde desenvolveram um material composto por PZT e polímeros - polifluoreto de vinilideno (PVDF) e/ou o poliéter-éter-cetona (PEEK) -, na qual conseguiram obter o PZT dispensando o tratamento térmico e a dispersão em meio aquoso e obtendo-o a temperaturas de 180°C. Além, segundo a pesquisadora, promover menor contaminação ambiental por chumbo. E ainda afirma Sakamoto que um quilômetro de uma estrada com fluxo intenso gera, com esse material, energia suficiente para manter uma residência de 40 m² por um mês, afirma o pesquisador. Além de estradas e ruas, o piso também poderia ser usado em shopping centers, estações de metrô, edifícios, entre outros ambientes. (Unesp, 2010).

Assim, ao se utilizar uma matriz polimérica, à qual se mistura a cerâmica, ganha-se em resistência ao choque mecânico, em flexibilidade e trabalhabilidade (pode se dar a forma que se quiser ao compósito). Também há uma vantagem econômica. Ao se optar pelo compósito, usa-se uma menor quantidade de cerâmica e torna-se possível estudar diferentes matrizes de forma a melhorar a atividade piezoelétrica do filme.

(SAKAMOTO, 2010)

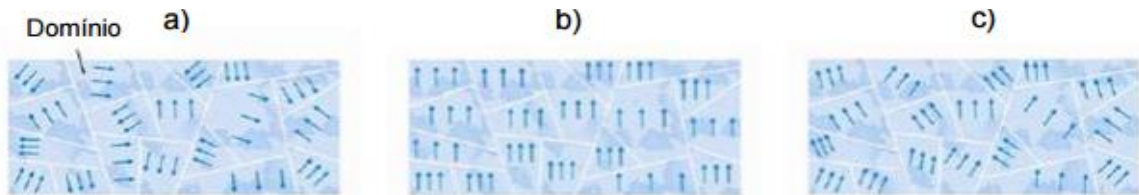
A cerâmica PZT tem seus domínios magnéticos formados por células unitárias tetragonais distorcidas quando se encontram abaixo da temperatura Curie (temperatura limite para que o material deixe de ser ferromagnético), como ilustra a figura 20(a). A célula unitária forma um dipolo elétrico devido à posição deslocada do íon de titânio (Ti) ou zircônio (Zr) e, dentro de um domínio, as células apresentam polarização e orientação na mesma direção (PAES, 2006, SAKAMOTO, 2006). Até então o PZT não existe uma característica piezoelétrica pelo fato da ordem aleatória entre os domínios. Tendo então a polarização iniciado por meio de elevar o material a sua temperatura acima a de Curie, passando então a célula unitária possuir simetria cúbica, figura 20(b).



Fonte: SAKAMOTO, 2006

Ao aplicar-se um campo elétrico intenso, na ordem de kV/mm, ocorrendo a expansão da célula e que os domínios se oriente em direção ao campo (GODOY, 2008), figura 21(b). Após o resfriamento o PZT tem alguns de seus domínios que voltam a posição inicial, no entanto não o suficiente para que o material perca suas novas características piezoelétricas, figura 21(c).

Figura 21: Polarização da cerâmica PZT



Fonte: SAKAMOTO, 2006

2.5 ESTUDOS DESENVOLVIDOS PARA ALTERNATIVA DA ENERGIA PIEZOELÉTRICA

Embora o conhecimento sobre os materiais piezoelétricos seja antigo, desde 1880, e sua utilização em grande escala aplicada tanto na I Guerra Mundial, nos sonares que equipavam navios e submarinos, através de transdutores piezoelétricos, quanto na II Guerra Mundial, nos transmissores de comunicação de aeronaves (MARINHO, 2013), como divulgado em 2008, algumas casas noturnas de Londres e Holanda utilizaram destes materiais à uma camada inferior de aproximadamente um centímetro do piso, para que, com a deformação causada pelos clientes ao dançarem e pularem, gerasse eletricidade. Hoje, este sistema vem suprimindo cerca de 10% da energia consumida ao mês desta casa de shows.

No Brasil, os professores da Unesp (Universidade Estadual Paulista) Walter Sakamoto, do Departamento de Física e Química da Faculdade de Engenharia, e Maria Aparecida Zaghe, do Departamento de Química Tecnológica, interessados por estes materiais, juntos desenvolvem pesquisas na busca de um material com menor custo e mais flexível, visto que, diferente da PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) que é uma cerâmica, logo mais frágil, o novo material é feito com o PZT em pó acrescido com polímeros, também em pó, e logo por meio de prensa na temperatura de fusão do polímero formando o compósito. Esta busca tem como um objetivo para a utilização do material piezoelétrico em estradas para a captação da energia mecânica, principalmente de carros, e convertê-la em energia elétrica.

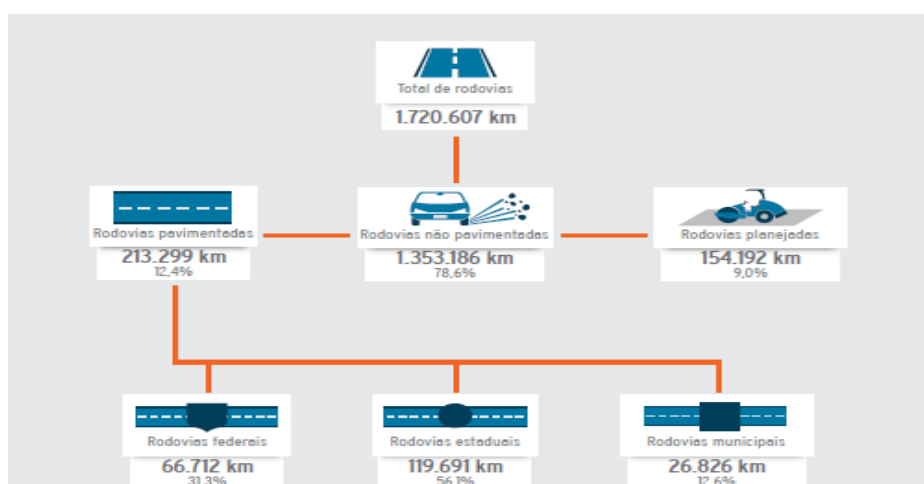
Um projeto Israelense de 2008 incorporou equipamentos constituídos de materiais piezoelétricos, o IPEG (gerador piezoelétrico Innowattech), em toda uma extensão de cem metros (100m) de determinada estrada-teste com a expectativa de obter cerca de 400 quilowatts, onde os resultados foram positivos (Missão Econômica de Israel, 2013).

2.6 RODOVIAS BRASILEIRAS

Atualmente, o transporte de cargas no Brasil é predominantemente realizado por meio das rodovias. Cerca de 61,1% da carga transportada em 2009, segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), utilizou o modal rodoviário, cuja rede tem maior difusão pelo território nacional, apesar do potencial que o país tem para a expansão da rede ferroviária. Apenas 21,0% da carga transportada no país em 2009 foi movimentada por ferrovias, sendo que quase a totalidade é operada por empresas privadas. Pelas hidrovias, terminais portuários fluviais e marítimos circula cerca de 14% da carga transportada pelo país e, pela via aérea, apenas 0,4% (CNT, 2011). A malha rodoviária tem vascularização e densidade muito superiores às dos outros modais de transporte e só não predomina na região amazônica, onde o transporte por vias fluviais tem grande importância, devido à densa rede hidrográfica natural (Portal Brasil, 2014).

Com a grande necessidade da ligação entre as regiões para o transporte de mercadorias, no século XIX se fez a primeira estrada, esta que conhecemos atualmente, que ligava a cidade de Rio de Janeiro à Petrópolis. Onde esta necessidade foi-se intensificando à cada vez que o Brasil se tornava mais industrializado com inaugurações de diversas empresas, em destaque as automobilísticas. Segundo a CNT, no Brasil, a matriz de transporte rodoviária correspondendo a cerca de 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 61,8% da matriz de transporte de cargas.

De acordo com a Confederação Nacional de Transporte (CNT), em 2015 totalizou-se cerca de 1.720.607 km de rodovia, destas 12,4% (213.299 km) são pavimentadas; 78,6% (1.353.186 km) são não pavimentadas; 9,0% (154.192 km) são planejadas. Como observa-se a figura 22 divulgada pela CNT.

Figura 22: Tipos de rodovias no Brasil

Fonte: CNT, 2015

De acordo com a tabela 03, em uma década (2005 – 2015) a malha rodoviária federal pavimentada passou de 58,2 mil km para 66,7 mil km, um aumento de 14,7%. Sendo esta participação em primeiro lugar para a região Nordeste, mas o maior índice em crescimento para a região Norte – que mesmo assim é a área de menor participação e infraestrutura desse transporte, dificultando a deslocação de diversos produtos que são cultivados e exportados, assim como a integração social.

Tabela 03: Extensão rodoviária federal pavimentada por região, Brasil 2005/2015

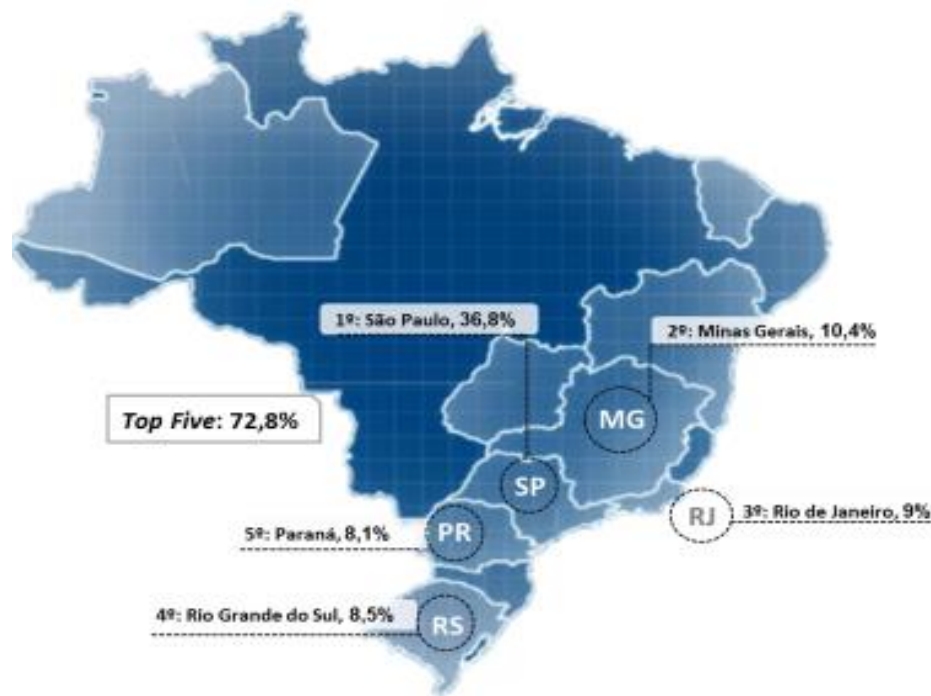
Região	2005		2015		Crescimento 2005 – 2015 (%)
	Extensão (km)	Participação (%)	Extensão (km)	Participação (%)	
Brasil	58.165	100	66.712	100	14,7
Norte	6,074	10,5	8.561	12,8	40,9
Nordeste	18.167	31,2	20.014	30,0	10,2
Sudeste	13.728	23,6	14.665	22,0	6,8
Sul	10.586	18,2	12.006	18,0	13,4
Centro-Oeste	9.610	16,5	11.466	17,2	19,3

Fonte: CNT, 2015

2.7 FROTA CIRCULANTE NO BRASIL

De acordo com dados do Relatório da Frota Circulante de 2016, realizado pelo Sindipeças (Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores) e Abipeças (Associação Brasileira da Indústria de Autopeças) apontaram cerca de cinquenta e seis milhões (56.255.893) de veículos em circulação no Brasil, sendo contabilizado: automóveis, comerciais leves, caminhões, ônibus e motocicletas. Representando um aumento de 2,2% quando comparado ao ano de 2014. Na qual 72,8% se encontram em apenas em cinco estados brasileiros como mostra a figura 23.

Figura 23: Cinco estados brasileiros com maior porcentagem de frota circulante



Fonte: Relatório de Frota Circulante, 2016

2.8 APLICAÇÃO DO MATERIAL PIEZOELÉTRICO EM RODOVIAS

Como o princípio dessa geração de energia dar-se pela energia mecânica oriunda do movimento de um corpo, temos este como uma fonte abundante no mundo. Na qual a energia liberada pelo trecho implantado os blocos contendo matérias piezoelétricos, conforme figura 24 a seguir, seria captada por capacitores, retirada por diodos e armazenada em baterias (TEIXERA, 2011).

Figura 24: Ilustração esquemática de aplicação



Fonte: TEIXEIRA, 2011

Em Portugal, afirma Carlos Alberto (2012), materiais piezoelétricos são utilizados para a pesagem de veículos. Seja usando-se de barras com extensômetros, medindo as deformações verticais e horizontais sofrida pela camada de pavimento ou aplicação dessas células de cargas no pavimento. Ainda em sua tese de mestrado em Portugal, teve como objetivo principal analisar o comportamento de dois materiais piezoelétricos (PZT e PVDF) em um trecho experimental de uma rodovia pavimentada. E Covilhã, Portugal, dois pesquisadores desenvolveram a empresa *Waydip* que presta serviços em aplicação de seu equipamento, contendo materiais piezoelétrico, para a geração de energia elétrica tanto pela passagem de automóveis quanto de pedestres

Já em Israel, a empresa *Innowattech* também faz uso desses materiais para a conversão dessa energia mecânica em eletricidade. Para isso, aplicam-se geradores piezoelétricos no pavimento na qual com a passagem dos veículos, estes equipamentos recolhe a energia mecânica transmitida pelo veículo às estradas convertendo-a em eletricidade, aproveitando dessa forma energia que normalmente é desaproveitada (KATZ, 2009).

No Brasil ainda no segundo semestre de 2016, conforme Cíntia Junges, começou a ser implantada essa tecnologia em 18,5 quilômetros de ciclovias na cidade de Curitiba, para produção eletricidade a partir do som e da vibração das bicicletas com a finalidade de ajudar a abastecer o sistema de iluminação inteligente. Uma ação da Prefeitura da cidade juntamente empresa japonesa *Soundpower Corporation*, financiado pela Agência de Cooperação Internacional do Japão (JICA) e do ministério da indústria japonês.

A aplicação desses materiais tem sido comum em pisos de shoppings no Japão, de casas noturnas em Londres e em pavimentos de Israel. Nos EUA a empresa Genziko desenvolveu um projeto chamado de *energy harvesting* para pavimentos rodoviários fazendo-se uso do efeito piezoelétrico, no entanto dados sobre sua eficiência ainda não tenham sido divulgados. Na figura 25, ocorre uma simplificada esquematização de como ocorre a produção de eletricidade por meio de materiais piezoelétricos aplicados em pavimentos.

Figura 25: Esquema da produção elétrica em rodovias pelo efeito piezoelétrico



Fonte: neeasciencenews.wordpress.com, 2011

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como fundamento a revisão bibliográfica por meios de artigos, livros e sites de órgãos responsáveis por registro de dados, todos pertinentes ao assunto abordado: fontes de produção de energia, dados percentuais da matriz energética entre outros. De forma a se obter informações tanto quantitativas quanto qualitativas para então avaliar a pertinência dos estudos e aplicações de materiais piezoelétricos na geração de energia elétrica.

Analizou-se a produção energética pelas fontes energéticas no mundo e no Brasil, podendo então concretizar a necessidade de fontes alternativas de geração de energia, assim como as que já vindo sendo usadas, ao observar a significativa queda na produção das hidrelétricas nos anos em que o país teve um período mais prolongado de estiagem de chuvas, dos últimos dez anos, ocasionando diminuição dos níveis d'água em suas represas. Tendo essa alteração do ciclo hidrológico afetado pela ação humana, e ainda sim, podendo ser oriunda de um ciclo natural, como explica Carlos Tucci.

Esta geração elétrica, por meio de materiais piezoelétricos, sendo já provada de sua viabilidade e aplicação, tomando como base a empresa israelita Innowattech, divulgado no site do Missão Econômica de Israel no Brasil, na qual esta presta serviço com implantação de geradores piezoelétricos, tanto em estradas pavimentadas quanto em trilhos de trens, para alimentar sinalizações de trânsito e iluminação de ambientes destes meios.

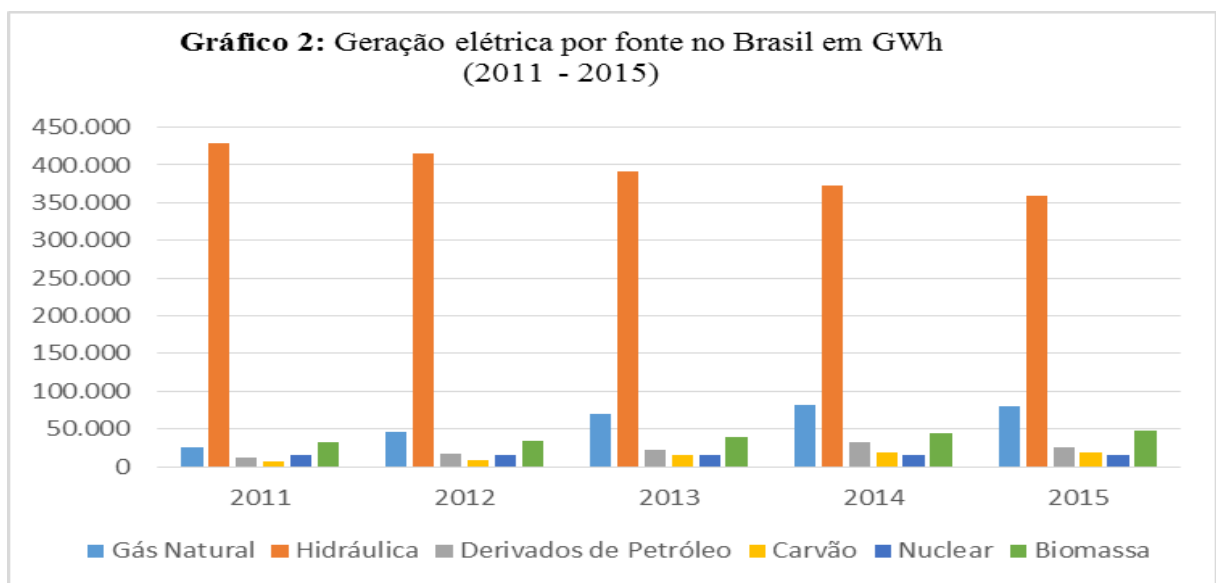
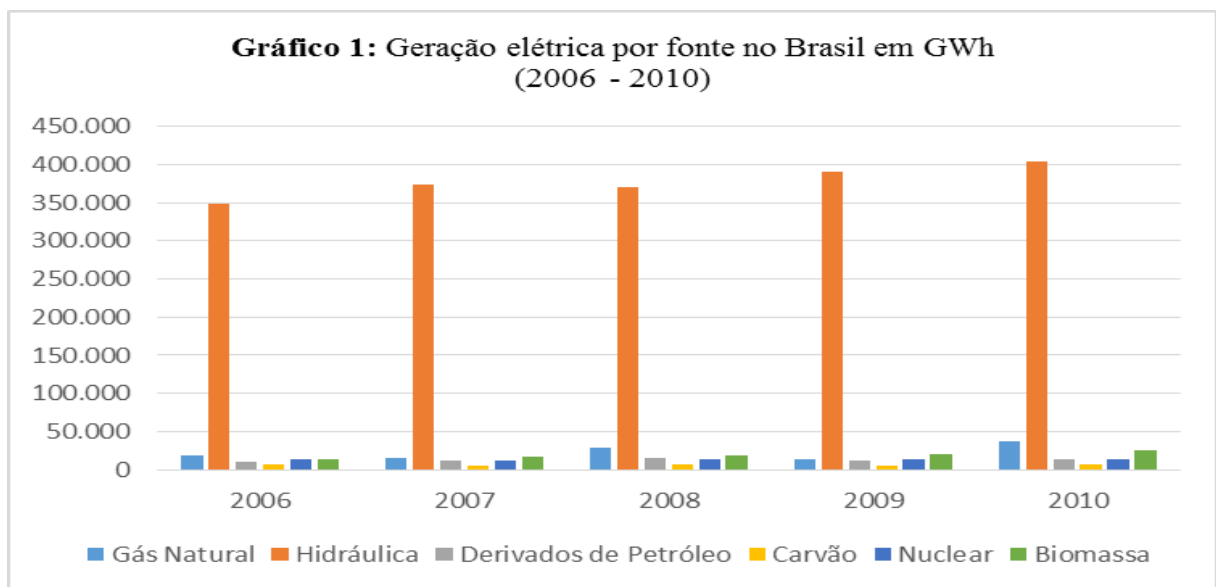
Em Portugal, o autor Carlos Alberto tem como sua tese de mestrado, aplicação de placas piezoelétrica, PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) e o PVDF (Poli(fluoreto de vinilideno)) sob pavimento, em três diferentes profundidades, para análise de melhor comportamento para a geração elétrica com o fluxo de distintos veículos, sejam carga leves ou pesadas, e em variadas velocidades.

Já no Brasil, Walter Sakamoto juntamente com Maria Bertochi, buscam desenvolver um material piezoelétrico mais flexível, com menor custo e menor vaporização de chumbo, considerando que o método inicial para obter o PZT, constituído de chumbo, dar-se à altas temperaturas, 500 à 800°C. Para isto, vem sendo usado a nanotecnologia e utilização de materiais poliméricos, como o PEEK (poliéter-éter-cetona) e o PVDF (ambos tendo matéria-prima encontradas nacionalmente, assim barateando o seu custo) para formar o compósito.

Por fim foram demonstrados os resultados das pesquisas considerando suas vantagens e desafios da utilização destes materiais piezoelétrico em rodovias para a geração de energia elétrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para então análise de dez anos da produção elétrica das hidrelétricas foram adotados dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica tanto de 2016 (abrangendo de 2011 a 2015) quanto o de 2011 (evidenciando dados desde 2006 a 2010). Observado então no gráfico 1 e gráfico 2 que nos anos de maior estiagem (2013, 2014 e 2015) ocorreu uma queda significativa da produção nas hidrelétricas e, então para suprir esse déficit, houve um aumento da produção das termelétricas (nuclear, derivados de petróleo, gás natural, biomassa e carvão) estas consideradas mais caras e/ou mais poluentes.



A produção de energia piezoelétrica obtém-se pela deformação de materiais piezoelétricos. Estes materiais podem estar dispostos em cristais (figura 26), em cerâmicas, como PZT (figura 27) e em materiais poliméricos, como PVDF (figura 27). Conforme sua deformação gera, em resposta, energia elétrica que captada por fios condutores e armazenada em baterias caso sua utilização não seja de imediato.

Figura 26: Cristal de Quartzo



Fonte: GAMA, 2013

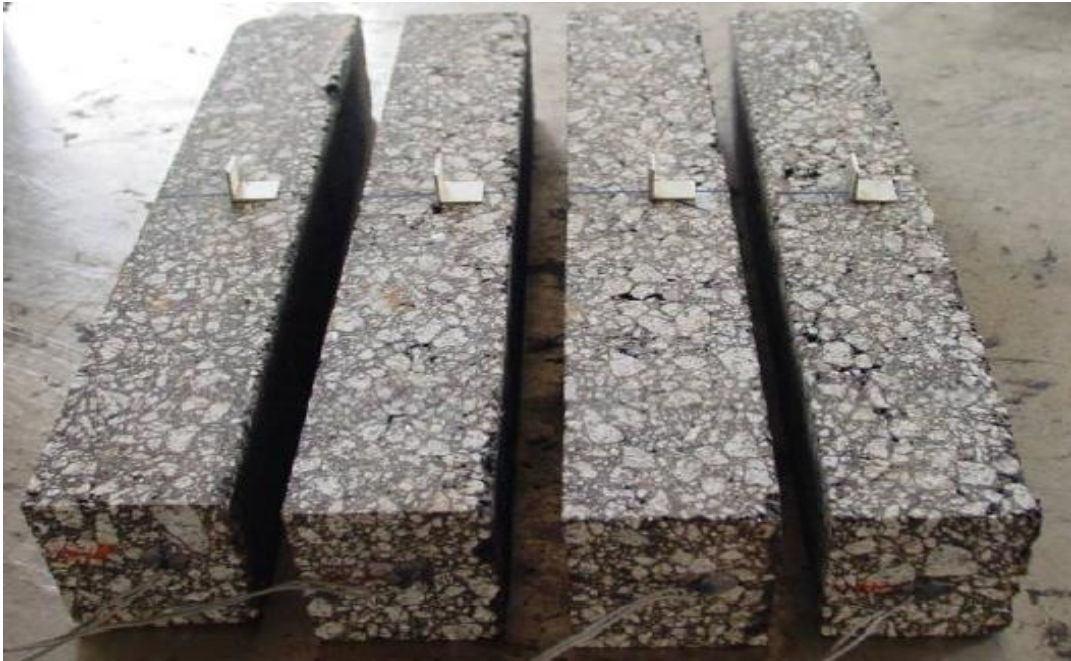
Figura 27: PVDF à esquerda e PZT à direita



Fonte: ALBERTO, 2012

Testes realizados em laboratórios e em pavimentos tanto com o PZT quanto o PVDF, por Carlos Alberto, obteve-se em um dos testes de laboratório, que foi de suma importância para obter-se um comportamento padrão dos materiais piezoelétricos para quando foram aplicados na rodovia, consistiu na análise do comportamento dos materiais em vigas betuminosas, figura 28 a seguir.

Figura 28: Vigas Betuminosas



Fonte: ALBERTO, 2012

Na realização no trecho experimental em pavimento, foi feita análise em três diferentes profundidades (10 cm, 5 cm e 1 cm), assim como distintos veículos, de cargas leve e pesada, sobre três velocidades médias (40km/h, 50km/h e 70km/h).

No hospital de Covilhã, em Portugal, Filipe Casimiro e Francisco Duarte desenvolveram um sistema de captação da energia mecânica para então conversão em eletricidade por meio do movimento de pessoas (*Wayenergy People*) e por veículos (*Wayenergy Vehicles*), este são constituídos blocos, podendo ser aplicado em pavimentos, contendo o mecanismo de geração elétrica em seu interior. Na figura 29 mostra a implantação desses equipamentos no pavimento de Covilhã.

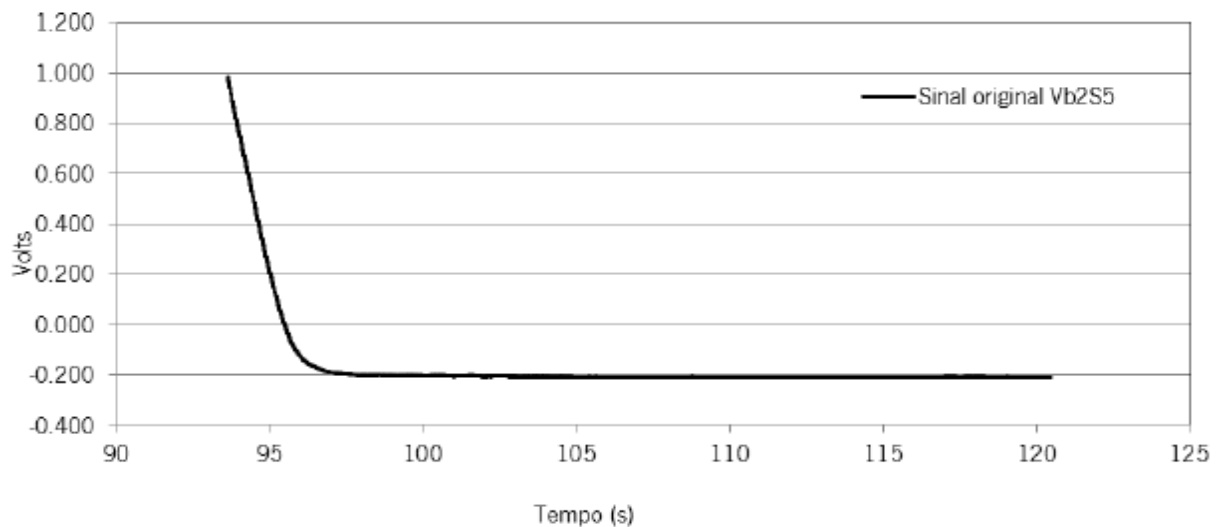
Figura 29: Processo de implantação do sistema *Wayenergy Vehicles*



Fonte: FERREIRA, 2016

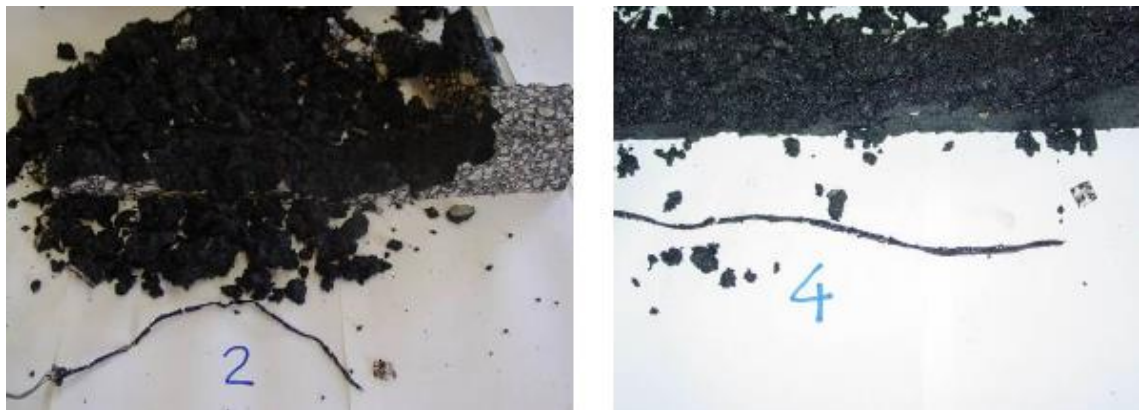
Nas análises de Carlos Alberto, o PZT apresentou comportamento anômalo, como pode ser verificado na figura 30, adquirido no teste em vigas betuminosas. Na qual sua causa foi decorrente da sua fratura e desprendimento do fio condutor (figura 31) ocasionado pelo calor e os esforços no preparo da viga. Algo não tão imprevisível, pois se trata de um material cerâmico, que tem como característica dureza, porém frágil. Já o PVDF, mesmo com a deformação, originada ao calor, não apresentou fissuras e respondeu aos impulsos perfeitamente, visto na figura 32.

Figura 30: Resposta do PZT na viga betuminosa.

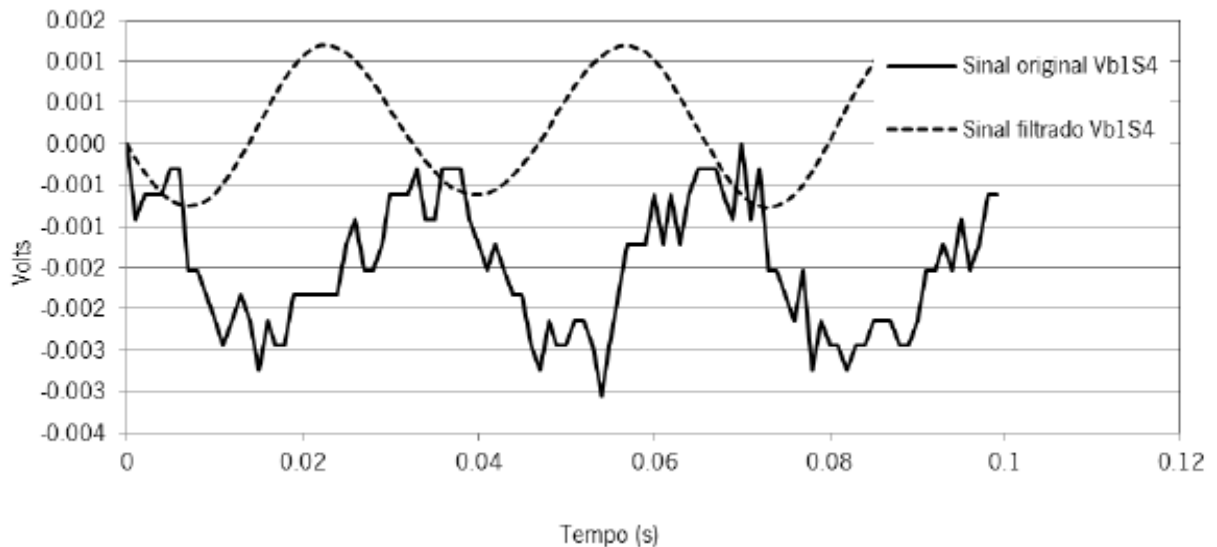


Fonte: ALBERTO, 2012

Figura 31: PZT após o teste da viga betuminosa



Fonte: ALBERTO, 2012

Figure 32: Resposta do PVDF na viga betuminosa**Fonte:** ALBERTO, 2012

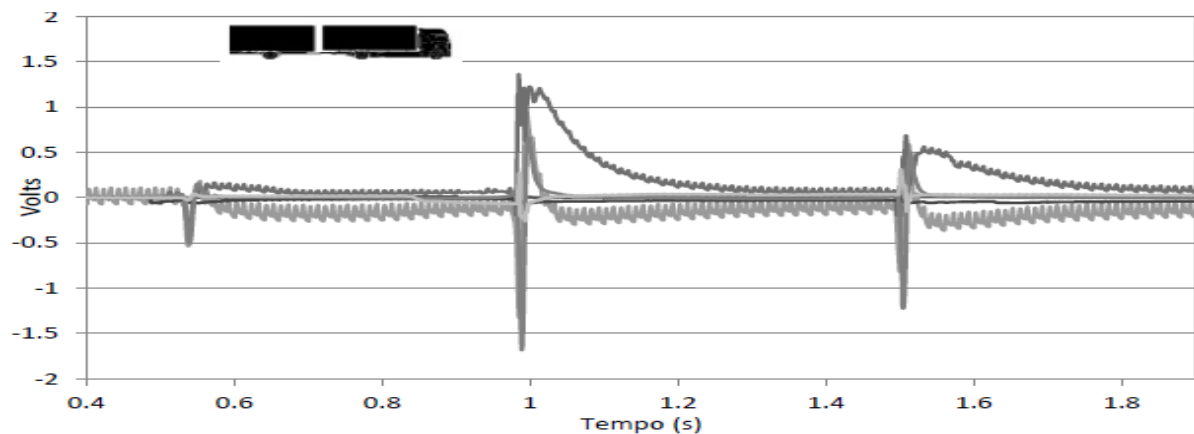
Na aplicação em pavimento, Alberto escolheu uma estrada em Guimarães, Portugal, realizando um furo à distância de 90cm da berma (sendo esta uma posição mediana de onde os pneus dos automóveis passam) com uma profundidade de 10cm. Adicionou um par dos materiais em análise (PZT, PVDF), em seguida preencheu de betume até a marca de 5cm de profundidade para adicionar mais um par do material e o mesmo se fez para a profundidade de 1cm (figura 33).

Figure 33: Furo com materiais piezoelétricos nas três profundidades**Fonte:** ALBERTO, 2012

Com um software, foi possível analisar as respostas de cada material, onde todos os materiais responderam ao fluxo veicular, obteve-se, então, que a profundidade que melhor se converteu a energia mecânica em impulsos elétricos, e também menor variabilidade

decorrente a diferentes velocidades na qual se passa o veículo, foi à de 5cm de profundidade. Observando-se também que as respostas elétricas de pico se dão durante a passagem da parte posterior e traseira do veículo (pontos que apresentam maior carga sobre os materiais), onde estas respostas são diretamente proporcionais ao peso (figura 34).

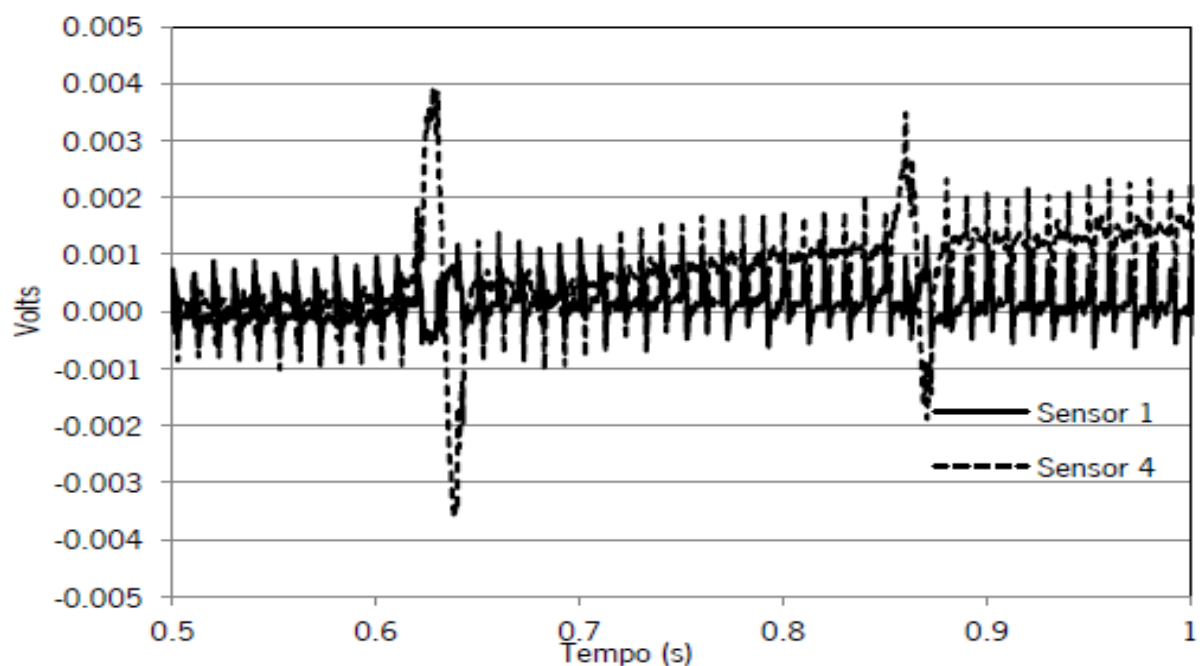
Figura 34: Resposta dos materiais (PZT e PVDF) à passagem de um veículo



Fonte: ALBERTO, 2012

Em seus dados também foi observado que à medida que a profundidade se aproximava da superfície, maior eram os impulsos elétricos emitidos. Algo que não ocorria com o PZT, este que apenas teve sua maior resposta à profundidade de 10cm e o PVDF invertendo a situação nas demais. Visto na figura 35 a resposta à 10 cm da superfície com um impulso de cerca de 4 mV.

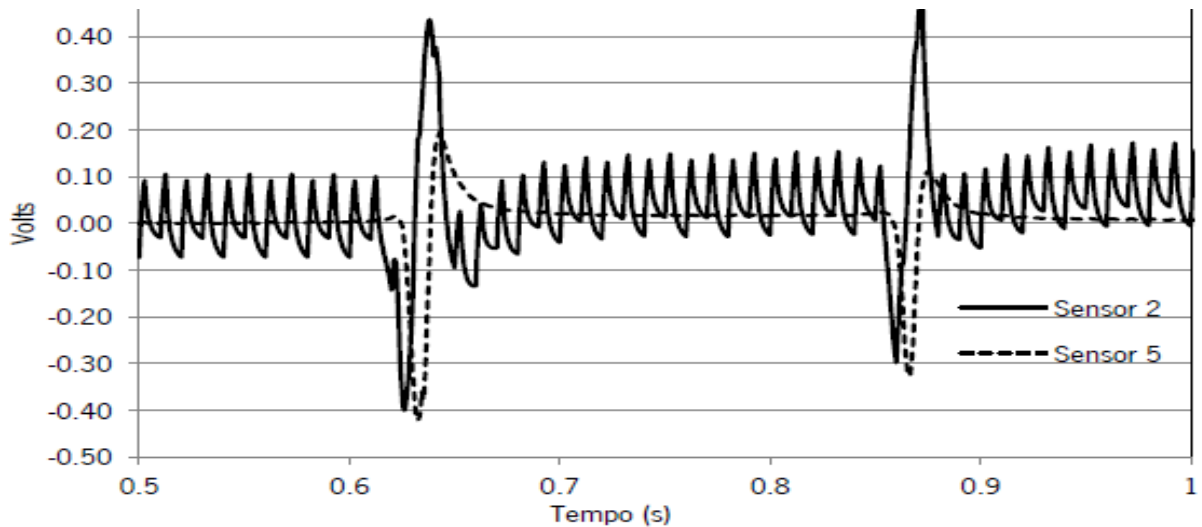
Figura 35: Resposta dos materiais (PZT e PVDF) à 10cm de profundidade



Fonte: ALBERTO, 2012

Para a figura 36 foi observado um impulso de 450 mV, na qual os materiais se encontravam a uma profundidade de 5 cm.

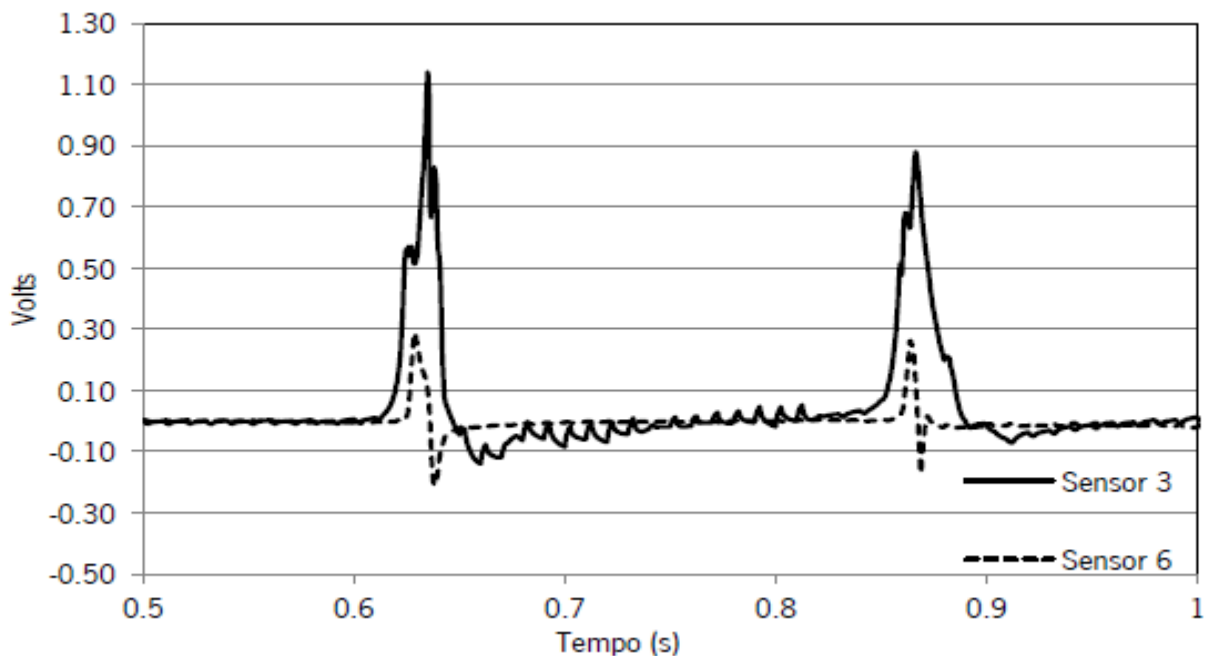
Figura 36: Resposta dos materiais (PZT e PVDF) à 5cm de profundidade.



Fonte: ALBERTO, 2012

Já para uma profundidade de 1 cm em relação à superfície, apresentou um impulso de 1,2 mV como observado na figura 37.

Figura 37: Resposta dos materiais (PZT e PVDF) à 1cm de profundidade.

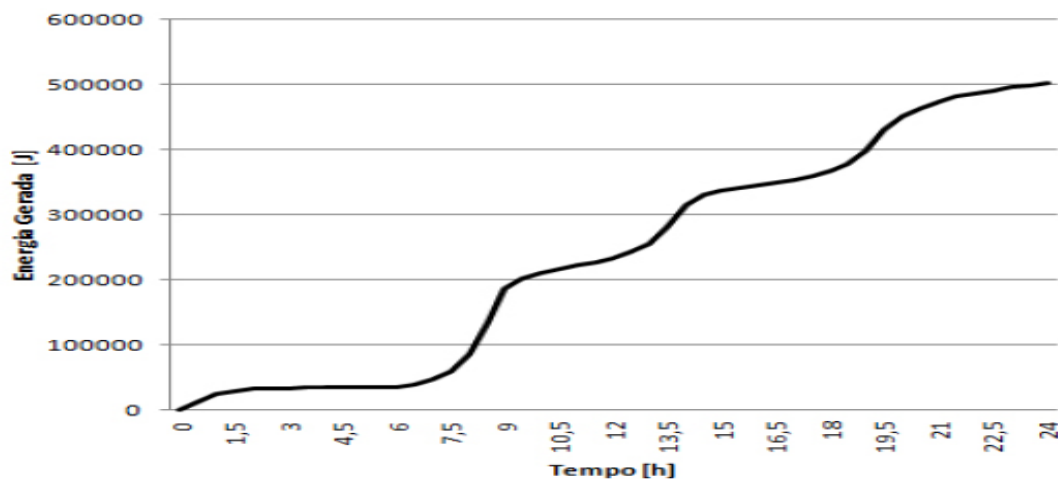


Fonte: ALBERTO, 2012

Na empresa *Waydip*, criada pelos pesquisadores dos *Wayenergy Vehicles*, puderam analisar a perspicaz de seu produto na geração de eletricidade de acordo com o trecho

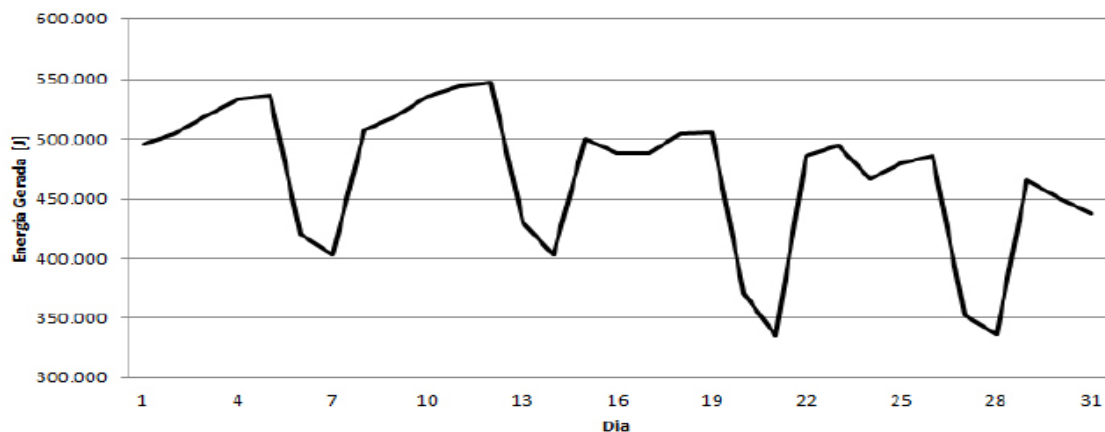
rodoviário experimental, assim como dados imprevistos não estimados, e concluir as dependências para tal fonte de geração de energia elétrica. De acordo com a figura 38, por eles fornecido, foi concluído que os horários de pico na produção elétrica são proporcionais com o horário de pico de tráfego sobre os blocos. Uma geração com cerca de 139,6 Wh. Um valor inferior ao esperado decorrente ao fato de que o tráfego médio por hora de veículos foi aproximadamente 33% menor do que o esperado (5200) assim como a velocidade média destes foi cerca de 50% inferior (25km/h), então, fatores que contribuíram para uma menor produção (FERREIRA, 2013). Já na figura 39, representa a análise dos dados na geração da energia elétrica nesta implantação piloto em Covilhã durante um mês. Sendo observado dias em finais de semana com baixa produção oriundo da redução do tráfego veicular, como já esperado. Visto também que a geração foi gradualmente decrescente decorrente ao desgaste do módulo. Ao fim, a média da geração elétrica por dia foi de 130Wh, tendo uma quantidade no mês de 4.042,00Wh (FERREIRA, 2013).

Figura 38: Energia elétrica gerada em um dia pelo Wayenergy Vehicles



Fonte: FERREIRA, 2016

Figura 39: Eletricidade gerada durante um mês pelo Wayenergy Vehicles



Fonte: FERREIRA, 2016

Divulgado pela Revista Sustenta, o professor Haim Abramovich, fundador da organização *Innowattech*, explica que em uma avenida com menos de 1,6 quilômetros (uma milha), quatro faixas e por onde circulam cerca de mil veículos por hora, com a implantação de geradores piezoelétricos de 5,5 cm de espessura a uma profundidade de 6cm do nível superior da estrada (figura 39), pode gerar aproximadamente 400kW, sendo suficiente para alimentar 600 casas. Tendo que o investimento para a implantação desses geradores seja de 650 mil dólares por quilômetro, então para se obter 500kW se investiria cerca de dezesseis milhões de reais (R\$16 milhões). Entretanto, o presidente da empresa diz que este custo possa cair em 60% quando alcançarem a produção em massa, logo poder a vir a ser mais barata que a energia solar, onde em março de 2016 sua implantação para a mesma capacidade se encontrava de até três milhões e oitocentos mil reais (3,8 milhões R\$) (GERADOR, 2016).

Figura 40: Instalação do material piezoelétrico em estradas, *Innowattech*.



Fonte: ntd.tv, 2009

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo realizado sobre a utilização de materiais piezoelétricos em pavimentos rodoviários como uma nova fonte alternativa na geração de energia elétrica, visto que a preocupação com a escassez de recursos não renováveis, com o equilíbrio ambiental e a instabilidade de depender-se necessariamente apenas de uma forma de geração elétrica, teve como norte um levantamento bibliográfico à cerca de dados estatístico sobre quais fontes e sua produção energética no Brasil, assim como o números do fluxo de veículos circulantes no país e como funciona estes materiais estudando experimentos e aplicações já feitas.

Em Israel, a empresa *Innowattech* presta serviço especialmente para aplicação de geradores piezoelétrico *Innowattech* (IPEG) em pavimentos para o abastecimento elétrico de sinalizadores de trânsito e iluminação das estradas, mostrando, então, sua eficiência e viabilidade. Onde afirma seu fundador que para a implantação de materiais piezoelétricos para a geração de eletricidade tem um custo, para cada quilômetro, de 650 mil dólares. No entanto, dada uma construção em massa esta aplicação poderia ser reduzida em cerca de 60%, logo podendo ser até mesmo mais barata que a energia solar.

Em Portugal, a empresa *Waydip* fez seus testes em um trecho experimental no pavimento de um hospital utilizando seus geradores, também se utilizando de materiais piezoelétricos, que o denominaram de *Wayenergy Vehicles*. Tendo seus resultados positivos e conclusões já esperadas como que a produção de eletricidade é diretamente proporcional ao aumento do fluxo de veículos. Assim como observaram a queda da produção ao longo dos dias decorrente ao desgaste do material.

Ainda em Portugal, Carlos Alberto em sua defesa de mestrado analisou, em suma, a utilização de dois tipos distintos de materiais piezoelétricos em um trecho de uma estrada pavimentada (titanato zirconato de chumbo, PZT, e polivinilideno, PVDF). Observando que entre os dois materiais o que melhor respondeu aos esforços no pavimento, e ainda superou as expectativas definidas em laboratório, foi o PVDF. Ainda, tendo que a implantação à profundidade de 5 cm conduziu a resultados mais fiáveis em termos de diversos fatores como a variação da velocidade do veículo-teste e a carga do mesmo.

Visto já a possibilidade desta nova fonte, no Brasil os pesquisadores Walter Sakamoto e Maria Bertochi buscam produzir um novo material piezoelétrico mais resistente e maleável para aderir diversas formas. Visto que os materiais que melhor respondem em voltagem em relação à deformação são os constituídos de cerâmicas, sendo então mais frágeis. Tais pesquisadores criaram um compósito com PZT mais PVDF e/ou PEEK (poliéter-éter-cetona)

na qual reduz a evaporação de chumbo por ser realizado em variações menores de temperatura e são produtos encontrados no país. O mesmo ainda afirma a necessidade de um trânsito intenso para se gerar uma quantidade de eletricidade para se manter uma residência por um mês.

Perante tais dados e estudos levantados é possível considerar algumas vantagens na utilização de materiais piezoelétricos em pavimentos para a geração de energia, como em as aplicação não existe uma maior degradação ambiental, pois esta se dar pela integração em locais já alterados (nos pavimentos) e ainda por este motivo, como afirma a *Innowattech*, se torna praticamente impossível roubo ou furto dos equipamentos e os custos de construção e o tempo de retorno esperado do investimento são muito menores do que os da energia solar. Assim como se observa dois grandes desafios para a aplicação dessa tecnologia: a capacidade de armazenamento da energia gerada visto que pode exigir o uso de supercapacitores que são caros e espaçosos se constituído com esta tecnologia (UNESP, 2010). E o outro desafio que esta relacionado com a durabilidade da placa, esta que deve ter a capacidade de se deformar e retornar para seu estado inicial quando retirada a força de deformação, visto que o material perde maleabilidade devido ao uso.

REFERÊNCIAS

Alessandra P. R. Teixeira, Alexandre Artur R. Bezerra, André M. Duarte, Isabele S. de Lima, Nádia S. S. Guimarães, Theo T. Moreira. Aproveitamento de Energia dissipada: Piezoelectricidade. IX Simpósio de Base Experimental das Ciências Naturais. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://becn.ufabc.edu.br/guias/energia/resumo/EN_AA_D_07.pdf>. Acesso em: 25 de outubro de 2016.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica Atlas de Energia Elétrica.. 3ª Edição. Brasília, 2009.

ÁREA TERRITORIAL BRASILEIRA. IBGE: 2016. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm>. Acesso em: 09 de setembro de 2016.

BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO. Agência Nacional de Energia Elétrica: 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 20 de outubro de 2016.

BOLETIM MENSAL DE MONITORAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO. Ministério de Minas Energia: agosto, 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3308684/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Agosto-2016.pdf/b3e1c92e-619b-4386-928d-3e19bcef41c9>>. Acesso em: 20 de outubro de 2016.

BRASIL CONCENTRA 20% DA ÁGUA DO MUNDO, MAS MENOS DA METADE DA POPULAÇÃO TEM ACESSO A SANEAMENTO. ONUBR: 2016. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/brasil-concentra-20-da-agua-do-mundo-mas-menos-da-metade-da-populacao-tem-acesso-a-saneamento/>>. Acesso em: 09 de setembro de 2016.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: Fontes, 2016. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=1vt5mdty8_4&_afLoop=1262928405790611>. Acesso em: 08 de setembro de 2016.

DE GODOY ANTUNES, Evelise; DE SOUSA, Maíra Nunes; DA COSTA SCHERTEL, Marina Neubauer. PISO QUE TRANSFORMA ENERGIA MECÂNICA EM ELETRICIDADE.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE-Empresa. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. **Rio de Janeiro**, 2016.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE-Empresa. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. **Rio de Janeiro**, 2011.

DE SOUSA, Wanderley Lemgruber. **Impacto ambiental de hidrelétricas: uma análise comparativa de duas abordagens**. 2000. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

DOS REIS, Lineu Belico. **Geração de energia elétrica**. Editora Manole, 2015.

DUARTE, Francisco; FERREIRA, Adelino. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.

EDUCAÇÃO GLOBO. *A questão energética na atualidade*. Disponível em: <<http://educacao.globo.com/artigo/questao-energetica-na-atualidade.html>>. Acesso em: 08 de setembro de 2016.

EMPRESAS FAZEM PESQUISAS PARA TRANSFORMAR PISADAS EM ENERGIA ELÉTRICA, 2013. Disponível em < <http://www.webrun.com.br/h/noticias/empresas-fazem-pesquisas-para-transformar-pisadas-em-energia-eletrica/14551> >. Acesso em: 15 de setembro de 2016.

ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: Contexto atual e perspectivas. Interesse Nacional: 2013 Disponível em: <<http://interessenacional.com/index.php/edicoes-revista/energia-eletrica-no-brasil-contexto-atual-e-perspectivas/3/>>. Acesso em: 07 de outubro de 2016.

GERADOR de energia solar. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/gerador-de-energia-solar.html>. Acesso em: 25 de outubro de 2016.

INATOMI, Thais Aya Hassan; UDAETA, Miguel Edgar Morales. Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos. In: **III Workshop Internacional Brasil-Japão: Implicações Regionais e Globais em Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável**. 2005.

JUNGES, Cíntia. Ciclovias de Curitiba terão piso que gera energia a partir do movimento, 2016. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/ciclovias-de-curitiba-terao-piso-que-gera-energia-a-partir-do-movimento-0b1ik6n0ms09rcp3ch33yt6wt>>. Acesso em: 25 de outubro de 2016.

PAIM, Aida Rotava et al. Consumo de energia elétrica e impactos ambientais. **Revista Cadernos do Ceom**, v. 22, n. 31, p. 443-452, 2010.

PALHA, C. A. F. Desempenho de materiais piezoelétricos para aplicações rodoviárias. 2012. Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial. – Brasília: CNT : SEST : SENAT, 2015.

PROBLEMAS NO SETOR ELÉTRICO AUMENTAM CUSTOS E EXIGEM MAIS INVESTIMENTOS EM FONTES RENOVÁVEIS, 2014 Disponível em: <<http://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2014/02/20/problemas-no-setor-eletrico-aumentam-custos-e-exigem-mais-investimento-em-fontes-renovaveis>>. Acesso em: 08 de setembro de 2016.

REVISTA SUSTENTA. Gerando energia elétrica através do fluxo no trânsito, 2011. Disponível em: <<http://eletrocuriosidades.blogspot.com/2011/09/gerando-energia-eletrica-atraves-do.html>>. Acesso em: 25 de outubro de 2016.

SAKAMOTO, Walter Katsumi. **Piezoelétricidade induzida pelo fluxo de íons**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, Wildson Luiz Pereira dos; MOL Gerson dos (Coord). Química e Sociedade. São Paulo: Nova Geração, 2005.

SECA NO AMAZÔNIA EM 2005. INPE: 2005. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=492>. Acesso em: 07 de setembro de 2016.

SILVEIRA, Evanildo da. Eletricidade do aperto. **Pesquisa FAPESP**, n. 171, p. 72, 2010.

SITUAÇÃO DOS PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS DO BRASIL. ONS: 2016. Disponível em: <http://www.ons.org.br/tabela_reservatorios/conteudo.asp>. Acesso em: 13 de setembro de 2016.

TEMPO SECO PIORA NÍVEL DOS RIOS NA REGIÃO DE CAMPINAS – SP. Estadão: 2014. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,tempo-seco-piora-nivel-dos-rios-na-regiao-de-campinas-sp,1163071>>. Acesso em: 07 de setembro de 2016.

TUCCI, Carlos EM. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. **Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas–Câmara Temática de Recursos Hídricos, Brasília**, 2002.

UNESP, 2010. "Energia limpa sob nossos pés". Disponível em: <http://www.unesp.br/aci/revista/ed07/pdf/UC_07_Quem01.pdf>. Acesso em: 26 de outubro de 2016.

UNESP, 2010. "Unesp trabalha em pavimentos que geram energia". Disponível em: <<http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/?p=285>>. Acesso em: 31 de outubro de 2016.

ANEXO B – Localização para a instalação piloto na cidade de Covilhã, Portugal.



Fonte: Google Earth, 2016