



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS DE CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

ALINE DE OLIVEIRA SCHONARTH

**GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA ATRAVÉS DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS
POLIMÉRICOS E DO VENTO**

CERRO LARGO

2017

ALINE DE OLIVEIRA SCHONARTH

**GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA ATRAVÉS DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS
POLIMÉRICOS E DO VENTO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

CERRO LARGO

2017

PROGRAD/DBIB - Divisão de Bibliotecas

Schonarth, Aline de Oliveira Geração de energia limpa através de materiais piezoelétricos poliméricos e do vento / Aline de Oliveira Schonarth. -- 2017.
93 f.:il.

Orientador: Jorge Luis Palacios Felix.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária , Cerro Largo, RS, 2017.

1. Meio ambiente. 2. Energia renovável. 3. Vento. 4. Coleta de energia. 5. Piezoelétricos. I. Felix, Jorge Luis Palacios, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

ALINE DE OLIVEIRA SCHONARTH


**GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA ATRAVÉS DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS
POLIMÉRICOS E DO VENTO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira sul.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

Este trabalho de Conclusão de Curso foi defendido e aprovado pela banca em: 13 | 12 | 2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix - UFFS



Prof. Dr. Bruno Munchen Wenzel - UFFS



Acadêmico do Mestrado Juliano Roberto Alves Garcia - UFFS

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais Ilse e Irineo e a todos que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos são, primeiramente, a Deus, pela vida, saúde e força em todo o processo de graduação, possibilitando o afrontamento das dificuldades e dos desânimos.

Em segundo lugar, serei imensamente grata aos meus pais Irineo e Ilse, pelo apoio incondicional nas trajetórias de minha vida. Hoje, infelizmente, eles não estão mais presentes fisicamente, mas sei que estão em espírito, sendo os meus anjos da guarda, me guiando e protegendo em tudo.

Agradeço também aos meus irmãos Juliano e Cristiano e ao meu namorado Marcelo pela ajuda, reconhecimento e por estarem juntos comigo nesses últimos momentos, não me deixando desanimar e desistir.

Meu reconhecimento ao meu orientador Jorge Luis Palacios Felix e seus orientandos do PPGATS, pelo tempo dedicado, pelos conhecimentos e informações passadas para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço as minhas amigas Débora, Diana, Laura e Natali por estarem sempre comigo, me ajudando nos momentos bons e ruins.

Enfim, sou grata a todos que de alguma forma foram importantes e contribuíram no processo de minha formação acadêmica.

RESUMO

Devido aos problemas ambientais vivenciados, atualmente tem-se uma busca por energias limpas e renováveis, por serem melhores opções para minimizar os danos ambientais. A obtenção de energias limpas pode ser feita através do aproveitamento do que é oferecido pelo meio ambiente, como o vento, a chuva, o sol, entre outros fatores que oportunizam a geração de energia, sejam em grande ou pequena escala. A coleta de energia em pequena escala possibilita a conversão da energia mecânica, capturada do meio ambiente, em energia elétrica, através de materiais piezoelétricos, que possuem a capacidade de gerar eletricidade ao serem deformados. Neste trabalho, é apresentada a análise experimental da coleta de energia limpa e renovável em pequena escala através do uso de materiais piezoelétricos poliméricos PVDF-LDT0 de MEAS, cujas vibrações foram geradas pelo fluxo do vento, produzidas por um ventilador de mesa de seis pás, com velocidades aproximadas de 4,9 e 6,2 m/s. Para a realização do experimento foram utilizados diferentes formatos geométricos de folha laminada de PVC, com as seguintes dimensões: 12 x 08 cm (CG1); 10 x 08 cm (CG2); e 10 x 10 cm (CG3), essas foram fixadas na extremidade livre do material piezoelétrico, variando-se sua posição da seguinte forma: ao meio (PGa); inferior (PGb); e superior (PGc). Para a fixação do material piezoelétrico foram utilizadas duas vigas engastadas verticais, uma de material plástico rígido e outra de alumínio, com a intenção de verificar a influência destes materiais na obtenção de energia potencial desse sistema. Os resultados experimentais mostram que o melhor desempenho de geração de energia potencial foi obtido através do uso da folha laminada de PVC com dimensões 12 x 08 cm (CG1), estando fixada na posição ao meio (PGa) do piezoelétrico com suporte da viga engastada de plástico rígido, através das respostas de 8,92 V e 0,00074 W.

Palavras-chave: Meio ambiente. Energia renovável. Vento. Coleta de energia. Piezoelétricos.

ABSTRACT

Due to the environmental problems currently experienced in the search for clean and renewable energies has been considered as one of the best options to obtain positive results and without environmental damages, taking advantage of what is offered by the ambient environmental, such as wind, rain, sun, among other factors that allow the generation of energy are large or small scale. Small-scale energy harvesting enables the conversion of mechanical energy captured from the environment into electrical energy through piezoelectric materials that have the capacity to generate electricity by being deformed. In this work, the experimental analysis of the small-scale clean and renewable energy harvesting is presented through the use of MEAS PVDF-LDT0 polymeric piezoelectric materials, whose vibrations were generated by the wind flow produced by a six-blade table fan with speeds of approximately 4,9 and 6,2 m/s. For the experiment, different geometric shapes of PVC laminated sheet with the following dimensions were used: 12 x 08 cm (CG1); 10 x 08 cm (CG2) and 10 x 10 cm (CG3), these were fixed to the free end of the piezoelectric material, varying its position defined as: to the medium (PGa); lower (PGb) and higher (PGc). For the fixation of the piezoelectric material, two vertical crimped beams were used, one of rigid plastic material and another one of aluminum, with the intention of verifying the influence of these materials in the obtaining of potential energy of this system. The experimental results show that the performance best of the potential energy generation was obtained by using PVC laminated sheet with dimensions 12 x 08 cm (CG1), being fixed in the position in the middle (PGa) of the piezoelectric with supporting of the cantilever beam of rigid plastic, through the response of 8,92 V and 0,00074 W.

Keywords: Environment. Renewable energy. Wind. Energy harvesting. Piezoelectric.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa das potencialidades eólicas do Brasil	19
Figura 2 - Turbinas eólicas de eixo vertical (a) e de eixo horizontal (b).....	21
Figura 3 - Modelo da tecnologia Vibro-wind.....	22
Figura 4 - Tecnologia Flower Power - Árvore Eólica.....	22
Figura 5 - Modelo da tecnologia Windstalk	23
Figura 6 - Secções: através da base da haste (a), da haste (b) do gerador de toque (c).....	23
Figura 7 - Aplicações técnicas dos efeitos da piezoeletrecidade.....	25
Figura 8 - Esquema do processo de captura de energia através de vibrações	26
Figura 9 - Modelo de coleta de energia através de túnel de vento	27
Figura 10 - Esquema eletroaeroelástica com acoplamento piezoelétrico.....	28
Figura 11 - Modelo experimental de bandeira em um fluxo de água uniforme com velocidade U, anexada, mecanicamente, com IPMC.....	29
Figura 12 - Configurações para coletas de energia piezoelétrica: excitação na base cantilever de bimorf piezoelétrico (a) e pilha piezoelétrica de camadas múltiplas (b).....	29
Figura 13 - Modelo de PVDF aplicado para separador em bateria	30
Figura 14 - Modelo geométrico triangular, através da configuração horizontal(a) e vertical(b).....	30
Figura 15 - Representações dos eixos em materiais piezoelétricos.....	32
Figura 16 - Respostas da variáveis: $ij = 33$ (a), devido a tensão e a força aplicada no mesmo eixo de polarização, $ij = 31$ (b), tensão no eixo de polarização e força no sentido perpendicular e $ij = 15$ (c), devido a tensão aplicada no sentido perpendicular ao eixo e a força de torção..	33
Figura 17 - Modos de operação dos dispositivos piezoelétricos: modo 33 e 31	34
Figura 18 - Circuito equivalente simplificado para piezoelétricos.....	35
Figura 19 - Tecnologia para Colheita de Energia do ambiente	36
Figura 20 - Modelos de geradores piezolétricos (a) unimorf e (b) bimorf	37
Figura 21 - Modelo de viga em balanço com massa na extremidade livre, através do sistema atual (a) e com um grau de liberdade (b).....	40
Figura 22 - Fenômeno de ressonância, quando $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$	42
Figura 23 - Viga com massa fixada na extremidade livre	43
Figura 24 - Modelo de flexão em viga	44

Figura 25 - Ressonância causada na ponte Tacoma Narrows nos EUA, induzida pelo fluxo do vento	46
Figura 26 - Mecanismo físico da convecção verificados em ventiladores	48
Figura 27 - Microestrutura de pórtico rígido frontal (a) e lateral (b)	51
Figura 28 - Modelo experimental do protótipo para geração de energia elétrica, com a viga de plástico (a) e de alumínio (b).....	52
Figura 29 – Modelo de material piezoelétrico PVDF – comparação do seu tamanho com uma moeda	52
Figura 30 - Fluxo do vento causado pelo ventilador modelo seis pás.....	53
Figura 31 - Modelo de anemômetro digital para mensurar a velocidade do vento	53
Figura 32 - Modelo do osciloscópio digital para a captura de saídas de voltagens.....	54
Figura 33 - Formatos de materiais plásticos flexíveis acoplados ao piezoelétrico, como CG1 (a), CG2 (b) e CG3 (c)	56
Figura 34 - Modelo experimental em centímetros, utilizado para todas as configurações geométricas, sendo estas 12 x 08 cm (CG1), 10 x 08 cm (CG2) e 10 x 10 cm (CG3), através da PGa (a), PGb (b) e PGc (c), com a viga de plástico e de alumínio	57
Figura 35 - Sistema em microescala para geração de energia elétrica.....	58
Figura 36 - Modelo de resistor, através das faixas coloridas (a) e modo de circuito (b).....	59
Figura 37 - Modelo de circuito com resistor.....	60
Figura 38 - Resposta de voltagem V_{rms} obtida com o resistor.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Melhores respostas de saídas de voltagens, obtidas através da viga de plástico.....	64
Gráfico 2 - Melhores respostas de saídas de voltagens, obtidas através da viga de alumínio.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de contorno aplicadas em barras sujeitas a vibrações.....	43
Tabela 2 - Calibração das velocidades do vento para V_{v1} e V_{v2}	53
Tabela 3 - Respostas de saídas de voltagens para a viga engastada de plástico na V_{v1}	61
Tabela 4 - Respostas de saídas de voltagens para a viga engastada de plástico na V_{v2}	62
Tabela 5 - Respostas de saídas de voltagens para a viga engastada de alumínio na V_{v1}	62
Tabela 6 - Respostas de saídas de voltagens para a viga engastada de alumínio na V_{v2}	63
Tabela 7 - Resultados encontrados através da voltagem obtida pelas diferentes geometrias.....	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 ENERGIA EÓLICA	19
3.1.1 Modelos Energéticos Eólicos	20
3.2 PIEZOELETRECIDADE.....	24
3.2.1 Modelos Energéticos com Materiais Piezoelétricos	26
3.2.2 Propriedades Piezoelétricas	32
3.2.3 Coeficientes Piezoelétricos	32
3.2.4 Coeficiente eletromecânico	33
3.2.5 Circuito equivalente com piezoelétricos	34
3.3 COLETA DE ENERGIA DO MEIO AMBIENTE (ENERGY HARVESTER)	35
3.4 VIBRAÇÕES MECÂNICAS	37
3.4.1 Elementos das vibrações mecânicas	38
3.4.2 Equações de movimento	40
3.4.3 Equações de um sistema não amortecido à força harmônica	41
3.4.8 Fenômeno de ressonância	45
3.4.9 Transdutores piezoelétricos	46
3.5 FLUXOS DE FLUÍDOS	47
4 METODOLOGIA	50
4.1 MATERIAIS	50
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS EXPERIMENTAIS	50
4.2.1 Procedimentos Numéricos Experimentais	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	71

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial do século XIX influenciou o desenvolvimento populacional e, conseqüentemente, o consumo de energia elétrica, provocando carências energéticas e a exploração de fontes de energia não renováveis, como os combustíveis fósseis. Dessa forma, a degradação ambiental teve um aumento exponencial, pois a energia se tornou essencial para quaisquer atividades humanas.

Um dos resultados desse período é o desequilíbrio ambiental gerado pelo grande consumo de energia pela humanidade, com a utilização de combustíveis como o carvão, o petróleo e o gás natural, mais do que esses poderiam ser produzidas pela natureza. Essas fontes energéticas são as mais exploradas em todo o mundo, porém são consideradas finitas e emitem poluentes tóxicos, geram gases de efeito estufa e colocam em risco o suprimento em longo prazo do planeta, prejudicando o meio ambiente e a saúde humana.

Sendo assim, o desenvolvimento sustentável se tornou fundamental, com o intuito de minimizar os elevados custos energéticos, diminuir a utilização de combustíveis fósseis e amenizar os impactos ambientais. Dessa forma, as fontes de energia renováveis passam a ser indispensáveis para a sociedade, contribuindo para a melhoria dos problemas socioambientais do planeta e assegurando a sustentabilidade das gerações futuras.

Nesse sentido, surge a necessidade de desenvolver métodos para o uso correto da energia, que enfatizam a proteção do meio ambiente, como a coleta de energia. Essa técnica consiste no processo de captura de pequenas quantidades de energia, através de fontes alternativas como sol, vento, chuva, vibração e movimento. Além disso, a energia adquirida pode ser utilizada para melhorar a eficiência e desenvolver inovações tecnológicas (DHINGRA et al., 2012; CELULLAR, 2016).

Recentemente, os estudos sobre tecnologias alternativas de coleta de energia através da conversão de vibração mecânica em energia elétrica, conhecida na literatura como “Energy Harvester”, tem aumentado. A técnica consiste na captura e no armazenamento da energia através do meio ambiente em estruturas, utilizando materiais piezoelétricos para a conversão energética, também denominado “Piezoelectric Energy Harvesting” (PALACIOS-FELIX, 2014; ROCHA, 2014).

A geração de energia elétrica a partir de fontes limpas em micro escala se destaca em áreas como a construção civil e também em sistemas mecânicos e eletromecânicos. Sendo assim, esses processos assumem um papel importante de acordo com as configurações geométricas e físicas para maior eficiência e, também, pelo fato de utilizar materiais

piezoelétricos, pois esses possuem a capacidade de gerar eletricidade ao serem deformados (ERTURK; HOFFMANN; INMAN, 2009; ERTURK; INMAN, 2009; PRIYA; INMAN, 2009).

Os elementos que possuem propriedades piezoelétricas são denominados materiais inteligentes e tornam-se polarizados quando sujeitos a uma tensão mecânica. Esse processo é denominado *direto* e foi descoberto pelos irmãos Currie em 1880, sendo encontrados em materiais naturais, como nos cristais de quartzo, titânio de bário e no sal de Rochelle. Contudo, em 1881, Lippman deduziu, a partir da termodinâmica, que o efeito *inverso* também pudesse ocorrer, ou seja, a aplicação de um campo elétrico resultaria em uma deformação mecânica do material (MINETO, 2013).

Pode-se citar alguns trabalhos que estudaram materiais piezoelétricos para coleta de energia e suas aplicações nas ciências e engenharias, como, por exemplo, os materiais sintéticos constituídos por titanato zirconato de chumbo (PZT). Demir e Anutgan (2016) estudaram as diferentes posições de um piezolétrico PZT e diferentes direções do vento para a coleta de energia. Os autores Perlingeiro, Pimenta e Silva (2016) mostraram, detalhadamente, a geração de energia limpa através de materiais piezolétricos, como o PZT.

Dessa forma, o foco principal deste trabalho, consiste no estudo de materiais polímeros piezoelétricos para coleta de energia eólica. Em particular, a pesquisa consiste na coleta de energia elétrica em microestrutura, através de um sistema vibrante com o piezoelétrico, denominado polifluoreto de vinilideno (PVDF-LDT0) da MEAS, induzida pelo fluxo de vento de um ventilador. Considerando, dessa forma, alguns pesquisadores que trabalharam com materiais filmes PVDF, como Thornton (2011) e Karthikeyan, Maniirasan e Bharath (2014).

Além disso, este trabalho, segue similarmente a metodologia desenvolvida pelos autores Sundararajan et al. (2012), através dos estudos realizados para coleta de energia com materiais piezoelétricos flexíveis MFC, fixados em diferentes posições de uma membrana plastificada, para melhor saída de voltagem, a partir da diferença de potencial, com diferentes velocidades de vento

Assim sendo, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo a realização de sínteses dos conhecimentos relativos às tecnologias de geração de energia a partir de piezoelétricos polímeros, cujas vibrações são induzidas pelo fluxo do vento, e o desenvolvimento de uma bancada experimental de pequeno porte para ensaios experimentais. Entretanto, este estudo apresentou limitações em relação à velocidade de vento, pois, foi utilizado um ventilador com duas velocidades de, aproximadamente, 4,9 m/s e 6,2 m/s.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é analisar experimentalmente a tecnologia de geração de energia limpa através de uma plataforma de pequeno porte, utilizando materiais piezoelétricos poliméricos, cujas vibrações são induzidas pelo fluxo do vento.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender os conhecimentos relativos às tecnologias de geração de energia através de materiais piezoelétricos utilizando o vento;
- Estudar o desenvolvimento do piezoelétrico polifluoreto de vinilideno (PVDF) – LDT0 da MEAS;
- Analisar os efeitos das diferentes dimensões geométricas de folhas laminadas de PVC, fixados no extremo livre do piezoelétrico, na geração de energia;
- Obter experimentalmente as saídas de voltagens para duas velocidades do vento, produzidas pelo ventilador de mesa de seis pás;
- Calcular a potência gerada para cada configuração geométrica da folha laminada de PVC.

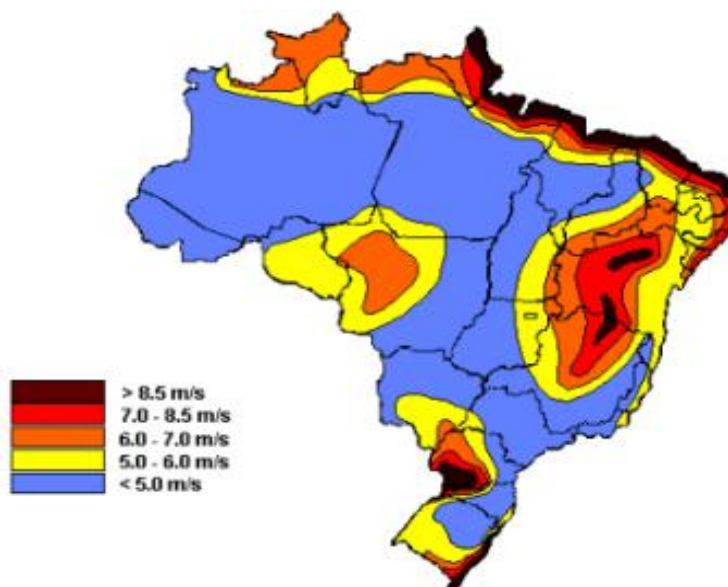
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ENERGIA EÓLICA

Na literatura encontram-se definições sobre energia eólica em macro e microescala, com a transformação da energia do vento em energia elétrica sendo feita pela utilização de aerogeradores de grande e pequeno porte, do tipo horizontal e vertical, para produzir eletricidade. A energia eólica, considerada como energia alternativa, renovável e limpa, se desenvolve sem prejudicar o meio ambiente, quando comparada com outras fontes de energia (GAVINO, 2011).

Segundo Tolmasquim (2016), o surgimento do vento ocorre pelo aquecimento diferenciado das superfícies da terra através da energia térmica proveniente do sol. Sendo assim, a origem da energia eólica é a energia solar, pois o aquecimento desigual das regiões e, principalmente, da atmosfera, produz gradientes de pressões e, conseqüentemente, variações de massas de ar. Além disso, os mecanismos da rotação da Terra, devido ao efeito de Coriolis – continentalidade, maritimidade, latitude e altitude, interferem na formação dos ventos. A figura 1, mostra as velocidades do vento em todo o Brasil – pode-se observar que o estado do Rio Grande do Sul apresentou uma grande variedade de velocidade do vento.

Figura 1 - Mapa das potencialidades eólicas do Brasil



Fonte: Dados da CBEE, 2013.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANNEE, 2005), o aproveitamento da energia eólica advém da energia cinética, por meio da conversão da energia de translação em energia de rotação, com o auxílio de aerogeradores. As tentativas iniciais surgiram no final do século XIX, mas somente na década de 1970 manifestou-se o interesse em desenvolver e aplicar os equipamentos em escalas comerciais, devido a crise internacional do petróleo.

3.1.1 Modelos Energéticos Eólicos

De acordo com Almeida (2013), a energia eólica é considerada uma fonte de energia alternativa e pode ser gerada através de aerogeradores. Entretanto, nas últimas décadas, tem-se aumentado os estudos, as publicações e os protótipos para a captação não convencional de energia eólica, como as tecnologias de papagaios ou paraquedas turbinados, vibro-wind, flower power e windstalk.

Segundo Gavino (2011), existem distintos sistemas eólicos, como os isolados, híbridos e interligados à rede. Os sistemas isolados são importante para regiões de difícil acesso, nas quais a necessidade de um sistema de distribuição e armazenamento de energia. Os sistemas híbridos são interligados com outras fontes de energia para atender um maior número de usuários – esses sistemas utilizam aerogeradores e não precisam armazenar a energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica.

Segundo Tolmasquim (2016), os aerogeradores são compostos por rotores, eixos geradores e vários elementos secundários. O rotor é formado pelas pás e os cubos, responsáveis por capturar a energia do vento, o eixo é o encarregado de transferir a energia captada para o gerador e o gerador possui a função de converter a energia mecânica em elétrica.

De acordo com Almeida (2013), os aerogeradores acionam alternadores, que transformam a energia do vento em energia elétrica, podendo ser de corrente alternada ou contínua. Rossi e Oliveira (2007) classificam os tipos de aerogeradores quanto aos eixos, ou seja, os de eixo vertical e os de eixo horizontal. Sendo assim, a maioria das turbinas eólicas utilizadas são de eixo horizontal, devido à combinação entre a eficiência aerodinâmica, custo, velocidade de rotação, peso, estabilidade e ruído.

Além disso, segundo Tolmansquin (2016), os aerogeradores de eixos horizontais possuem três pás que rodam em torno de um eixo horizontal alinhado com a direção do vento.

Porém, a captação dos aerogeradores verticais tem origem nas mudanças na direção do vento, pois o eixo de rotação é perpendicular à direção do vento, operando com ventos de qualquer direção, podendo assim, ser movidos por força de sustentação e de arrasto. A figura 2, a seguir, apresenta os modelos das turbinas de acordo com o eixo.

Figura 2 - Turbinas eólicas de eixo vertical (a) e de eixo horizontal (b)



(a)

(b)

Fonte: WENZEL, 2007.

Almeida (2013), também disserta sobre os paraquedas turbinados, cuja tecnologia possui estruturas semelhantes aos desportos aquáticos. O funcionamento do sistema ocorre de acordo com o vento, pois este movimenta os paraquedas, que acionam os geradores móveis, possibilitando a geração de energia elétrica em circuito fechado.

A Vibro-wind, segundo Moon, coordenador do grupo de pesquisa da Universidade de Cornell (2010), significa “Vibro-vento”, pois converte vibrações da energia eólica em eletricidade através das estruturas elásticas. Esse método é semelhante ao sistema massa-mola-amortecedor, sendo de baixo custo e alta eficiência.

O modelo dessa tecnologia é constituído por conjuntos de vigas com uma massa na extremidade livre, que, quando expostas ao vento, vibram transversalmente. A geração de energia elétrica ocorre por transdutores piezoelétricos, pois convertem a energia mecânica em cinética através da liberação de elétrons (MOON, 2010). A figura 3 apresenta um modelo dessa tecnologia.

Figura 3 - Modelo da tecnologia Vibro-wind



Fonte: WINDTECH, 2010.

A tecnologia flower power, segundo Ridden (2011), é inspirada nas turbinas de eixos verticais, chamadas Eddys, através do design holandês. O mecanismo é baseado em turbinas de eixo vertical acopladas em uma estrutura em forma de árvore, constituída por um tubo de aço com ramos na parte superior. No entanto, essas são menos eficientes que as turbinas convencionais, por serem menores e mais leves, mas podem ser desenvolvidas para zonas urbanas, como residências, parques, ruas ou estradas. A figura 4, a seguir, ilustra esse modelo.

Figura 4 - Tecnologia Flower Power - Árvore Eólica



Fonte: PORTAL ENERGIA, 2017.

Ademais, segundo Perlingeiro, Pimenta e Silva (2016), a tecnologia windstalk foi criada nos Estados Unidos pela substituição das turbinas eólicas por hastes, denominadas windstalk. Os materiais utilizados são compostos por carbonos e resinas com camadas de fibras piezocerâmicas, atingindo 55 metros de altura e 30 centímetros de largura na base, diminuindo

para 5 centímetros na parte superior, como mostra a figura 5. A geração de energia elétrica ocorre devido à pressão dos materiais piezocerâmicos pelos ventos.

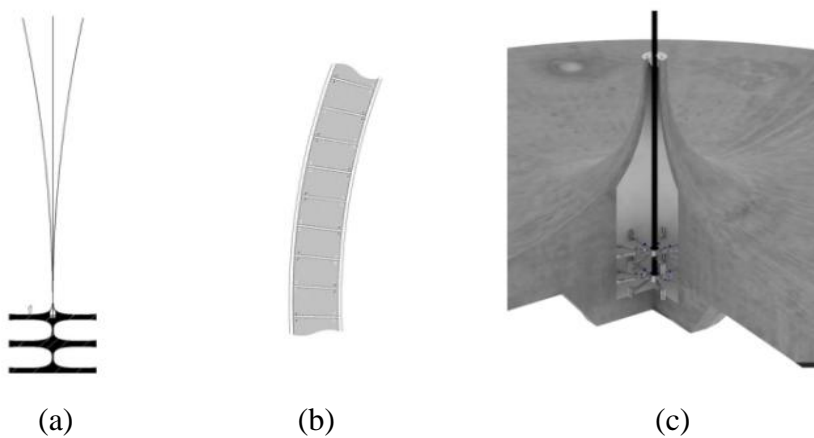
Figura 5 - Modelo da tecnologia Windstalk



Fonte: Perlingeiro, Pimenta e Silva, 2016.

Os eletrodos, de acordo com Atelier DNA (2017), estão localizados entre os materiais cerâmicos, conectados um aos outros por cabos da parte inferior à parte superior de cada haste. Na base de concreto de cada haste está armazenado um gerador de torque para converter a energia cinética do vento em energia elétrica e, devido ao fato de a fonte de geração não ser constante, se fazem necessários bateria e capacitor e uma maneira de armazenar a energia gerada. A figura 6, a seguir, apresenta as seções utilizadas na tecnologia.

Figura 6 - Secções: através da base da haste (a), da haste (b) do gerador de torque (c)



Fonte: ATELIER DNA, 2017.

3.2 PIEZOELETRECIDADE

De acordo com Rangel (2014), a piezoeletrecidade resulta da união da palavra grega “piezein”, que significa apertar ou pressionar, com eletricidade. Devido à deformação, ocorre o surgimento de cargas positivas em um dos lados dos cristais não condutores e cargas negativas nos lados opostos. Além disso, a tensão elétrica é considerada irreversível, pois ocorre a deformação em conformidade nos terminais do material.

Segundo Coelho (2015), a descoberta da piezoeletrecidade ocorreu no final do século XIX, quando os irmãos Pierre e Jacques Curie observaram que alguns cristais naturais, como quartzo, turmalina, calcita e piritita, apresentavam cargas positivas e negativas na sua superfície devido à compressão. Sendo assim, a estrutura do material produz uma tensão elétrica proporcional à pressão mecânica submetida.

Além disso, Mineto (2013) explica que os irmãos Curie não analisaram que o efeito contrário também pudesse ocorrer nesses materiais quando uma tensão elétrica deriva da deformação mecânica do cristal. Sendo assim, o efeito inverso foi deduzido matematicamente por Gabriel Lippmann em 1881, a partir dos princípios fundamentais da termodinâmica, porém os irmãos Curie concluíram experimentalmente essa descoberta.

Segundo Perlingeiro, Pimenta e Silva (2016), estudos foram sendo executados nas décadas seguintes, devido à curiosidade do efeito da piezoeletrecidade, explorando e definindo estruturas cristalinas com propriedades para geração de correntes elétricas. No ano de 1910, foi publicado o livro “Woldemar Voigt Lehrbuch der Kristallphysik”, descrevendo vinte diferentes classes de cristais naturais capazes de gerar correntes quando submetidos a pressões mecânicas, além da determinação das constantes piezoelétricas, a partir das análises tensoriais.

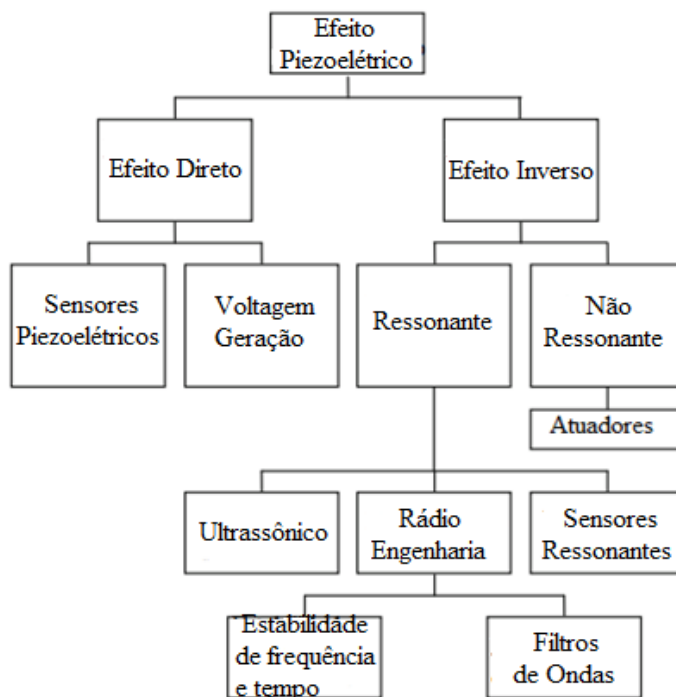
Os materiais piezoelétricos, de acordo com Galhardi (2010), podem se originar de um campo elétrico a altas temperaturas, através da polarização dos materiais. Essa polarização ocorre pelo alinhamento parcial dos dipolos elétricos das propriedades microscópicas e macroscópicas, favorecendo o acoplamento eletromecânico do cristal. O resultado do acoplamento pode ser a deformação em resposta ao campo elétrico externo (efeito inverso), com capacidade de atuação, ou as forças mecânicas externas ao material influenciam na rotação do dipolos (efeito direto), surgindo cargas elétricas.

Além disso, segundo Moheimani e Fleming (2006 apud COELHO, 2015), outro fator determinante para a caracterização dos materiais piezoelétricos é a temperatura de Curie. A estrutura cristalina de materiais cerâmicos piezoelétricos, por exemplo, exhibe simetria cúbica simples quando acima da temperatura de Curie, com a combinação das cargas positivas e

negativas sem dipolos elétricos. Entretanto, quando a temperatura está abaixo de Curie, a simetria se apresenta tetragonal, com cargas positivas e negativas irregulares e dipolos elétricos internos.

De acordo com Tichý et al. (2010), todos os materiais piezoelétricos possuem constantes piezoelétricas (d) e dielétricas (ϵ) e a piezoeletrecidade, em cristais sem centros de simetria, é a relação linear entre sistemas mecânicos e elétricos. Ademais, o efeito da piezoeletrecidade direto é derivado de quando a polarização ocorre devido a deformação e o efeito inverso, é ao contrário, quando se aplica um campo elétrico externo e o material se deforma. A figura 7 exhibe as diferenças das aplicações dos efeitos diretos e inversos.

Figura 7 - Aplicações técnicas dos efeitos da piezoeletrecidade



Fonte: TICHÝ et al., 2010.

Conforme Erturk, Hoffmann e Inman (2009), é necessário entender os efeitos que ocorrem nos materiais, através de pesquisas sobre o desenvolvimento dos materiais, pois os fenômenos diretos e inversos coexistem normalmente em um mesmo material piezoelétrico. Dessa forma, termodinamicamente, é incoerente ignorar o efeito inverso, mesmo que objetivo seja a captura de energia através do efeito direto.

Os materiais inteligentes, segundo Cellular (2016), podem ser identificados através dos modelos de acoplamentos e suas utilizações específicas, como as “[...] ligas com memória de

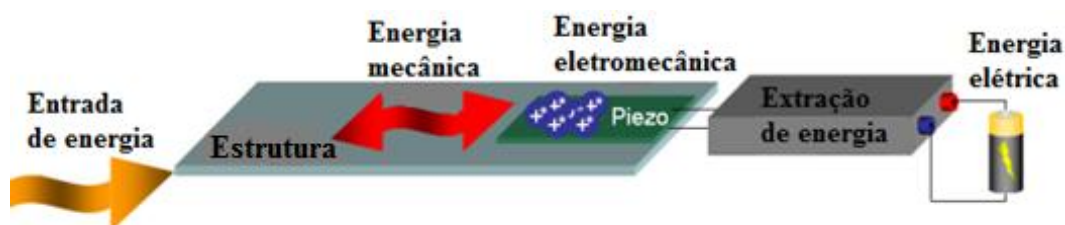
forma, materiais piezelétricos, materiais magnetostrictivos e os fluidos eletro e magneto-reológicos [...]”. Os tipos de materiais adequados para aplicações dependem da densidade de energia de atuação e da frequência de atuação do material. Existem inúmeros modelos de materiais, mas os mais eficientes são os cristais de quartzo e os piezocerâmicos, como o titanato zirconato de chumbo (PZT), pois convertem 80% da energia mecânica em elétrica.

Entretando, novamente, Tichý et al. (2010) explicam que as propriedades principais dos materiais em aplicações sensoriais de força ou pressão são baixo custo do processo, coeficientes piezoelétricos elevados, resistência mecânica e rigidez, resistividade de isolamento elevada, estabilidade no tempo e ligação linear entre a força mecânica e a polarização elétrica. Visto que a finalidade do processo é reduzir o consumo de energia, miniaturizar e automatizar o desempenho dos modelos.

3.2.1 Modelos Energéticos com Materiais Piezoelétricos

Existem inúmeros estudos relacionados à captura de energia a partir de materiais piezoelétrico, como o esquema de Guyomar e Lallart (2011), em que a energia mecânica do ambiente é transformada em energia mecânica da estrutura. Sendo assim, essa energia é convertida em energia elétrica pelos materiais piezoelétricos e, posteriormente, transferida para a fase de armazenamento. Portanto, podem ser evidenciados, pela figura 8, os três processos básicos, ou seja, a conversão da energia de entrada (vibração) em energia mecânica (deformação), a conversão eletromecânica usando material piezoelétrico e a transferência em energia elétrica.

Figura 8 - Esquema do processo de captura de energia através de vibrações

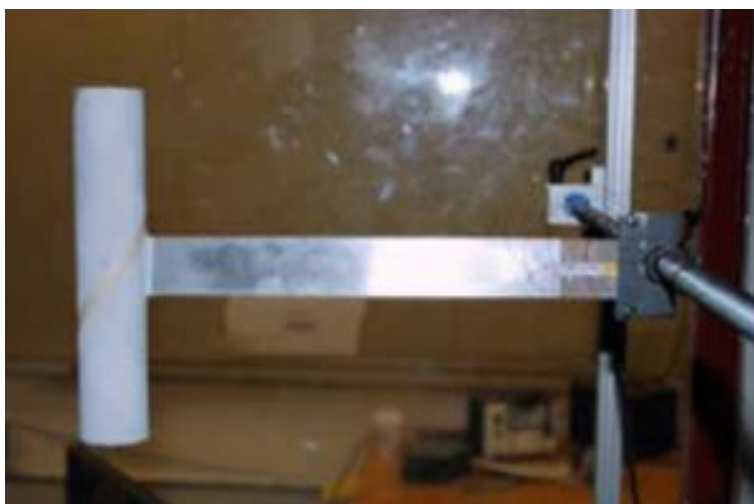


Fonte: GUYOMAR; LALLART, 2011.

Segundo Akaydın, Elvin e Andreopoulos (2013), a obtenção da energia cinética através da vibração pode ser na forma de fluxos de fluidos, como do vento, de correntes oceânicas, em dutos de ventilação ou em tubos de água. Sendo assim, a energia cinética é útil quando

convertida em energia de deformação oscilatória nas estruturas piezoelétricas, denominada conversão aeroelástica. Dessa forma, os autores estudaram, no ano de 2012, materiais conectados na extremidade livre de um piezoelétrico, causando o vórtice através de túnel de vento, como pode ser evidenciado pela figura 9.

Figura 9 - Modelo de coleta de energia através de túnel de vento

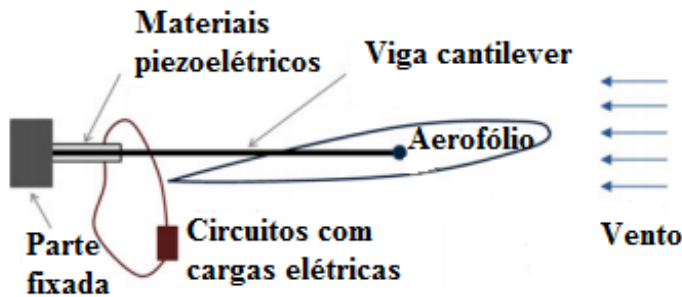


Fonte: AKAYDIN; ELVIN; ANDREOPOULOS, 2012.

Akaydin, Elvin e Andreopoulos (2013) estudaram diferentes geometrias de materiais, como na forma de D e de I, para efetuar a comparação com o modelo apresentado na figura 9, na forma de O. Sendo assim, os testes de túnel de vento mostraram que tanto o modelo D quanto o I foram eficientes, aumentando, significativamente, a coleta da potência, devido ao fenômeno de ressonância.

De Marqui e Erturk (2013) estudaram modelos de aerofólios para coleta de energia elétrica, como o esquema de uma seção eletroaeroelástica apresentado na figura 10, para coleta de energia através de materiais piezoelétricos, a partir da excitação causada pelo fluxo de vento. O modelo é caracterizado por piezoelétricos acoplados nas vigas em balanço, denominadas cantilever, em que se produzem saídas de tensões oscilatórias, devido às vibrações causadas pelo vento. Sendo assim, a tensão causada pelos eletrodos é conectada a uma carga resistiva para avaliar a saída de energia elétrica.

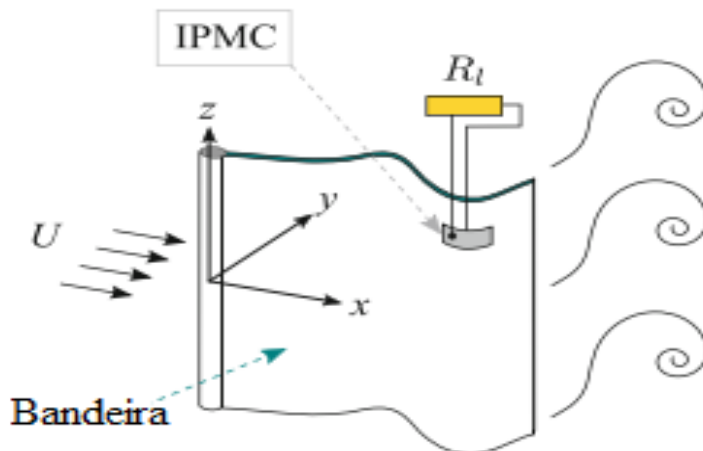
Figura 10 - Esquema eletroaeroelástico com acoplamento piezoelétrico



Fonte: DE MARQUI E ERTURK, 2013.

Giacomello e Porfiri (2011), estudaram um modelo experimental para coleta de energia subaquática através de bandeiras pesadas e flexíveis compostas de polímeros iônicos metálicos (IPMC). A figura 11 apresenta o projeto do estudo, considerando um fluxo bidimensional de velocidade U e de densidade sobre uma placa elástica ao longo da direção do eixo x , imersa em um túnel de água.

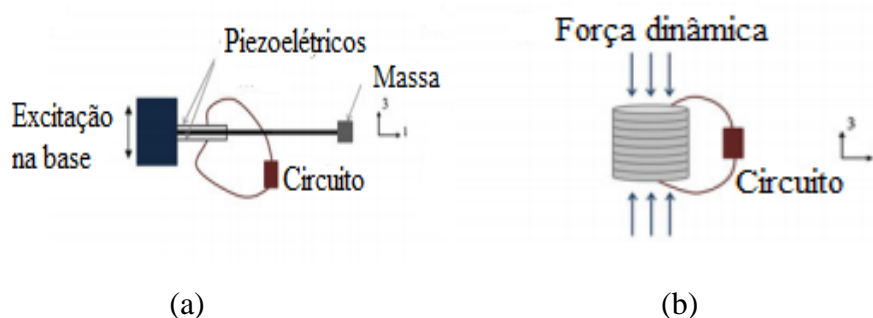
Figura 11 - Modelo experimental de bandeira em um fluxo de água uniforme com velocidade U , anexada, mecanicamente, com IPMC



Fonte: GIACOMELLO; PORFIRI, 2011.

Além disso, Elvin e Erturk (2013) demonstram estudos relacionados à transdução piezoelétrica através de configurações típicas de dispositivos para coleta de energia piezoelétrica, como a viga cantilever bimorf sob excitação na base, de acordo com o modo 31 e as pilhas piezoelétricas contínuas por camadas piezoelétricas de grandes espessuras, de acordo com os dispositivos piezoelétricos operacionais do modo 33, como pode ser observado pela figura 12(a) e figura 12(b).

Figura 12 - Configurações para coletas de energia piezoelétrica: excitação na base cantilever de bimorf piezoelétrico (a) e pilha piezoelétrica de camadas múltiplas (b)



Fonte: ELVIN; ERTURK, 2013.

Contudo, os mesmo autores apresentam experimentos através da indução eletromagnética, transdução eletrostática e dos polímeros eletroativos. No primeiro caso, explorando a lei de Faraday, ocorre a geração de energia pelo movimento de condutos (bobinas) e campos magnéticos (ímãs) acoplados em cantilever. Já no segundo, é necessária uma tensão de corrente contínua (CC) para gerar energia capacitiva através das vibrações mecânicas ambientais. Por fim, no terceiro estudo são utilizados compostos iônicos de polímero-metal (IPMCs) revestidos por eletrodos condutores de acordo com a flexão dinâmica de um cantilever em resposta à excitação de base.

Os piezoelétricos polifluoretos de vinilideno (PVDFs), segundo Lopes, Martins e Lanceros-Mendez (2014), tem sido aplicados na área energética, para geração e armazenamento de energia, e em sensores/atuadores. No caso dos sensores autoalimentados, a aplicação do PVDF ocorre devido à conversão eletromecânica, através de compósitos e microestruturas desenvolvidas, associado ao menor consumo energético, e a micro e nanogeração dos dispositivos. Além de possuir características como flexibilidade, estabilidade, baixo custo e facilidade de processamento.

Além disso, nos últimos anos, tem-se investido em estudos para aplicação do PVDF em membranas/eletrolitos para separadores em baterias, de acordo com a constante dielétrica e condutividade iônica controlável. Sendo assim, esse mecanismo é importante no desenvolvimento de baterias mais seguras, com maior densidade energética e flexibilidade, como pode ser observado na figura 13 (LOPES, MARTINS E LANCEROS-MENDEZ, 2014).

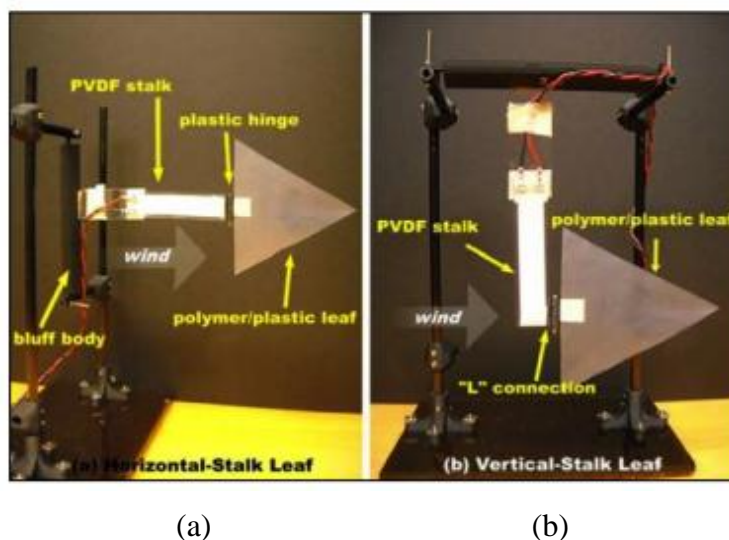
Figura 13 - Modelo de PVDF aplicado para separador em bateria



Fonte: LOPES; MARTINS; LANCEROS-MENDEZ, 2014.

Li e Lipson (2009) estudaram o conceito de árvore artificial através de duas configuração de folhas com PVDFs em fluxo suave paralelo, sendo uma denominada haste horizontal e a outra haste vertical, como pode ser observado na figura 14. Sendo assim, os autores concluíram que o modelo vertical produzia maior potência em comparação com o modelo horizontal. Além disso, Li, Yuan e Lipson (2011) estudaram diferentes modelos de geometrias de folhas, comprovando que o modelo triangular obteve maior eficiência.

Figura 14 - Modelo geométrico triangular, através da configuração horizontal (a) e vertical(b)



Fonte: LI; LIPSON, 2009.

Abdelkefil et al. (2011) estudaram um modelo cantilever com o piezoelétrico submetido a vibrações de dobramento e torção, acopladas em massas assimétricas na ponta do modelo,

deslocado através da excitação de base. Sendo assim, Deivasigamani et al. (2014) combinaram o modelo de Li e Lipson (2009) e Abdelkefil et al. (2011), concluindo que o efeito de dobramento e torção resultava nas maiores saídas de potência, porém quando o modelo apresentava batimentos caóticos, os resultados eram menos eficientes.

3.2.2 Propriedades Piezoelétricas

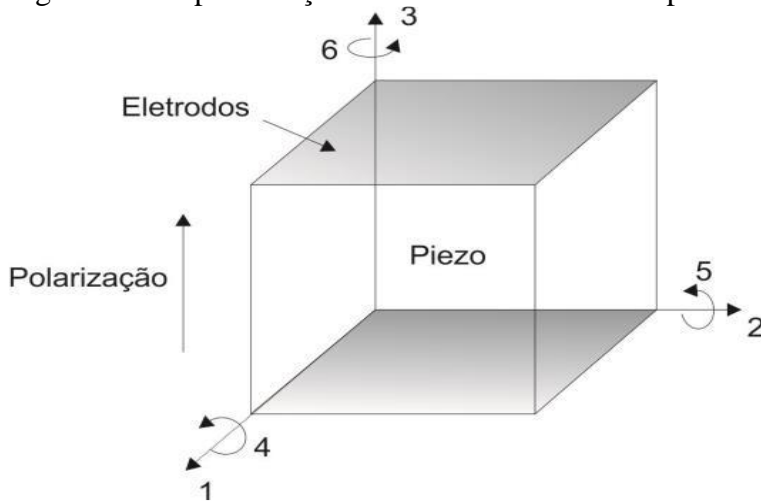
Segundo Rocha (2014), a piezoeletrecidade direta é determinada pela conversão da energia mecânica em elétrica, como em sensores, e a piezoeletrecidade inversa é definida pela conversão de energia elétrica em mecânica, como em atuadores e transdutores. Entretanto, como já apresentado anteriormente, um material é composto por um sistema piezoelétrico, através de dois métodos físicos acoplados, o mecânico e o elétrico. Sendo assim, de acordo com Erturk e Inman (2011), esse efeito é traduzido a partir de duas equações simplificadas (Eq. 1), a seguir.

$$\begin{aligned} D &= d\sigma + \kappa E \\ \varepsilon &= s\sigma + dE \end{aligned} \quad (\text{Eq. 1})$$

Conforme a equação (3.1), a primeira linha descreve o efeito direto e a segunda o efeito inverso, onde D (N/m) é o deslocamento elétrico e E (V/m) é o campo elétrico. A tensão mecânica é dada por σ (N/m²), a deformação é dada por ε (F/m), as propriedades elásticas s (inverso da rigidez) e o coeficiente piezoelétrico e de permissividade é dado por d e κ (m/V) (ERTURK; INMAN, 2011).

Segundo Perlingeiro, Pimenta e Silva (2016), os materiais piezoelétricos são isotrópicos, ou seja, as propriedades físicas são dependentes da direção. Sendo assim, a combinação da direção positiva de polarização é geralmente definida para coincidir com a direção de z (eixo 3), como apresentado na figura 15, já as direções de x e y (eixos 1 e 2, respectivamente) são aleatórios e as forças de cisalhamentos são caracterizadas por 4, 5 e 6. Essas direções são determinadas durante a fabricação dos materiais.

Figura 15 - Representações dos eixos em materiais piezoelétricos



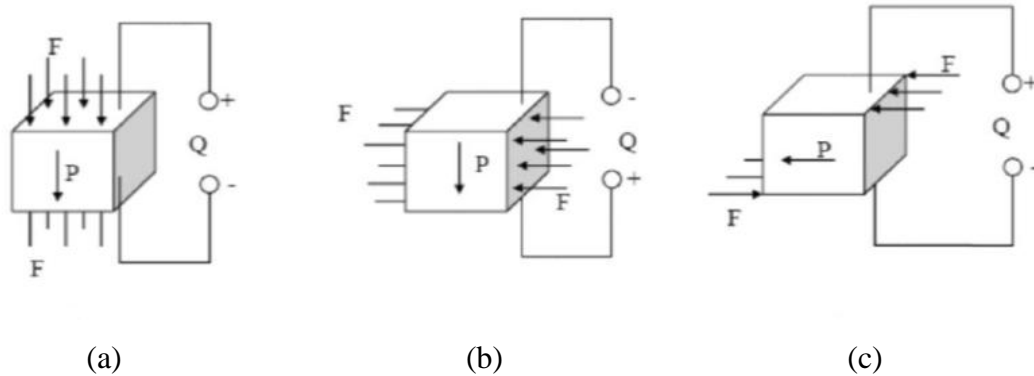
Fonte: PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016.

3.2.3 Coeficientes Piezoelétricos

De acordo com Rangel (2014), além dos tipos, formatos e dimensões dos materiais piezoelétricos, o modo de acoplamento também é determinante para a melhor configuração e eficiência na coleta de energia. Sendo assim, segundo Ikeda (1990), existem os coeficientes de acoplamento “d”, denominados constantes de deformações, e os coeficientes piezoelétricos “g”, denominados constantes de pontenciais. Os coeficientes são responsáveis pela correlação da tensão elétrica com a tensão mecânica e as constantes dos campos elétricos, através da tensão mecânica, respectivamente.

Ademais, segundo Ikeda (1990), os coeficientes d_{ij} são expressos em $[(C/m^2)/(N/m^2)]$, porém se a força mecânica aplicada dissemina por toda a área dos elétrons, as unidades de áreas se anulam, restando apenas a unidade de Coloumb (C) por Newton (N) e o coeficiente g_{ij} é expresso em $[(V/m)/(N/m^2)]$. As variáveis ij correspondem ao sentido da polarização através da força aplicada, como mostra a figura 16.

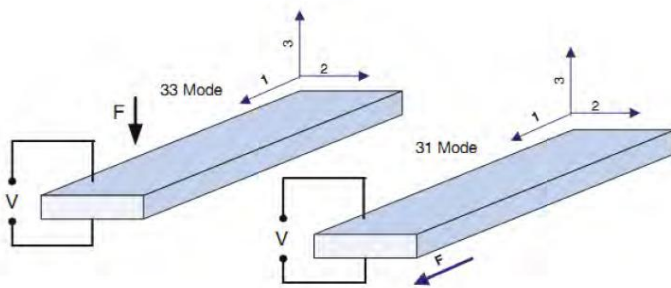
Figura 16 - Respostas das variáveis: $ij = 33$ (a), devido a tensão e a força aplicada no mesmo eixo de polarização; $ij = 31$ (b), tensão no eixo de polarização e força no sentido perpendicular; $ij = 15$ (c), devido a tensão aplicada no sentido perpendicular ao eixo e a força de torção.



Fonte: IKEDA, 1990.

Rangel (2014) disserta sobre dois meios distintos de coeficientes de acoplamento, o modo 31, em que a força é aplicada na direção perpendicular à polarização, com os dispositivos acoplados em vigas em balanço, e o modo 33, em que a força é aplicada na direção da polarização. A figura 17, a seguir, ilustra os modos de acoplamentos.

Figura 17 - Modos de operação dos dispositivos piezoelétricos: modo 33 e 31



Fonte: KIM; TADESSE; PRIYA, 2009.

3.2.4 Coeficiente eletromecânico

De acordo com Ikeda (1990), o coeficiente eletromecânico “ k ” representa a conversão da energia através de materiais piezoelétricos, da forma mecânica para a forma elétrica ou vice-versa. Os subíndices são similares aos coeficientes piezoelétricos, pois indicam a direção relativa das quantidades elétricas e mecânicas. A energia convertida, expressa pela equação 2, está relacionada com a energia mecânica armazenada pela energia elétrica fornecida.

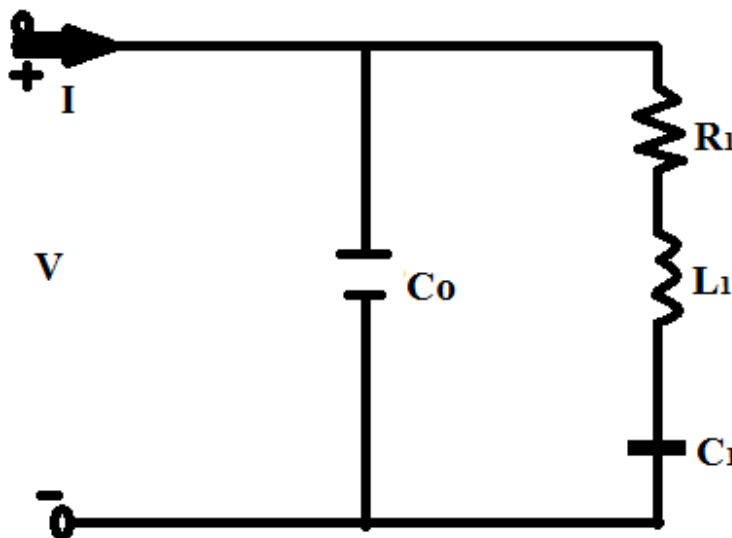
$$k_{ij} = \sqrt{\frac{\text{energia mecânica armazenada}}{\text{energia elétrica fornecida}}} \quad (\text{Eq. 2})$$

3.2.5 Circuito equivalente com piezoelétricos

De acordo com Lima (2013), os circuitos tem a finalidade de amplificar as voltagens emitidas pelos materiais piezoelétricos, após as deformações mecânicas, a níveis apropriados para análises. Dessa forma, os circuitos são constituídos por fontes de tensões controladas pelo deslocamento e por uma impedância capacitiva em série (C), para não diminuir a geração de voltagens, pois a impedância de entrada deve ser elevada.

Segundo Emeterio et al. (1988), o comportamento piezoelétrico quando submetido a tensões mecânicas, é representado por um circuito RLC de acordo com dois modelos em paralelo. O primeiro modelo é formado por um capacitor C_0 e o segundo por uma resistência R_1 , indutor L_1 e um capacitor em série C_1 . A ressonância ocorre no circuito RLC em série, juntamente com uma determinada frequência, porém a impedância é muito baixa na frequência de ressonância (f_r), já a que ocorre na frequência de ressonância paralela, entre os dois modelos, possui a impedância muito elevada (f_a). A figura 18 ilustra o circuito equivalente.

Figura 18 - Circuito equivalente simplificado para piezoelétricos



Fonte: EMETERIO et al., 1988.

De acordo com Almeida (2013), existem justificativas caso os valores de frequências sejam inferiores a f_r e superiores a f_a , pois o material pode assumir um comportamento capacitivo. Ademais, para valores entre f_r e f_a , o material exibe um comportamento indutivo.

As frequências podem ser determinadas pelas equações 3 e 4, apresentadas por Castro, H.F. (2006 apud ALMEIDA, 2013).

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_1 C_0 C_1}} \quad (\text{Eq. 3})$$

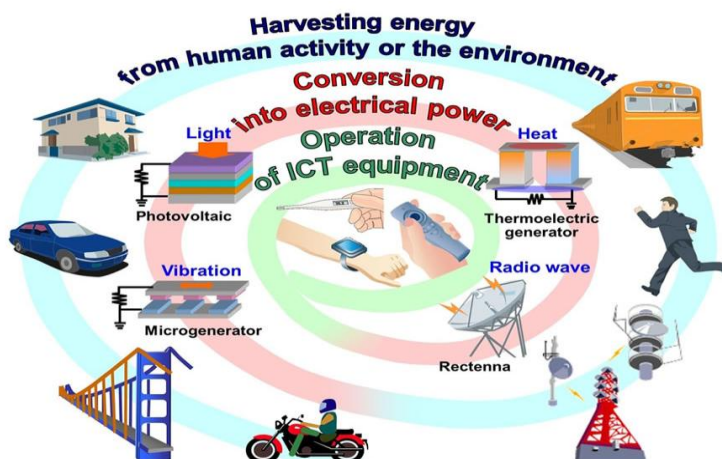
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad (\text{Eq. 4})$$

3.3 COLETA DE ENERGIA DO MEIO AMBIENTE (ENERGY HARVESTER)

Segundo Galhardi (2010), o desenvolvimento das tecnologias dos últimos anos e os avanços da microeletrônica influenciaram pesquisas sobre fontes alternativas de energia limpa em diversas áreas, como na engenharia, na qual buscam-se modelos de mecanismos com autoalimentação. Uma possibilidade é a captação de energia através do meio ambiente, como a “Energy Harvester”, denominada coleta de energia, que transforma vibrações mecânicas em energia elétrica.

Rocha (2012) acrescenta que a técnica de coleta e armazenamento de energia ocorre a partir de fontes externas nas formas de calor, luz, vibrações e ondas de rádio, com a utilização de materiais piezoelétricos. Sendo assim, é uma fonte alternativa infinita e sem custo, capaz de substituir as baterias e os cabos de alimentação. A figura 19 demonstra exemplos de fontes e processos de captura de energia.

Figura 19 - Tecnologia para Colheita de Energia do ambiente



Além disso, de acordo com Kong et al. (2014), a tecnologia é desenvolvida em macro e micro escala, sendo eficazes na coleta de energia, devido às técnicas com disposição de materiais finos e espessos piezoelétricos. O processo é oriundo de fontes de energia mecânica, através de estruturas civis, trilhos ferroviários, tráfego de veículos em estradas, ondas oceânicas e fluxos de seres humanos.

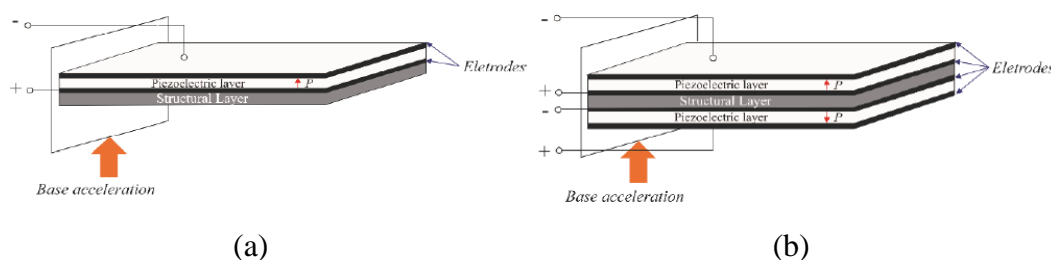
Existem inúmeras fontes de energia presentes no ambiente, mas, segundo Cottone et al. (2011), a energia cinética através de vibrações se encontra mais disponível. A captação da energia ocorre através das deformações de estruturas em que o material se encontra acoplado, convertendo em energia elétrica a partir de mecanismos, como o da piezoeletrecidade, de eletromagnetismo e eletrostático, porém o que apresenta maior rendimento é o método piezoelétrico.

Sendo assim, Cottone (2014) apresenta as vantagens e desvantagens sobre os métodos de conversão de energia cinética em elétrica, como da piezoeletrecidade, que é mais adaptável em microescalas e possui alta tensão de saída, entretanto é de alto custo e pode ocorrer o efeito de fadiga. Já o eletromagnético é utilizado para baixas frequências e não são necessárias fontes externas de tensão, porém é ineficiente em escalas microeletromecânicas (MEMS). Por fim, o eletrostático tem boa tensão de saída, eficiente para MEMS e com longa duração, mas possui baixa potência em microescala.

De acordo com Galhardi (2010), todas as estruturas apresentam sua própria frequência natural e as vibrações são as formas mais eficientes de fornecer energia a um sistema através da deformação de materiais piezoelétricos, podendo ser aproveitadas por mecanismos eletrônicos, a partir do sistema de “Power Harvesting”. Ademais, de acordo com Erturk, Hoffmann e Inman (2009), a maior potência de captação de energia ocorre quando a estrutura vibrar em sua frequência de ressonância, ou seja, na frequência natural.

Segundo Rocha (2014), a estrutura de maior utilização para a conversão da energia cinética em elétrica é a viga em balanço, também conhecida como “cantilever”. O modelo de conversão da viga possui uma ou duas superfícies cobertas por materiais piezoelétricos planejadas para flexionar e deformar através das vibrações do ambiente, gerando energia. O modelo de viga com duas superfícies de piezoelétricos acoplados são denominados bimorfs, sendo uma das configurações mais estudadas na literatura, e o modelo com uma camada piezoelétrica é denominada unimorf. A figura 20 apresenta a diferença entre os modelos.

Figura 20 - Modelos de geradores piezolétricos (a) unimorf e (b) bimorf



Fonte: PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016.

Rangel (2014) disserta sobre as vantagens dos pesquisadores em empregar os modelos baseados em vigas com materiais piezoelétricos, como a energia convertida está relacionada à deformação ocasionada na viga, a frequência de ressonância ser moderadamente baixa, a deformação ser parcialmente alta, para uma certa força aplicada, e o acessível processo de fabricação de materiais e dispositivos em dimensões reduzidas.

Triplett e Quinn (2009) explicam que existem inúmeros mecanismos eletromecânicos para a coleta de energia piezoelétrica, porém a preponderância do processo ocorre em modelos piezoelétricos de captura não lineares. Segundo Iliuk (2016), a vantagem desse modelo de captura de energia é a capacidade de conversão de energia sobre uma grande faixa de frequência através das vibrações.

Na atualidade, de acordo com Rangel (2014), diversos estudos vem sendo propostos na literatura, compreendendo as diferentes formas e configurações das metodologias de captação de energia, variedades de dispositivos de captura piezoelétrica e formas de análises das eficiências. Além disso, segundo Rocha (2012), as aplicações dessas metodologias podem compreender potências maiores de saída e construções em locais distantes para servir como estações de energia confiáveis para maiores sistemas.

3.4 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Segundo Rao (2008), a origem da vibração ou oscilação é através da repetição de movimentos em um intervalo de tempo. Dessa forma, um sistema vibratório é composto por um espaço de armazenamento de energia potencial, outro para armazenar a energia cinética e um terceiro espaço de perda sucessiva de energia. Ademais, a vibração de um sistema inclui a transferência alternada de energia potencial para energia cinética ou vice-versa.

O sistema de vibração mecânica é composto pelos graus de liberdade. Sendo assim, Rao (2008) define esse fenômeno como sendo o número mínimo de coordenadas independentes que

definem as posições de todas as partes do sistema em um certo instante. No caso da viga em balanço, o autor define como modelos elásticos contínuos, tendo números infinitos de graus de liberdade para determinar a curva de deflexão elástica, pois a viga é composta por números infinitos de pontos de massas.

As vibrações são classificadas de acordo com importantes características, como (RAO, 2008):

- a) Vibração livre: é o movimento que se mantém, devido a uma perturbação inicial, não persistindo durante o movimento vibratório, pois nenhuma força externa é aplicada no sistema.
- b) Vibração forçada: ocorre quando se aplica uma força variável no tempo, provocada por um meio externo. Se a frequência da força externa aplicada coincidir com a frequência natural do sistema, ocorre o fenômeno de ressonância, causando grandes oscilações.
- c) Vibração amortecida: ocorre quando os efeitos do atrito não são desprezáveis, ou seja, a energia vibratória se dissipa com o transcorrer do tempo;
- d) Vibração não amortecida: se dá quando os efeitos do atrito são desprezáveis, ou seja, a energia vibratória não se dissipa e o movimento permanece imutável com o passar do tempo.
- e) Vibração linear: ocorre no momento em que todos os componentes básicos de um sistema vibratório proporcionam respostas lineares;
- f) Vibração não linear: ocorre quando os componentes do sistema não se comportam linearmente;
- g) Vibração determinística: se dá quando a amplitude de excitação for observada em qualquer instante em um sistema de vibração;
- h) Vibração aleatória: ocorre quando a amplitude de excitação não for prevista em um dado instante.

3.4.1 Elementos das vibrações mecânicas

De acordo com Rao (2008), os elementos elásticos estudados para as vigas comportam-se como molas. Sendo assim, para o caso mecânico, a mola linear possui massa e amortecimento desprezíveis, pois a força aplicada na mola é proporcional à deformação e é apresentada pela equação 5.

$$F = kx \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde o F representa a força da mola, k a rigidez e x a deformação. Ademais, tem-se o trabalho realizado (U) de acordo com a deformação, dado pela equação 6 (RAO, 2008).

$$U = \frac{1}{2} kx^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

De acordo com a equação 3.5, admite-se que comportamento das molas, na maioria das aplicações práticas, são de forma linear, pois as deflexões são pequenas. Sendo assim, é aplicado um processo de linearização, admitindo que a carga de equilíbrio estático F causa uma deflexão de x^* . No entanto, se acrescentar uma força adicionada ΔF , a mola sofre uma deflexão equivalente a Δx , expressa em série de Taylor no entorno da posição de equilíbrio estático, como a equação 7 (RAO, 2008).

$$\begin{aligned} F + \Delta F &= F(x^* + \Delta x) \\ F(x^*) + \frac{dF}{dx}|_{x^*}(\Delta x) + \frac{1}{2!} \frac{d^2F}{dx^2}|_{x^*}(\Delta x)^2 \dots \end{aligned} \quad (\text{Eq. 7})$$

Dessa forma, para valores pequenos de Δx , os valores podem ser expressos pela equação 8 e 9, visto que $F = F(x^*)$ (RAO, 2008).

$$F + \Delta F = F(x^*) + \frac{dF}{dx}|_{x^*}(\Delta x) \quad (\text{Eq. 8})$$

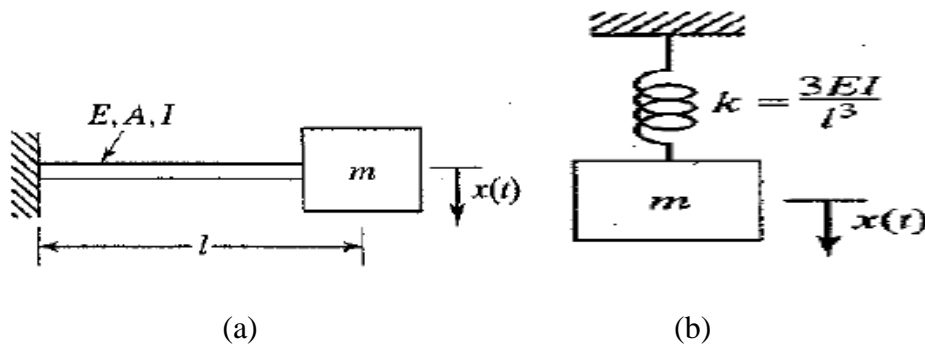
$$\Delta F = k\Delta x \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde k é expresso através da equação 10.

$$k = \frac{dF}{dx}|_{x^*} \quad (\text{Eq. 10})$$

Ademais, Rao (2008) apresenta uma viga em balanço com uma massa m na extremidade livre, como pode ser observado pela figura 21. Sendo assim, de acordo com a resistência dos materiais, a deflexão estática dada na extremidade livre da viga, pois a massa da viga é desprezível em comparação com a massa m , é expressa pela equação 11.

Figura 21 - Modelo de viga em balanço com massa na extremidade livre através do sistema atual (a) e com um grau de liberdade (b)



Fonte: RAO, 2008.

$$k = \frac{W}{\delta_{st}} = \frac{3EI}{l^3} \quad (\text{Eq. 11})$$

3.4.2 Equações de movimento

As equações de movimento, segundo Rao (2008), determinam as respostas de um sistema vibratório, como as oscilações provocadas pelos vórtices através do vento constante. Mucheroni (2003) descreve as forças harmônicas e periódicas, que são preponderantes nos fenômenos causados por vibrações em sistemas físicos. Dessa forma, caso uma $F(t)$ agir sobre um sistema massa-mola viscosamente amortecido, a equação de movimento, de acordo com a lei de Newton, é descrita como Eq. 12 (RAO, 2008).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (\text{Eq. 12})$$

A solução geral do sistema é obtida a partir de $F(t) = 0$, de acordo com Mucheroni (2003), e é composto por uma solução homogênea $x_h(t)$ e uma particular $x_p(t)$, expressa pela equação 13. A solução particular é uma equação diferencial, responsável por representar o movimento em regime permanente, e a solução homogênea é a vibração do sistema, resolvida através de condições iniciais de movimento e de respostas transientes, que resultam da aplicação eventual de forças de acordo com um tempo de duração finito.

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (\text{Eq. 13})$$

3.4.3 Equações de um sistema não amortecido à força harmônica

Rao (2008) considera um sistema não amortecido sujeito a uma força harmônica quando a $F(t) = F_0 \cos \omega t$, exercida sobre uma massa m de um sistema, for expressa através da equação 14.

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (\text{Eq. 14})$$

A solução homogênea e particular é dada através das equações 15 e 16 a seguir (RAO, 2008).

$$x_h(t) = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \text{sen } \omega_n t \quad (\text{Eq. 15})$$

$$x_p(t) = X \cos \omega t \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde ω_n é a frequência natural do sistema, expresso em $\left(\frac{k}{m}\right)^{0.5}$ e X representa a máxima amplitude do sistema, substituída pela equação 17 (RAO, 2008).

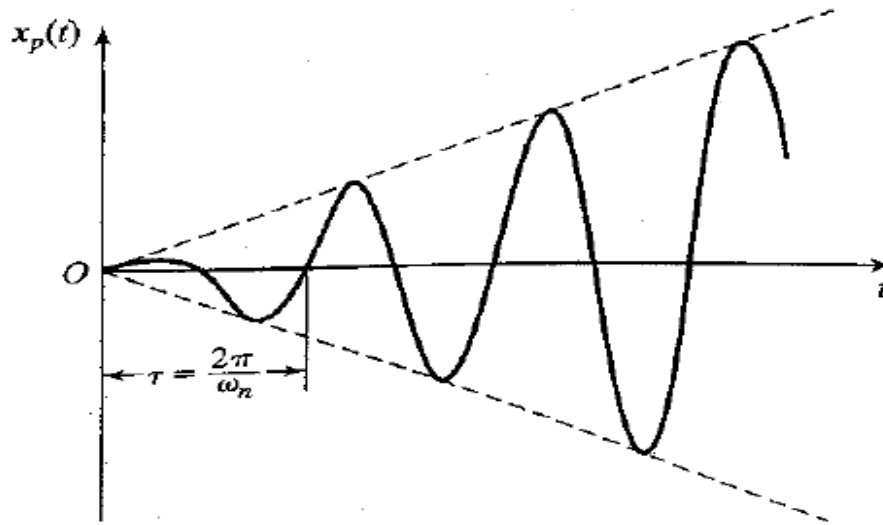
$$X = \frac{F_0}{k - m \omega^2} = \frac{\delta_{st}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde δ_{st} representa a deflexão da massa sob uma F_0 , obtendo a equação geral do sistema, expressa pela equação 18 (RAO, 2008).

$$x(t) = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \text{sen } \omega_n t + \frac{F_0}{k - m \omega^2} \cos \omega t \quad (\text{Eq. 18})$$

Além disso, quando há a relação $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$, a amplitude X se torna infinita, pois a frequência forçada harmônica ω é igual a frequência natural do sistema ω_n , apresentando resultados elevados, devido a ressonância, como mostra a figura 22 (RAO, 2008).

Figura 22 - Fenômeno de ressonância, quando $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$

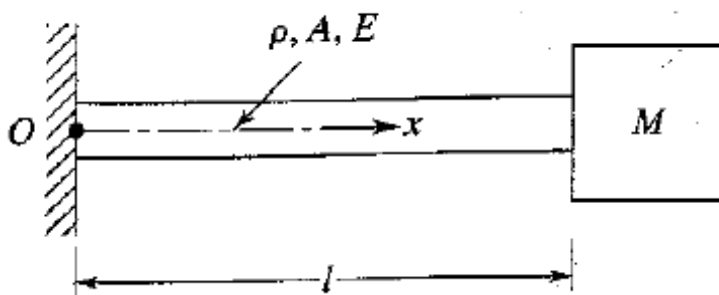


Fonte: RAO, 2008.

3.4.4 Vibrações longitudinais em barras com massas acopladas

A figura 20 exibe um modelo de viga flexível com o acoplamento de uma massa na extremidade livre e outra na extremidade fixa. A vibração livre é dada através da equação 19 (RAO, 2008).

Figura 23 - Viga com massa fixada na extremidade livre

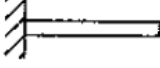


Fonte: RAO, 2008.

$$C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) \quad (\text{Eq. 19})$$

As condições de contorno podem ser expressas de acordo com a tabela 1, na qual é substituída a equação 3.19. Sendo assim, a solução total é expressa pela equação 20, juntamente com as constantes C_n e D_n , através do método de superposição de modos (RAO, 2008).

Tabela 1 – Condições de contorno aplicadas em barras sujeitas a vibrações

Condições das Extremidades Da barra	Condição De contorno	Equação De frequência	Forma modal das amplitudes	Frequências naturais circulares
<p>Fixa-livre</p> 	$u(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$	$\cos \frac{\omega t}{c} = 0$	$U_n(x)$ $= C_n \text{sen} \frac{(2n + 1)\pi x}{2l}$	ω_n $= \frac{(2n + 1)\pi c}{2l}$ $n = 0, 1, 2, \dots$

Fonte: RAO, 2008.

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \text{sen} \frac{(2n + 1)\pi x}{2l} \left[C_n \cos \frac{(2n + 1)\pi c t}{2l} + D_n \text{sen} \frac{(2n + 1)\pi c t}{2l} \right] \quad (\text{Eq. 20})$$

A frequência natural pode ser determinada, através das condições de contorno da extremidade fixa e da extremidade $x = l$, em que a força de tração da barra é expressa pela força de inércia da massa vibratória, de acordo com a equação 21, 22 e 23 (RAO, 2008).

$$\alpha \text{ tg } \alpha = \beta \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\alpha = \frac{\omega l}{c} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$\beta = \frac{AEI}{c^2 M} = \frac{A\rho l}{M} = \frac{m}{M} \quad (\text{Eq. 23})$$

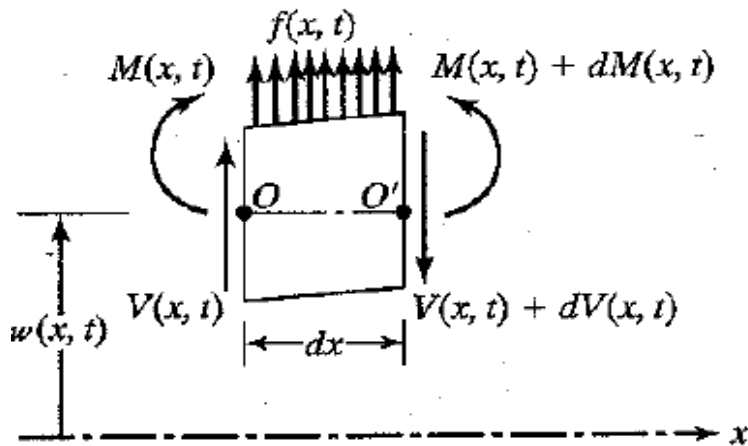
As soluções dessas equações resultam nas frequências naturais do sistema, onde m é a massa da barra. Além disso, a barra é sujeita a uma força axial F_0 na sua extremidade livre, de acordo com a deformação por tração induzida, e tem-se a equação 24 (RAO, 2008).

$$\varepsilon = \frac{F_0}{EA} \quad (\text{Eq. 24})$$

3.4.5 Vibrações verticais em barras com massas acopladas

A equação de movimento é dada através do movimento fletor $M(x, t)$, da força de cisalhamento $V(x, t)$ e da força externa por unidade de comprimento $f(x, t)$, como pode ser observado na figura 24. Sendo assim, a flexão na viga é dada pelo momento fletor e a deflexão, expressa pela equação 25 (RAO, 2008).

Figura 24 - Modelo de flexão em viga



Fonte: RAO, 2008.

$$M(x, t) = EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x, t) \quad (\text{Eq. 25})$$

Onde E é o módulo de Young e $I(x)$ é o momento de inércia da área da seção transversal da viga em relação ao eixo y . Sendo assim, a equação geral para vibrações laterais forçadas em uma viga uniforme é expressa pela equação 26 (RAO, 2008).

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = f(x, t) \quad (\text{Eq. 26})$$

São necessárias condições iniciais e de contorno para resolver as equações diferenciais, pois envolvem uma derivada de segunda ordem em relação ao tempo e de quarta ordem em relação ao eixo x , como as equações 27 a seguir (RAO, 2008).

$$w(x, t = 0) = w_0(x)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}(x, t = 0) = w_0(x) \quad (\text{Eq. 27})$$

3.4.8 Fenômeno de ressonância

De acordo com Zumpano, Ercole e Bueno (2004), a ressonância ocorre quando a frequência da força de excitação externa coincide com a frequência natural do sistema principal. Sendo assim, Rocha (2014) explica que a máxima potência de saída acontece quando a estrutura vibra na sua frequência natural (duas frequências naturais em relação 1:2) para que ocorra a troca de energia, possibilitando o maior ganho na captura de energia pela estrutura. Palacios-Felix (2002) afirma que exemplos desses fenômenos ocorrem em pórticos.

Recentemente, Schonarth e Palacios-Felix (2017) apresentaram o método de conversão de energia através de piezoelétricos acoplados em uma micro estrutura aporticada excitada na base, na forma vertical, e utilizando a ressonância externa e ressonância interna entre os dois modos de vibrar do pórtico.

Halliday e Resnick (2012) explicam as duas frequências angulares características de sistemas que efetuam oscilações forçadas, sendo essas a frequência angular natural (ω), em que ocorre a oscilação livremente depois do sistema sofrer uma perturbação repentina durante um curto período, e a frequência angular (ω_e), ocasionada por forças externas. Dessa forma, a amplitude máxima da velocidade e do deslocamento das oscilações ocorre no fenômeno de ressonância ($\omega_e = \omega$).

Ademais, segundo Palacios-Felix (2002), a ressonância é divididas em internas e externas – a primeira ocorre entre as frequências naturais das estruturas e a segunda consiste na relação da frequência de excitação na base com as frequências naturais. Além disso, entende-se que para a passagem da ressonância interna seja considerada a rotação do motor de corrente contínua e que a ressonância externa esteja próxima à frequência natural, ocorrendo uma transferência de energia entre os modos de vibrações, possibilitando maior coleta de energia pela estrutura.

Segundo Domingos, Wess e Wolf (2013), esse fenômeno implica na transformação elevada da energia de vibração em outros tipos de energias. Entretanto podem ocorrer falhas e deflexões excessivas, devido às oscilações resultantes, fazendo com que a estrutura se rompa, como a queda da ponte pênsil do estreito de Tacoma Narrows em Washington (EUA), no ano de 1940, como mostra a figura 25.

Figura 25 - Ressonância causada na ponte Tacoma Narrows nos EUA, induzida pelo fluxo do vento



Fonte: RAO, 2008.

3.4.9 Transdutores piezoelétricos

Segundo Rao (2008), os transdutores são responsáveis pela conversão dos movimentos vibratórios em sinais elétricos, como tensões e correntes. Entretanto os sinais de saídas são baixos para serem analisados diretamente, sendo necessário um instrumento de conversão de sinal e de armazenamento para amplificar os resultados e quantificar as medidas, possibilitando as análises das vibrações necessárias em estruturas, como geradores de sinais (osciloscópios).

Sendo assim, os transdutores piezoelétricos utilizam o efeito dos materiais piezoelétricos para gerar energia, projetados para produzir sinais proporcionais à força ou aceleração. A carga gerada é resultante da força aplicada F_x , dada pela equação 28 a seguir (RAO, 2008).

$$Q_x = kF_x = kAp_x \quad (\text{Eq. 28})$$

Onde k é a constante piezoelétrica, A é a área que a força F_x age e p_x é denominada a pressão resultante da força F_x . Dessa forma, a tensão de saída do material é expressa pela equação 29, em que a sensibilidade à tensão é representada por v e a espessura do material por t (RAO, 2008).

$$E = vtp_x \quad (\text{Eq. 29})$$

3.5 FLUXOS DE FLUIDOS

As vibrações induzidas por fluxos de fluidos ocorrem quando os fluidos escoam no entorno de um corpo. A partir dessas vibrações, podem ser produzidas energias, resultando em amplitudes. Exemplos de vibrações instáveis podem ocorrer em diferentes geometrias, devido à força de arrasto, de elevação e de vórtice fornecida pelo ar (RAO, 2008).

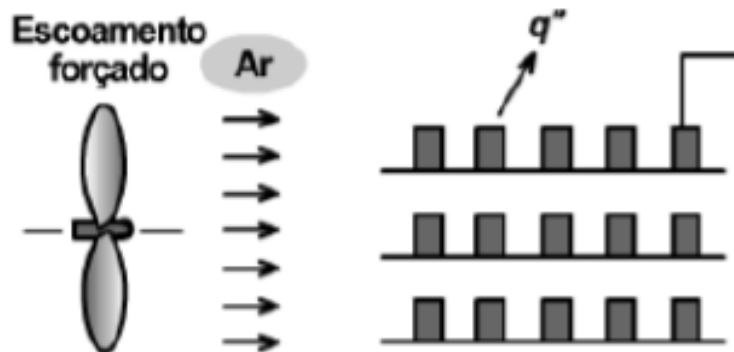
Segundo Bisfata (2016), utilizam-se máquinas fluidomecânicas para fornecer ou retirar energia do escoamento de um fluido de forma contínua, pela configuração de eixo rotativo. Sendo assim, como exemplo, têm-se os ventiladores e as turbinas eólicas, pois fornecem e retiram energia do escoamento de gases, respectivamente.

O modo de operação das máquinas é de acordo com os escoamentos compressíveis e incompressíveis. As que operam com gases sujeitos a diferenças de pressões e/ou altas velocidades são denominadas compressíveis, como as turbinas. Já os ventiladores atuam como escoamentos incompressíveis, devido à mudança da densidade entre a admissão e a descarga da máquina ser muito pequena (BISFATA, 2016).

As máquinas fluidomecânicas possuem características distintas de acordo com a altura manométrica, capacidade de vazão, potência e rendimento. Além de serem classificadas de acordo com a direção de escoamento do fluido em seu rotor, podendo ser do tipo axial, radial e misto (BISFATA, 2016). Entretanto, segundo Fox, Pritchard e McDonald (2010), o escoamento de gases pode ser considerado incompressível, mas a velocidade de escoamento deve ser pequena em relação à velocidade do som, definida como o número de Mach (Ma).

Os ventiladores axiais de uso doméstico são compostos por rotores, nos quais são posicionadas as pás giratórias, sendo o principal componentes de uma máquina fluidomecânica, pois transforma a energia mecânica em energia de fluido ou a energia de fluido em energia mecânica (BISFATA, 2016). Além disso, considerando a transferência de calor em ventiladores, segundo Copetti (2016), o mecanismo ocorre por convecção, devido transferência de energia pelo movimento global do fluido (advecção) e pelo movimento aleatório das moléculas do fluido (condução ou difusão). Dessa forma, o escoamento é denominado forçado, pois o fluido é submetido a movimentar-se através de meios externos, como apresentado na figura 26.

Figura 26 – Mecanismo físico da convecção verificados em ventiladores



Fonte: COPETTI, 2016.

As propriedades físicas consideradas na transferência de calor por convecção são de acordo com a massa específica (ρ), viscosidade dinâmica (μ), condutividade térmica (k), calor específico (C_p), viscosidade cinemática (ν) e difusividade térmica (α), apresentadas pelas equações 30 e 31. Além disso, o fluxo de calor é expresso pela lei de resfriamento de Newton, de acordo com a equação 32, sendo proporcional à diferença de temperatura (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Eq. 30})$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Eq. 31})$$

$$q''_{\text{conv}} = \frac{q_{\text{conv}}}{A_s} = \bar{h}(T_s - T_{\infty}) \quad (\text{Eq. 32})$$

Dessa forma, o coeficiente de transferência de calor h , depende das propriedades físicas mencionadas anteriormente, além da geometria e propriedade de escoamento, pois se manifesta pelos processos locais de transferência de calor e pela quantidade de movimento que ocorre na região de contato entre o fluido e a superfície sólida (COPETTI, 2016). Além disso, tem-se a camada limite de velocidade através do escoamento de um fluido sobre a superfície de uma placa, sendo a base para o cálculo do coeficiente de atrito, pois a camada de fluido em contato

com a superfície aplica uma força de arrasto através do atrito. A força de atrito por unidade de área é denominada tensão de cisalhamento (τ), expressa em Newton (N) por metro quadrado (m^2), de acordo com a equação 33 (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

$$\tau_s = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (\text{Eq.33})$$

Sendo assim, a viscosidade de um fluido é a medida de sua resistência à deformação, dependente da temperatura. Já a força de atrito ao longo de uma superfície é dada pela equação 34, através do coeficiente de atrito, pois relaciona-se com o coeficiente de transferência de calor e a potência gerada por ventiladores (COPETTI, 2016).

$$F_f = \frac{1}{2} \bar{C}_f A_s \rho u_\infty^2 \quad (\text{Eq. 34})$$

Ademais, o escoamento de ar é denominado turbulento, devido ao movimento desordenado do fluido, estando associado à relação entre as forças de inércia e a força do escoamento, expressa pelo número de Reynolds, a seguir (BISFATA, 2016).

$$Re_{L_c} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho u_\infty L_c}{\mu} \quad (\text{Eq. 35})$$

Onde V é a velocidade e L_c é o comprimento característico da geometria. Além disso, tem-se a transferência de calor em escoamento externo, utilizada em projetos de engenharia baseados em situações idealizadas envolvendo geometrias simplificadas, devido à complexidade do problema (BISFATA, 2016; COPETTI, 2016).

4 METODOLOGIA

O processo metodológico para este trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido a partir de revisões na literatura, referentes às tecnologias de geração de energia através de plataformas experimentais em microestruturas com a utilização de materiais piezoelétricos poliméricos, cujas vibrações são induzidas pelo fluxo do vento. Dessa forma, definiram-se as etapas de análises de acordo com os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos abordados.

4.1 MATERIAIS

Utilizou-se os seguintes materiais:

- a) Pórtico rígido, medindo 35,5 de comprimento e 2,5 cm de espessura ;
- b) Viga de plástico, medindo 30 x 2,5 cm e de alumínio, medindo 50 x 3,0 cm;
- c) Material piezoelétrico de polifluoreto de vinilideno (PVDF LDT0-028K), fabricado pela MEAS, medindo 28 μm de espessura, 25 mm de comprimento e 13 mm de largura;
- d) Pequenos conexões de “jacarés”;
- e) Fitas isolantes;
- f) Garra metálica;
- g) Balança analítica;
- h) Ventilador comercial de mesa composto por 6 pás, marca Arno;
- i) Anemômetro digital, marca CR 2032 de 30 V;
- j) Osciloscópio digital, marca GW INSTEK, GDS – 1072 A – U, MemoryPrime;
- k) Materiais geométricos de folhas laminados de PVC, medindo 12 x 08 cm (CG1), 10 x 08 cm (CG2) e 10 x 10 cm (CG3).

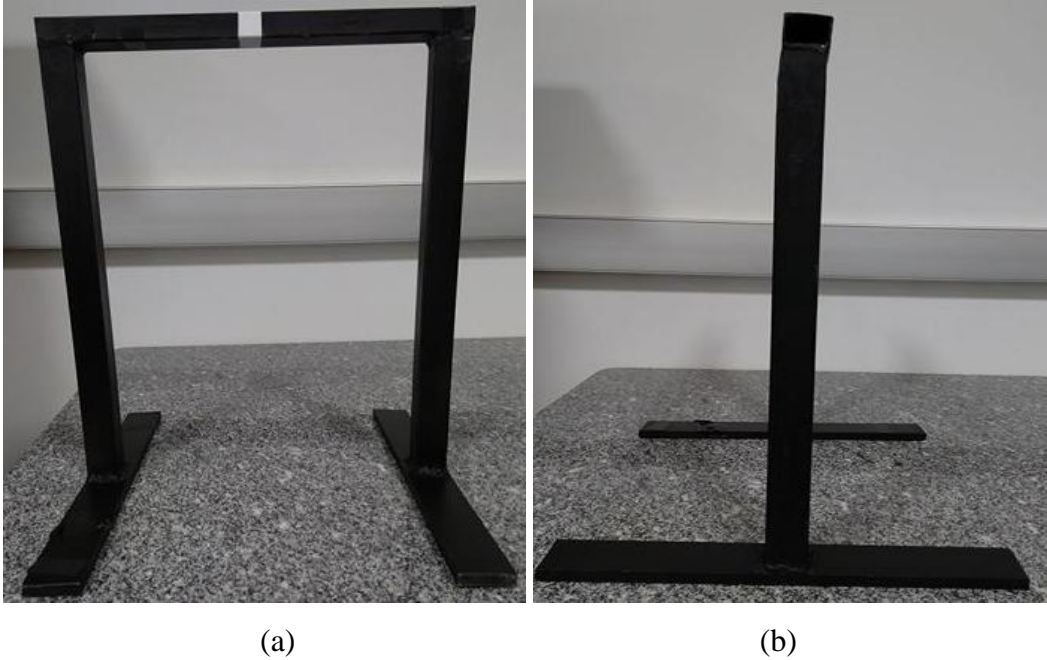
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS EXPERIMENTAIS

Como alternativa de energias renováveis, buscou-se, experimentalmente, compreender o comportamento dinâmico do piezoelétrico PVDF LDT0-028K da MEAS acoplado a uma viga e a diferentes modelos geométricos de materiais compostos por folhas laminadas de PVC.

Sendo assim, para todos os modelos experimentais, projetou-se um protótipo de pequeno porte no Laboratório de Eletromagnetismo da Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Cerro Largo - RS. As configurações do pórtico rígido utilizadas nesse estudo,

auxiliaram como suporte para o acoplamento das vigas (plástico e alumínio) e, consequentemente, do material piezoelétrico, servindo de base para o modelo experimental, apresentado pela figura 27.

Figura 27 - Microestrutura de pórtico rígido frontal (a) e lateral (b)

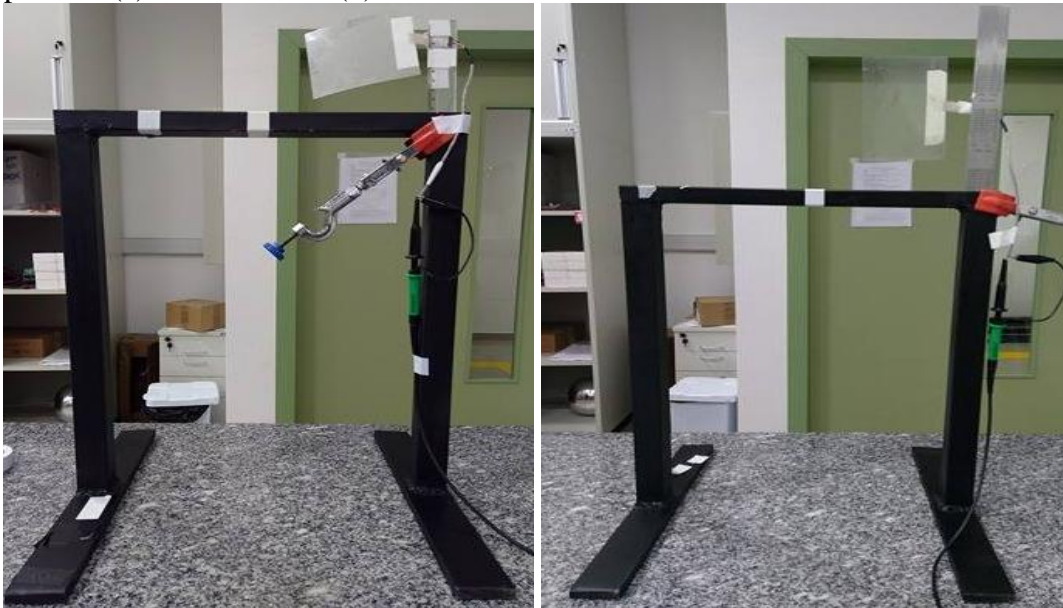


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Além disso, foram adquiridos pequenos “jacarés” para facilitar a fixação dos fios de eletrecidades do piezoelétrico com os demais equipamentos e fitas isolantes para auxiliar na imobilização do piezoelétrico, no acoplamento dos materiais e na suspensão dos fios de eletrecidade. Também utilizou-se uma garra para fixar as vigas no pórtico rígido.

Sendo assim, os modelos experimentais foram realizados com diferentes tipos de vigas, sendo uma constituída de material plástico e outra de alumínio. Dessa forma, o material piezoelétrico foi acoplado com a finalidade de servir de microviga flexível, de acordo com a vibração na sua base, com diferentes geometrias de plásticos consolidadas no seu extremo livre, possibilitando sua deformação, exibido na figura 28.

Figura 28 - Modelo experimental do protótipo para geração de energia elétrica, com a viga de plástico (a) e de alumínio (b)



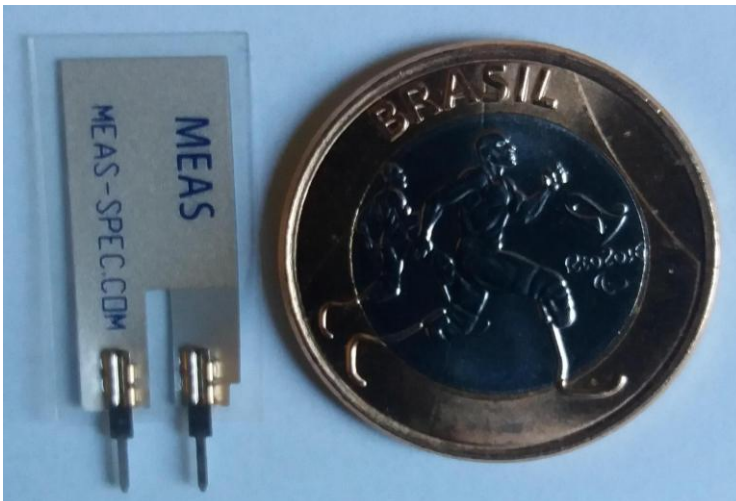
(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O piezoelétrico adquirido é composto por polímero, denominado PVDF (Polifluoreto de Vinilideno) LDT0-028K de 28 micrometros (μm) de espessura e de dimensões 25 mm x 13 mm, fabricado pela MEAS – SPEC.COM. O material é caracterizado por possuir resistência a altos impactos e pela utilização em vigas flexíveis “cantilevers”, o tamanho é aproximadamente o diâmetro da moeda de um real, como apresenta a figura 29. Mais detalhes das características e funcionalidades deste material encontram-se no manual simplificado (MEAS, 2008).

Figura 29 – Modelo de material piezoelétrico PVDF – comparação do seu tamanho com uma moeda



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As vibrações do material piezoelétrico foram induzidas pelo fluxo do ar através de um ventilador comercial de mesa composto por seis pás, da marca ARNO, como mostra a figura 30. As duas velocidades do vento utilizadas como resposta aos experimentos foram de 6,2 m/s e 4,9 m/s, nominadas V_{v_1} e V_{v_2} , respectivamente. As velocidades do vento medidas foram calibradas a partir de testes com variações do tempo, de acordo com a tabela 2.

Figura 30 - Fluxo do vento causado pelo ventilador modelo seis pás



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Tabela 2 - Calibração das velocidades do vento para V_{v_1} e V_{v_2}

TEMPO (min.)	V_{v_1} (m/s)	V_{v_2} (m/s)
1	6,2	4,8
2	6,3	4,9
3	6,1	4,8
4	6,2	5
5	6,2	5
MÉDIA	6,2	4,9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As velocidades do vento foram medidas a uma distância de 30 cm do ventilador, por um anemômetro digital marca CR 2032 de 30 V, como pode ser observado pela figura 31.

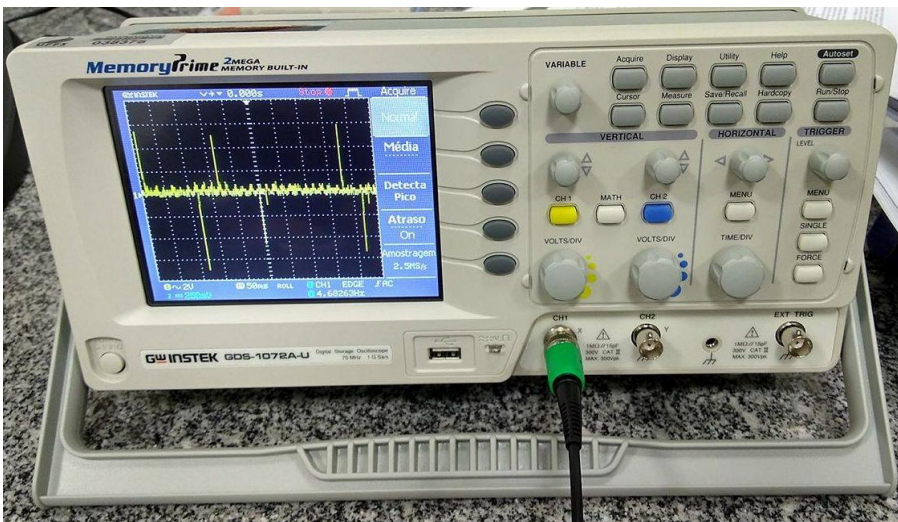
Figura 31 - Modelo de anemômetro digital para mensurar a velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Ademais, utilizou-se um osciloscópio digital, marca GW INSTEK, GDS – 1072 A – U, MemoryPrime, para mensurar precisamente as voltagens causadas pelo piezoelétrico e obter gráficos de saídas de voltagens em função do tempo, como apresenta a figura 32.

Figura 32 - Modelo do osciloscópio digital para a captura de saídas de voltagens



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Sendo assim, foram elaboradas diferentes geometrias, como de retângulo e quadrado, denominados folhas laminadas de PVCs flexíveis, para serem fixados na extremidade livre do

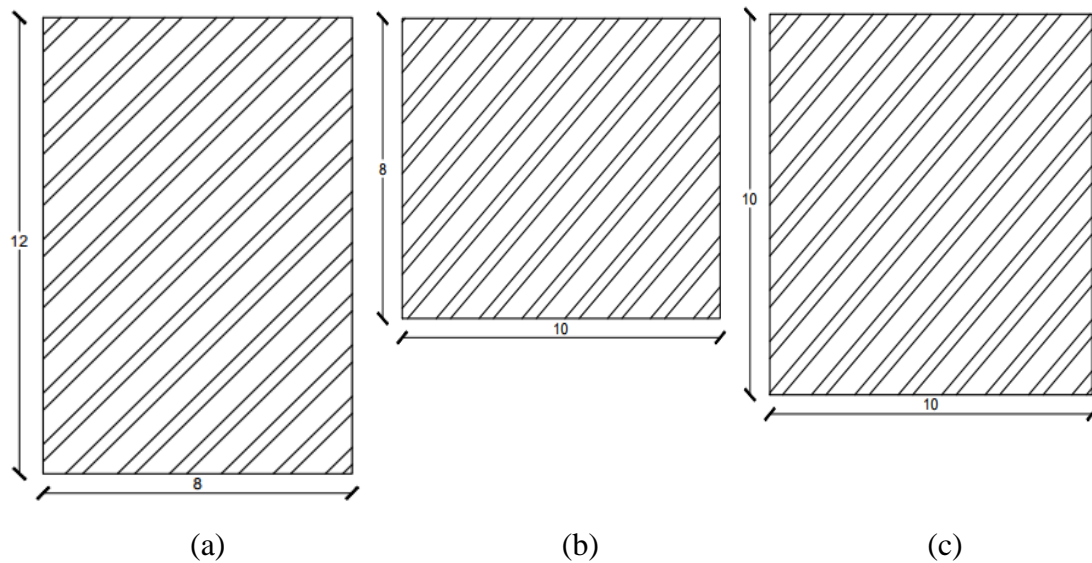
material piezoelétrico, com a finalidade de produzir os efeitos de voltagens através da deformação verificada sobre ele.

Definiram-se as seguintes identificações das configurações geométricas para serem usadas no experimento:

- a) CG1 : Configuração geométrica de 12 x 08 cm;
- b) CG2: Configuração geométrica de 10 x 08 cm;
- c) CG3: Configuração geométrica de 10 x 10 cm.

A figura 33 ilustra as os modelos de materias PVCs, elaborados experimentalmente, para obtenção dos resultados de voltagens.

Figura 33 - Formatos de materiais plásticos flexíveis acoplados ao piezoelétrico, como CG1 (a), CG2 (b) e CG3 (c)



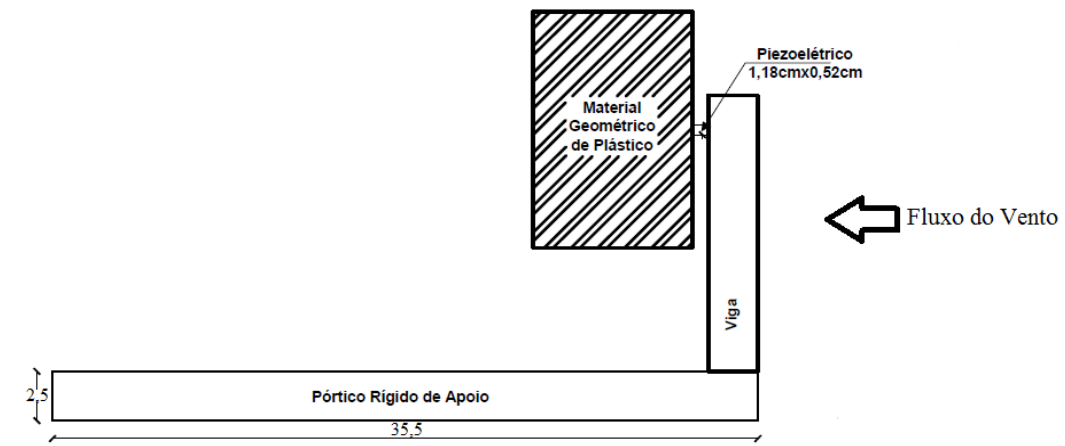
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Além disso, trabalhou-se os ensaios experimentais com três formas de posição do material piezoelétrico fixado nas configurações geométricas de folhas laminadas PVCs, a uma distância de 30 cm em referência ao ventilador. Dessa forma, foram definidas as seguintes identificações referentes às posições do piezoelétrico no plástico:

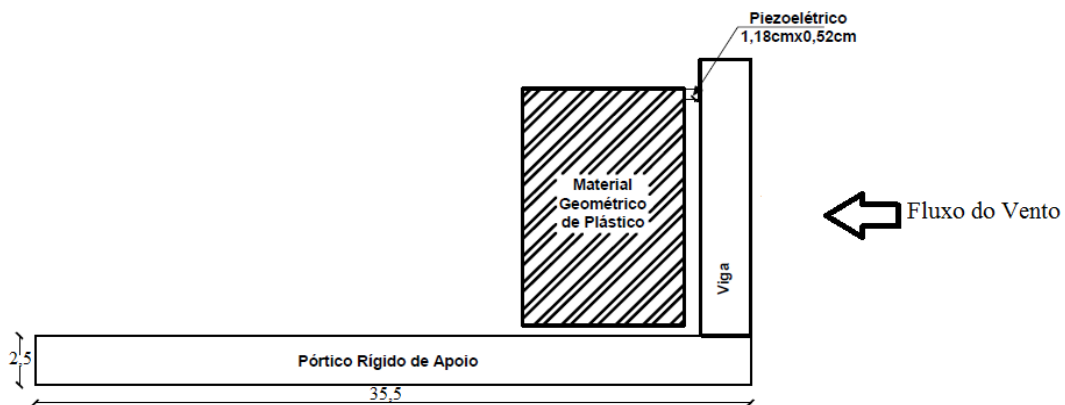
- a) PGa: Posição geométrica no meio;
- b) PGb: Posição geométrica no canto inferior (a baixo);
- c) PGc: Posição geométrica no canto superior (a cima).

A outra extremidade do piezoelétrico foi fixada a uma viga, sendo uma fabricada de material plástico e outra de alumínio, como pode-se observar pelos modelos de configurações experimentais apresentados na figura 34. Além disso, pode-se analisar o sistema experimental, demonstrado na figura 35.

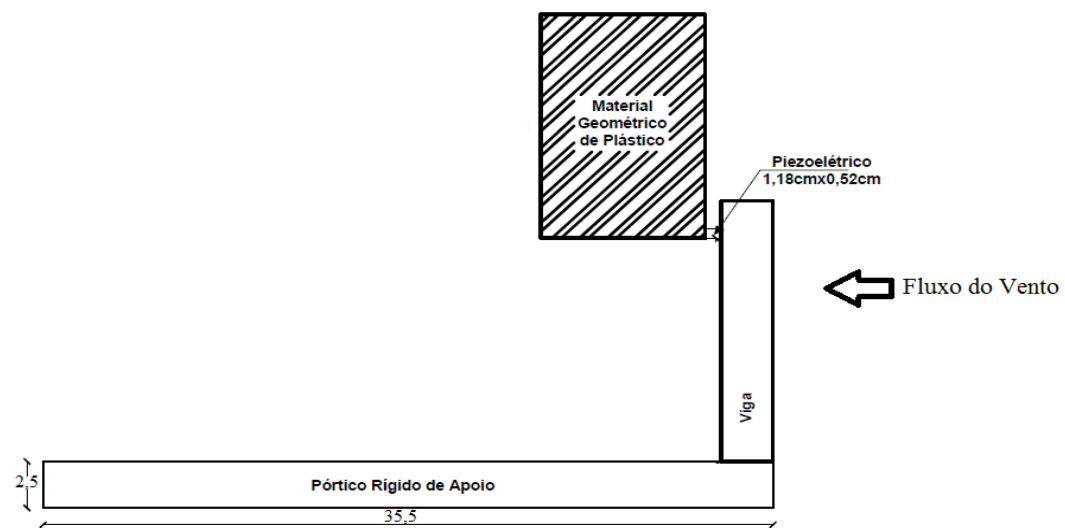
Figura 34 - Modelo experimental em centímetros, utilizado para todas as configurações geométricas, sendo estas 12 x 08 cm (CG1), 10 x 08 cm (CG2) e 10 x 10 cm (CG3), através da PGa (a), PGb (b) e PGc (c), com a viga de plástico e de alumínio



(a)

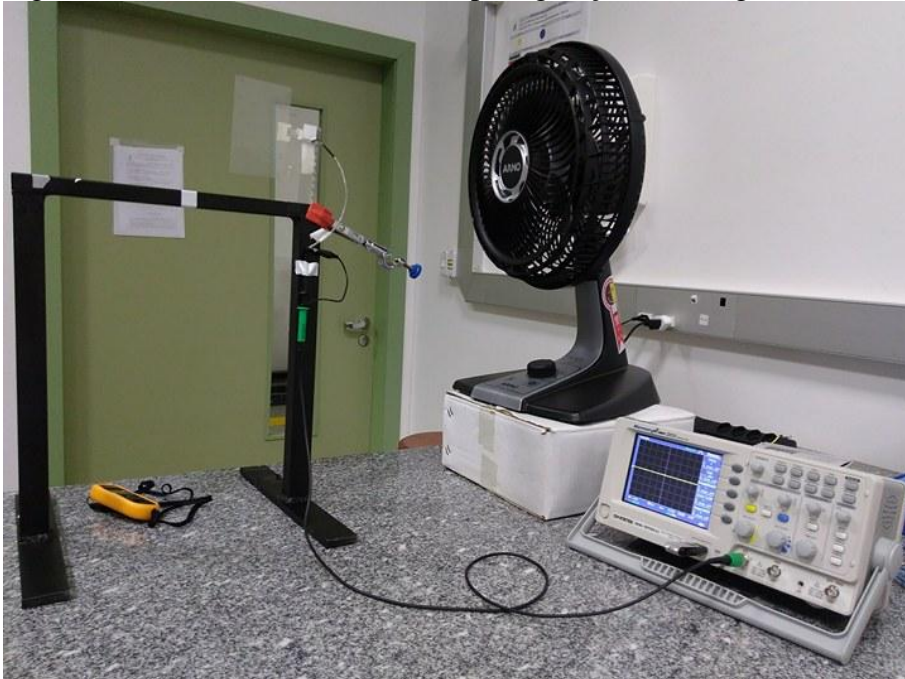


(b)



(c)

Figura 35 - Sistema em microescala para geração de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.2.1 Procedimentos numéricos experimentais

A densidade (massa específica) das vigas de diferentes tipologias, foram calculadas pela razão da massa (m) em gramas (g) e o seu volume (V) em centímetros cúbicos (cm^3). Sendo assim, foram encontrados valores de $0,26 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$ para a viga de plástico e densidade de $2,70 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$, para a viga de alumínio, através da equação 36 (HALLIDAY; RESNICK, 2012).

$$\rho = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} \quad (\text{Eq. 36})$$

Além disso, utilizou-se uma balança analítica para pesagem da massa e o volume foi calculado a partir da equação do paralelepípedo, considerando um erro relativo de 5%. Posteriormente, foram realizados cálculos de acordo com as melhores voltagens obtidas com o intuito de atingir dados mais precisos para os resultados e discussões, como a média aritmética (\bar{x}) das três melhores respostas dos modelos experimentais.

A equação da média consiste no somatório dos elementos dividido pelo número total de elementos utilizados, calculados através do valor eficaz da voltagem (V_{rms}), pela equação 37 (TOLEDO e OVALLE, 2009).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{Eq. 37})$$

O valor eficaz é medido em osciloscópios e representa o valor de uma tensão ou corrente contínua que gera a mesma dissipação de potência que a tensão ou corrente periódica, sendo uma evolução temporal. Dessa forma, sua resposta resulta do valor médio da voltagem (V_{rms}), apresentado pela equação 38 (NAKASHIMA, 2013).

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (\text{Eq. 38})$$

Ademais, com a finalidade de calcular a potência elétrica, adquiriu-se um resistor de 1000 ohms (Ω), exibido pela figura 36, para analisar as características e as propriedades dos materiais utilizados, através da resistência elétrica, introduzindo, assim, uma resistência em um circuito através de resistores, como pode ser observado pela figura 37 (HALLIDAY E RESNICK, 2012).

Figura 36 - Modelo de resistor, através das faixas coloridas (a) e modo de circuito (b)

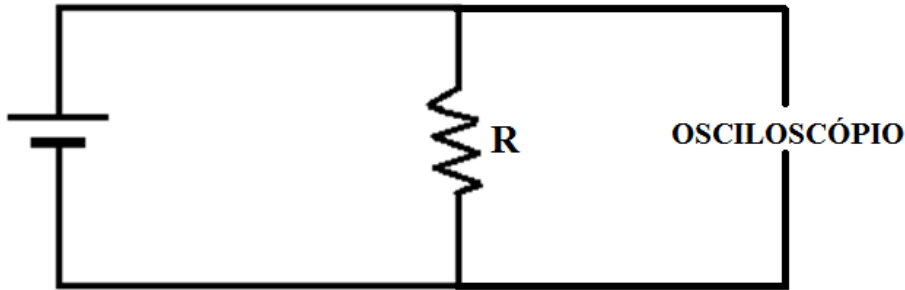


(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 37 – Modelo de circuito com resistor em paralelo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Segundo Halliday e Resnick (2012), os circuitos elétricos são compostos de resistores, capacitores e indutores, responsáveis por realizar trabalhos sobre portadores de cargas e manter uma diferença de potencial entre os terminais, forçando energia elétrica. Dessa forma, calculou-se a corrente elétrica (i) através da equação 39, sendo que, quanto maior a resistência R , menor a corrente (i).

$$i = \frac{V}{R} \quad (\text{Eq. 39})$$

As unidades estabelecidas para o resistor (R) é ohm (Ω), a diferença de potencial (V) em Volts (V) e a corrente elétrica resultante (i) em ampère (A). Ademais, os valores das resistências dos resistores são determinados de acordo com as faixas coloridas do material.

Segundo Halliday e Resnick (2012), levando em consideração a lei da conservação da energia, pode-se calcular a potência (P) em circuitos elétricos. Sendo assim, a potência é a taxa de transferência de energia elétrica, expressa pela equação 40. A unidade de potência elétrica calculada pela equação a seguir é em volt-ampère ($V \cdot A$), porém pode ser expressa em watts (W).

$$P = iV \quad (\text{Eq. 40})$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As saídas das curvas de voltagens em função do tempo foram analisadas no osciloscópio digital de acordo com as escalas de 100 milivolts (0,1 V) a 10 volts. O eixo vertical das figuras capturadas pelo equipamento correspondem às voltagens em volts (V), enquanto que o eixo horizontal representa o tempo em segundos (s). Dessa forma, foram realizadas inúmeras análises com o intuito de obter oscilações adequadas no entorno do eixo de referência ou de equilíbrio.

Sendo assim, os resultados obtidos para as geometrias 12 x 08 cm (CG1), 10 x 08 cm (CG2) e 10 x 10 cm (CG3) com o piezoelétrico posicionado ao meio (PGa), na parte inferior (PGb) e superior (PGc) da configuração geométrica de folha laminada PVC, acoplado na viga engastada de plástico, na velocidade do vento V_{v_1} , são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Respostas das saídas de voltagens para a viga engastada de plástico na V_{v_1}

Configurações Geométricas	Posições Geométricas	Voltagem RMS (V)
CG1	PGa	8,92
CG1	PGb	1,96
CG1	PGc	2,3
CG2	PGa	7,38
CG2	PGb	4,45
CG2	PGc	5,64
CG3	PGa	6,67
CG3	PGb	2,38
CG3	PGc	3,15

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Analisando a tabela 4, pôde-se concluir que as melhores respostas obtidas das médias V_{rms} foram para a posição geometria ao meio (PGa) da folha laminada com o piezoelétrico, através das respostas de 8,92 V para CG1, 7,38 V para CG2 e 6,67 V para a CG3.

Na tabela 4 são apresentados os resultados obtidos para as geometrias 12 x 08 cm (CG1), 10 x 08 cm (CG2) e 10 x 10 cm (CG3) com o piezoelétrico posicionado ao meio (PGa), na parte inferior (PGb) e superior (PGc) da configuração geométrica de folha laminada de PVC, acoplado na viga engastada de plástico, na velocidade do vento V_{v_2} .

Tabela 4 - Respostas das saídas de voltagens para a viga engastada de plástico na V_{v_2}

Configurações Geométricas	Posições Geométricas	Voltagem RMS (V)
CG1	PGa	0,63
CG1	PGb	0,74
CG1	PGc	0,053
CG2	PGa	6,35
CG2	PGb	3,23
CG2	PGc	2,01
CG3	PGa	2,5
CG3	PGb	0,077
CG3	PGc	1,88

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Sendo assim, para a velocidade do vento menor, ou seja, de 4,9 m/s, as melhores respostas das voltagens médias V_{rms} foram de 0,74 V para a CG1 na PGb, 6,35 V para a CG2 na PGa e 2,50 V para a CG3 na PGa. Dessa forma, a PGa apresentou melhor desempenho em comparação com as outras posições geométricas.

Os resultados obtidos para as geometrias 12 x 08 cm (CG1), 10 x 08 cm (CG2) e 10 x 10 cm (CG3) com o piezoelétrico posicionado ao meio (PGa), na parte inferior (PGb) e superior (PGc) da configuração geométrica de folha laminada de PVC, acoplado na viga engastada de alumínio, na velocidade do vento V_{v_1} , são demonstrados na tabela 5.

Tabela 5 - Respostas das saídas de voltagens para a viga engastada de alumínio na V_{v_1}

Configurações Geométricas	Posições Geométricas	Voltagem RMS (V)
CG1	PGa	2,04
CG1	PGb	0,89
CG1	PGc	5,35
CG2	PGa	4,18
CG2	PGb	5,01
CG2	PGc	4,4
CG3	PGa	3,54
CG3	PGb	2,93
CG3	PGc	2,57

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Considerando os resultados obtidos pela viga engastada de alumínio na V_{v_1} , ou seja, de 6,2 m/s, apresentadas na tabela 5, as melhores respostas de voltagens foram encontradas para as geometrias em diferentes posições geométricas. Sendo assim, a CG1 apresentou melhor desempenho na PGc pela resposta de 5,35 V, a CG2 obteve melhor eficiência na PGb, de acordo com a resposta de 5,01 V e a CG3 na PGa pela resposta de 3,54 V.

Na tabela 6 são apresentados os resultados obtidos para as geometrias 12 x 08 cm (CG1), 10 x 08 cm (CG2) e 10 x 10 cm (CG3) com o piezoelétrico posicionado ao meio (PGa), na parte inferior (PGb) e superior (PGc) da configuração geométrica de folha laminada de PVC, acoplado na viga engastada de alumínio, na velocidade do vento V_{v_2} .

Tabela 6 - Respostas das saídas de voltagens para a viga engastada de alumínio na V_{v_2}

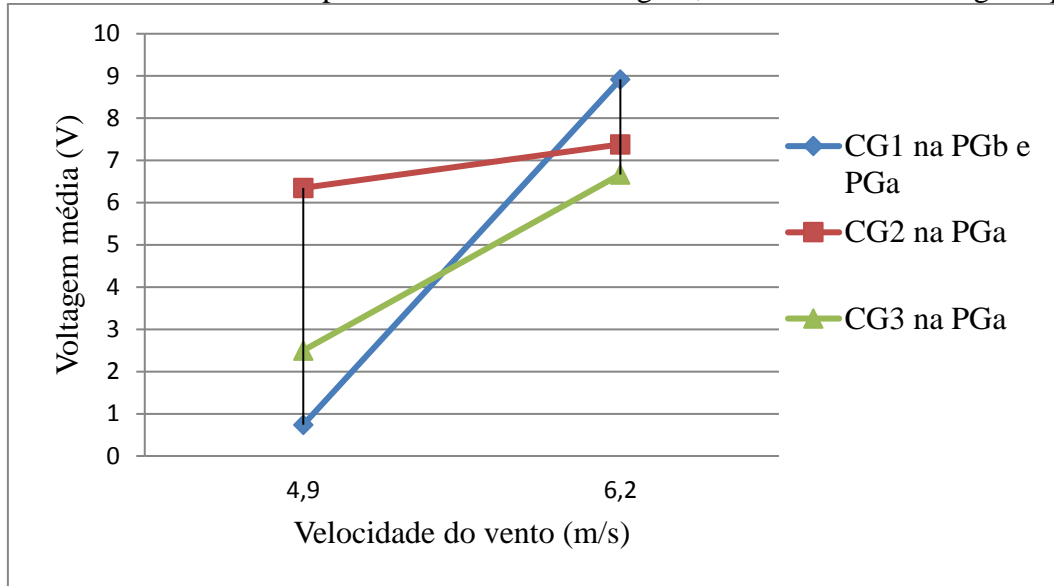
Configurações Geométricas	Posições Geométricas	Voltagem RMS (V)
CG1	PGa	0,16
CG1	PGb	0,54
CG1	PGc	3,27
CG2	PGa	0,26
CG2	PGb	0,078
CG2	PGc	0,4
CG3	PGa	0,74
CG3	PGb	0,69
CG3	PGc	1,06

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As respostas das saídas de voltagens observadas na tabela 6 são da viga engastada de alumínio na velocidade do vento de 4,9 m/s (V_{v_2}). Dessa forma, as respostas que apresentaram maior desempenho em relação a configuração geométrica da folha laminada PVC e a posição do piezoelétrico na folha, foram de 3,27 V para CG1 na PGc, 0,4 V para a CG2 na PGc e 1,06 V para CG3 na PGc. Sendo assim, a posição na parte superior (PGc) apresentou melhor eficiência nesses modelos experimentais.

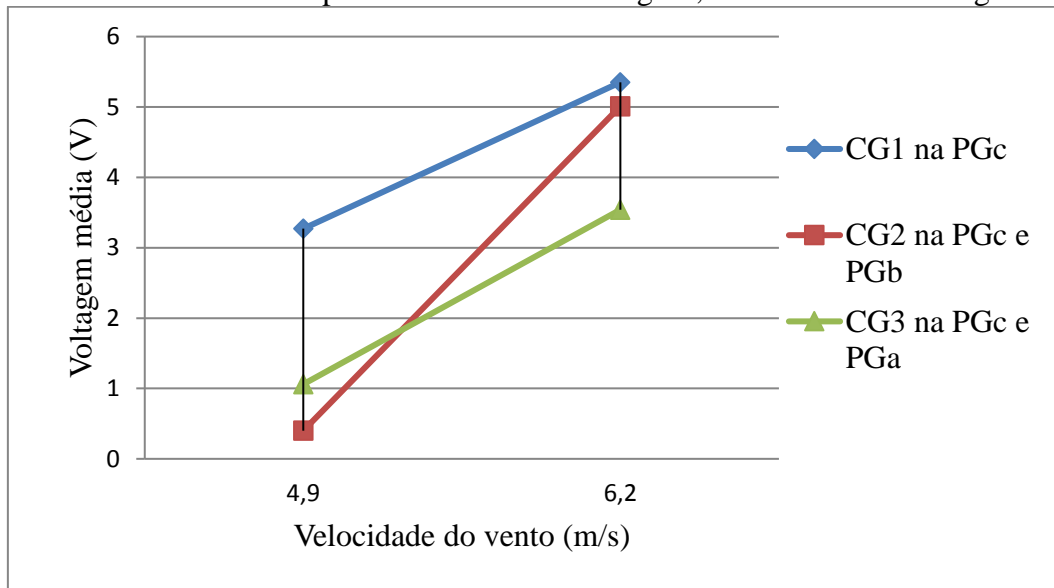
Além disso, para melhor visualização, compreensão e discussão dos resultados de voltagens, optou-se por elaborar gráficos referentes aos modelos experimentais que apresentaram melhor desempenho de saídas de voltagens. Dessa forma, o eixo x representa as velocidades do vento de 4,9 m/s (V_{v_2}) e 6,2 m/s (V_{v_1}), e o eixo y, as voltagens médias calculadas a partir do V_{rms} das configurações geométricas.

Gráfico 1 - Melhores respostas de saídas de voltagens, obtidas através da viga de plástico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 2 - Melhores respostas de saídas de voltagens, obtidas através da viga de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Pôde-se observar através dos gráficos que os melhores desempenhos de voltagens foram alcançados pela viga de plástico, de acordo com as respostas obtidas para a maior velocidade do vento, ou seja, 6,2 m/s. Os resultados de voltagens mais eficientes foram de 8,92 V, 7,38 V e 6,67 V, para os modelo experimentais CG1, CG2 e CG3, com o piezoelétrico acoplado no meio das diferentes configurações geométricas (PGa). Esse modelo é denominado tipo “T”,

possibilitando maior deformação do piezoelétrico, devido a vibração do material plástico parte superior e a inferior do piezoelétrico.

Ademais, considerando as velocidades dos ventos, observou-se que quanto maior a velocidade do vento, melhor serão os resultados, pois, quando utilizou-se a menor velocidade (4,9, m/s), as voltagens obtidas foram desiguais. Entre elas, pode-se considerar os maiores resultados como 6,35 V e 2,5 V para a viga de plástico, através da geometria 10 x 08 cm (CG2) e 10 x 10 cm (CG3), com o piezoelétrico consolidado ao meio (PGa)

No entanto, analisando a viga de alumínio para a menor velocidade do vento, têm-se como melhores respostas 3,27 V e 1,06 V, através da configuração geométrica de 12 x 08 cm (CG1) e 10 x 10 cm (CG3), com o piezoelétrico acoplado na parte superior (PGc), respectivamente. A característica do modo de acoplamento da PG c é do tipo “L” invertido, devido ao piezoelétrico estar acoplado na parte superior do plástico e a vibração ocorrer na parte inferior, apenas.

Ademais, para a maior velocidade do vento, os resultados não foram tão satisfatórios, quanto os obtidos pela viga de plástico, isso explica o fato das propriedades físicas dos materiais, gerar um empecilho para a vibração do material piezoelétrico. Dessa forma, as respostas obtidas foram de 5,35 V, 5,01 V e 3,54 V para as CG1, CG2 e CG3 nas PGc, PGb e PGa, respectivamente. Sendo assim o modo de fixação na PGb, é denominado do tipo “L”, pois o piezoelétrico, através do comportamento de viga flexível, está consolidado na parte inferior, ocorrendo a vibração apenas na parte superior do plástico.

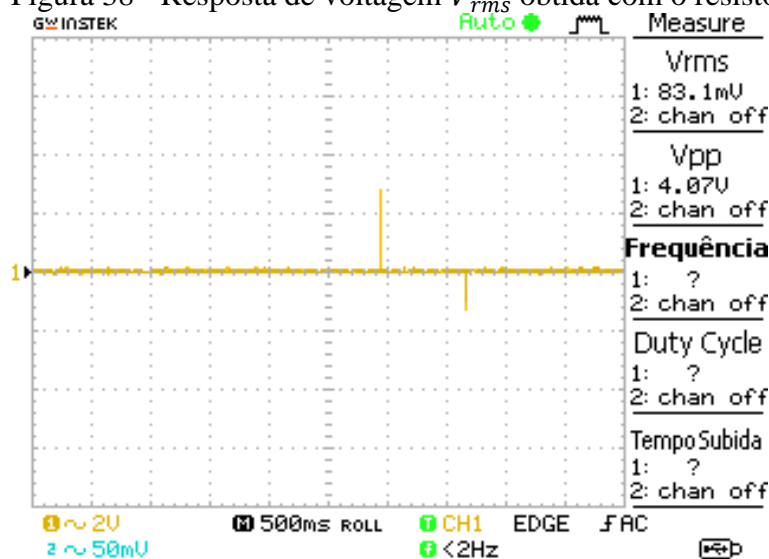
Sendo assim, relacionando as voltagens obtidas pelo modelo experimental com os de outros pesquisadores que trabalham com os materiais piezoelétricos PVDFs, pôde-se citar Thornton (2011), que utilizou o túnel de vento com velocidade entre 5 e 10 m/s para vibrar o piezoelétrico PVDF de modelo LDT0-MEAS, com um plástico (material usado no retro projetor de slide) fixado no extremo livre de modelo semelhante ao apresentado, no seu resultado experimental, obteve as saídas de voltagens entre 9 e 10 volts (V). Dessa forma, os resultados obtidos foram semelhantes ao do autor citado, pois utilizou-se uma velocidade de vento de 6,2 m/s e a voltagem obtida foi de 8,92 V.

Considerando o fluxo do vento, pode-se concluir que o escoamento ao redor do material é diferenciado em relação aos modos de posicionamento do mesmo, causando as vibrações nas geometrias de plásticos PVC e, conseqüentemente, resultando na deformação do piezoelétrico, como a posição ao meio (PGa) que apresentou o melhor desempenho. Além disso, as diferentes geometrias tornam-se importantes, devido a possibilidade de ocorrência de movimentações em diferentes ângulos.

Ademais, pôde-se analisar que o vento, considerado como excitação aleatória, produz respostas aleatórias nas amplitudes de movimento não harmônicas, observadas através do desempenho do sistema, ao contrário de uma excitação periódica, que produz uma resposta harmônica de amplitude constante. Além disso, considerando a viga, pôde-se concluir que o material usado é de fundamental importância para o desempenho do processo, devido as propriedades físicas, possibilitando assim maior vibração e, conseqüentemente, a deformação do piezoelétrico.

Contudo, dando prosseguimento aos resultados e discussões, optou-se por calcular a corrente elétrica (i) e a potência (P) dos modelos experimentais mais eficientes. Dessa forma, foi inserido um resistor de 1000Ω através de um circuito em paralelo para possibilitar a efetuação dos cálculos. Sendo assim, a figura 38 apresenta a resposta de voltagem V_{rms} , após a introdução do resistor.

Figura 38 - Resposta de voltagem V_{rms} obtida com o resistor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Pôde-se observar que, a partir do momento que introduziu-se o resistor nos experimentos, não variaram as voltagens obtidas quando diferenciados os modelos, mantendo-se constantes e com respostas baixas, como 83,1 mV, apresentado na figura anterior. Dessa forma, através da equação 39, pode-se calcular o resultado da corrente elétrica, empregada para todos os experimentos.

$$i = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{83,1mV}{1000 \Omega} = \frac{0,0831V}{1000\Omega} = 0,0000831 A$$

Posteriormente, realizou-se o cálculo da potência para as configurações geométricas que apresentaram melhor desempenho, ou seja, através da maior velocidade do vento (V_{v_1}) com a viga de plástico, apresentadas no gráfico 1. Considerando, assim, a equação da potência ($P = iV$) para a obtenção dos resultados apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Resultados encontrados através da voltagem obtida pelas diferentes geometrias.

Configurações Geométricas	Voltagem RMS (V)	Corrente elétrica (A)	Potência (W)
CG1	8,92	0,0000831	0,000741252
CG2	7,38	0,0000831	0,000613278
CG3	6,67	0,0000831	0,000554277

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Portanto, a potência encontrada para um piezoelétrico apresentou respostas em escalas muito baixas, sendo essas de $74 \mu\text{W}$, $61 \mu\text{W}$ e $55 \mu\text{W}$ para as CG1, CG2 e CG3, respectivamente. Dessa forma, os ensaios realizados foram com o intuito de comparar a potência adquirida pelos modelos com a potência necessária para acender uma LED, através da energia fornecida pelo modelo experimental.

Sendo assim, para atingir o objetivo seria necessário utilizar vários piezoelétricos em paralelo ou em série para aumentar a capacidade de tensão e de corrente. Dessa forma, pesquisou-se a potência necessária para acender uma LED, sendo esse resultado variante de 6 a 18 W, de acordo com a Ledplanet (2016). No entanto, seriam necessários 8108 a 24324 piezoelétricos em paralelo para a geração de energia para uma lâmpada LED, considerando uma macro escala.

Por fim, pôde-se concluir que devido a corrente elétrica ser baixa, a potência calculada não apresentou-se suficiente para a geração de energia elétrica em escalas comerciais, pois toda fonte de tensão possui um limite de fornecimento de corrente. Portanto, para atingir um nível de corrente superior seria necessário conectar mais fontes de piezoelétricos.

No entanto, considerando as respostas obtidas pelos autores Li e Lipson (2009), pôde-se verificar que as respostas dos modelos experimentais desse trabalho foram suficientes. Sendo assim, os autores utilizaram o material piezoelétrico PVDF LDT1-0,28K/L (dimensões de 41 mm x 16 mm x 205 μm) e o PVDF LDT2-0,28K/L (dimensões de 72 mm x 16 mm x 205 μm), consolidado em uma haste plastificada, posicionado na forma horizontal, obtendo resultados de

potência não satisfatória para as velocidades dos ventos de 2 a 6,5 m/s, sendo esses de 0 μW e 7 μW na velocidade do vento de 8 m/s.

Além disso, considerando a mesma posição horizontal estudada pelos autores, mas com a configuração triangular da lamina do gerador de 32 cm², os resultados obtidos foram de 1,25 μW para a velocidade de ar de 3,5 m/s, 2 μW para a velocidade do ar de 5 m/s e 3,25 μW para a velocidade do ar de 6,5 m/s. Sendo assim, comparando com resultados encontrados nos modelos experimentais desse trabalho, pôde-se concluir que foram mais eficientes em comparação com os dos autores citados, de acordo com a resposta de 74 μW para a velocidade do vento de 6,2 m/s.

Ademais, Li e Lipson (2009) analisaram experimentalmente a posição horizontal e vertical do material geométrico triangular plastificado considerando o piezoelétrico PVDF LDT2-0,28K/L (dimensões de 72 mm x 16 mm x 205 μm), obtendo respostas de 17 μW para a velocidade do vento de 6,5 m/s com uma haste longa individual na posição horizontal, 296 μW com a velocidade do vento de 8 m/s com uma haste curta individual na posição vertical, 76 μW com a velocidade do vento de 3,5 m/s com a haste longa individual na posição vertical e 119 μW com a velocidade do vento de 6,5 m/s com a haste longa dupla com espaçamento aéreo na posição vertical.

Considerando as respostas obtidas pelos autores Deivasigamani et al. (2014) através do piezoelétrico PVDF LDT1-0,28K/L (dimensões de 72 mm x 16 mm x 205 μm) com um túnel de vento na posição horizontal, obteve-se respostas de potência entre 10,8 a 20 μW nas velocidades de ventos de 3 a 8 m/s. Ademais, na posição vertical o comportamento foi similar ao da posição horizontal com a mesma resistência, mas com respostas de potência de 24 a 90 μW para as velocidades do vento de 3 a 8 m/s. Entretanto, na velocidade do vento de 6 m/s, sendo essa similar ao do trabalho, a potência encontrada foi de 70 μW .

Dessa forma, as respostas de energia potencial analisadas pelos autores Deivasigamani et al. (2014) foram similares as encontradas pela CG1 desse trabalho na velocidade do vento aproximada. Concluindo, assim, que os resultados são satisfatório, em comparação com os encontrados por outros autores, apresentando um desempenho eficiente na geração de energia elétrica em micro escala.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma alternativa de aplicação da tecnologia de geração de energia elétrica a partir de materiais piezoelétricos já é uma realidade em pequena escala e teve início com a pesquisa laboratorial. Esse tipo de aplicação apresenta baixo consumo de energia, além da possibilidade de ser considerada energia limpa, estar ao alcance de comunidades locais urbanas e remotas e utilizar o vento como fonte de energia.

O presente trabalho foi desenvolvido em forma experimental e teve como objetivo a coleta de energia utilizando as vibrações de um polímero piezoelétrico de LDT0-MEAS sob fluxo do vento, com duas velocidades, produzidas por um ventilador de seis pás. As saídas de voltagens foram capturadas no osciloscópio para posterior cálculo da energia potencial, resultando em baixa eficiência.

Para melhorar as deformações do piezoelétrico e da otimização na coleta de energia foi necessário incluir nos ensaios experimentais os materiais flexíveis de plástico PVC de diferentes dimensões geométricas e esses foram fixados no extremo livre do piezoelétrico direcionado para a captura do vento.

Dessa forma, conclui-se que o piezoelétrico fixado no meio do modelo geométrico de plástico PVC (PGa), independente da suas dimensões, apresentou melhor desempenho, através das respostas de 8,92 V, 7,38 V e 6,67 V e potência de 74 μ W, 61 μ W e 55 μ W, considerando a viga de plástico, com menor densidade. No caso da viga de alumínio, a melhor resposta do sistema foi inferior as citadas anteriormente, sendo essa de 5,35 V para a CG1 e PGc, não sendo considerada para o cálculo da potência.

Entre as dificuldades encontradas no desenvolvimento do experimento, podem ser citadas a fixação dos fios com o piezoelétrico, através da soldagem, e das fitas isolantes e, por último, encontrar o material plástico PVC de flexibilidade suficiente para oscilar e deformar o piezoelétrico, de acordo com o fluxo do vento.

Portanto, a coleta de energia através de um ou mais polímeros piezoelétricos, de acordo com as configurações apresentadas de LDT0-MEAS, estaria ainda muito longe da produção em grande escala, devido à baixa saída de energia potencial. Além disso, as considerações econômicas seriam impraticáveis pelo custo da utilização de milhares destes materiais, porém poderiam ser dimensionados para algumas aplicações que precisam de quantidade de energia menores.

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se a contribuição no sentido de que este experimento pode ser estudado sobre o efeito do fenômeno da saturação modal (transferência

de energia em ressonância interna de relação de frequências naturais de 1:2 e ressonância externa de ação direta) no modelo de tipo “L” entre o acoplamento de uma viga suporte vertical flexível (régua flexível) e o material piezoelétrico (na posição horizontal), o qual não foi explorado ainda nesse contexto. Algumas vibrações da régua foram observadas e, nesse caso, uma transferência de energia vibratória com o piezoelétrico possibilitou o melhor desempenho na saída da voltagem e da energia potencial sob a excitação externa do fluxo do vento.

Sendo assim, a ressonância de ação direta acontece quando a frequência da força de excitação coincide com a frequência natural do modo vibratório dominante do sistema principal e, quando este sistema principal (atuando como suporte) excita o outro sistema acoplado, estaria presente a ressonância autoparamétrica (similar ao fenômeno por saturação modal). Jia e Seshia (2014) estudaram a ressonância autoparamétrica para coleta de energia de um modelo de piezoelétricos de configuração de tipo “T”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKEFIL, A. et al. An energy harvester using piezoelectric cantilever beams undergoing coupled bending–torsion vibrations. **Journal of Smart Materials and Structures**, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) - BRASIL. Energia eólica. In: _____. **Atlas da energia elétrica no Brasil** 2º edição. Brasília, 2005, cap. 6, p. 93 – 110.

AKAYDIN, H. D.; ELVIN, N.; ANDREOPOULOS, Y. Performance of a self-excited fluidic energy harvester. **Jornal Smart Materials and Structures**. Nova Iorque - USA, v. 21, n. 2, oct. 2011/jan. 2012.

AKAYDIN, Hüseyin Dogus; ELVIN, Niell; ANDREOPOULOS, Yiannis. Flow-Induced Vibrations for Piezoelectric Energy Harvesting. In: ELVIN, Niell; ERTURK, Alper (editores). **Advances in Energy Harvesting Methods**. Estados Unidos: Springer Science, 2013. cap 10, p. 241 – 267.

ALMEIDA, Joana de Sousa. **Conversão das vibrações provenientes do vento em electricidade**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentáveis) - Universidade Nova de Lisboa, Curso de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Lisboa, 2013.

ATELIER DNA. **Windstalk**. 2017. Disponível em: <<https://atelierdna.com/portfolio/windstalk/>>. Acesso em: 01 set. 2017.

BISFATA, Sylvio R. Equipamento, máquinas e instalações fluidomecânicas. In: _____. **Mecânica dos fluidos: noções e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2016. cap 7, p. 209-266.

CASTRO, Rui M.G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada** - introdução à energia eólica. 2009. 93f. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, DEEC / Área Científica de Energia, Lisboa, 2009.

CBEE - Centro Brasileiro de Energia Eólica. **Atlas eólico brasileiro: simulações 2013**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico>. Acesso em 01 de out. de 2017.

CELLULAR, Ana Carolina Souza. **Análise da influência de efeitos não-lineares em sistemas de colheita de energia baseados em vibração utilizando materiais piezoelétricos**. 2016. 86 f. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica-COPPE, Rio de Janeiro, 2016.

COELHO, Marcos Antonio Jeremias. **Avaliação e análise de um sistema de micro geração de energia baseado no efeito piezoelétrico**. 2015. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2015.

COPETTI, Jacqueline Biancon. **Transferência de calor por convecção**. Unisinos, 2016. Disponível em: <http://professor.unisinos.br/jcopetti/transcal_ppg/conveccao_introd.pdf>. Acesso em 15 de nov. de 2017.

COTTONE, F. et al. Nonlinear Kinetic Energy Harvesting. **Journal Elsevier**. Itália, v. 7, p.190-191, dez. 2011.

COTTONE, Francesco. **Vibration Energy harvesting: non-linear approaches**. 2014. Disponível em: <http://www.nipslab.org/sites/nipslab.org/files/NiPS2014_Cottone_Nonlinear.pdf>. Acesso em: 01 out. 2017.

DEIVASIGAMANI, Arvind et al. **Piezoelectric Energy Harvesting from Wind Using Coupled Bending-Torsional Vibrations**. 4^o ed. Australia: Published by Canadian Center of Science and Education, 2014.

DE MARQUI, Carlos Jr.; ERTURK, Alper. Airfoil-Based Linear and Nonlinear Electroaeroelastic Energy Harvesting. In: ELVIN, Niell; ERTURK, Alper (editores). **Advances in Energy Harvesting Methods**. Estados Unidos: Springer Science, 2013. capítulo 11, p. 269 – 294.

DEMIR, F.; ANUTGAN, M. Effects of the Wind Speed and the Material Emplacement on the Output Signal of PZT Piezoelectric Energy Harvester. Special Issue of the 6th International Congress & Exhibition (APMAS2016), Maslak, Istanbul, Turkey, June 1–3, 2016. **ActaPhysicaPolonica A**, v. 131, n. 3, p. 362-365, 2017.

DHINGRA, Parul et al. **Energy Harvesting using Piezoelectric Materials**. Special Issue of International Journal of Computer Applications, 2012.

ELVIN, Niell; ERTURK, Alper. Introduction and Methods of Mechanical Energy Harvesting. In: _____. **Advances in Energy Harvesting Methods**. Estados Unidos: Springer Science, 2013. capítulo 1, p. 03 – 14.

EMETERIO, San Prieto et al. **On the Measurement of the Mechanical Loss of Low Qm Piezoelectric Materials**. San Emeterio Prieto, p.257-256, 1988.

ERTURK, A.; HOFFMANN, J.; INMAN, D. J. A piezomagnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting. **Journal Applied Physics Letters**, v.94, n. 25. Estados Unidos, 2009.

ERTURK, A., INMAN, D. J. An Experimentally Validated Bimorph Cantilever Model for Piezoelectric Energy Harvesting From Base Excitations. **Smart Materials and Structures**, v. 18, p. 1-18, 2009.

FERREIRA, André Luiz Gomes. **Plataforma energética a partir de discos piezoelétricos**. 2015, 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia da Computação) - Centro Universitário de Brasília, Curso de Engenharia da Computação, Brasília, 2015.

FOX, Robert F.; PRITCHARD Philip J.; MCDONALD, Alan T. Conceitos fundamentais. In: _____. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 7^o ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. capítulo 2, p. 18-42.

FUJITSU LABORATORIES LTD. **Paves the way toward widespread energy harvesting, generating self-sufficient power from the surrounding environment.** 2010. Disponível em: <<http://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2010/1209-01.html>>. Acesso em: 01 set. 2017.

GALHARDI, Marcela Antunes. **Guia de power harvesting: história, evolução e fundamentos.** 2010. 168 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Curso no Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, 2010.

GAVINO, N. A. **Energia Eólica: uma análise dos incentivos à produção (2002-2009).** Rio de Janeiro: Instituto de Economia, 2011. 117 p.

GIACOMELLO, A.; PORFIRI, M. Underwater energy harvesting from a heavy flag hosting ionic polymer metal composites. **Jornal Applied Physics**, Estados Unidos, v. 109, ed. 8, n. 084903, fev./abr. 2011.

GUYOMAR, D.; LALLART, M. Recent Progress in Piezoelectric Conversion and Energy Harvesting Using Nonlinear Electronic Interfaces and Issues in Small Scale Implementation. **Jornal Micromachines**. França, v. 2, p. 274-294, jun. 2011.

HALLIDAY, David; RESNICK, Jearl Walker. Oscilações. In: _____. **Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. cap. 15, p. 88-106.

HALLIDAY, David; RESNICK, Jearl Walker. Corrente e Resistência. In: _____. **Fundamentos de física: eletromagnetismo.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. cap. 26, p. 133-151.

IKEDA, Takuro. Thermodynamic aspects of electromechanical interaction and piezoelectric relations. In: _____. **Fundamentals of piezoelectricity.** University Tohoku, Japan, 1990, cap. 2, p. 06-50.

ILIUK, Itamar. **Análises de um Sistema de Captura de Energia Piezoelétrico Não Linear e Não Ideal Utilizando-se uma Estrutura Aporticada.** 2016. 147 f. Tese (Doutor em Ciências) – Universidade de São Paulo, Curso de Pós-Graduação Politécnico, São Paulo, 2016.

INMAN, D. J.; CUDNEY, H. H. Structural and Machine Design Using Piezoceramic Materials: a Guide for Structural Design Engineers. **NASA Langley Research Center.** Estados Unidos, p. 02-28, ab. 2000.

JIA, Y.; SESHIA, A. A. **An auto-parametrically excited vibration energy harvester.** *Sensors and Actuators A* 220 (2014), 69–75.

KARTHIKEYAN, V.; MANIARASAN, P.; BHARATH, M.R. Wind Energy Harvesting from Flapping Leaf Generator. **Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)**, v. 1, 3 ed., 2014.

KIM, Sunhee et al. Realistic Circuit Model of an Impact-Based Piezoelectric Energy Harvester. **Journal of Semiconductor Technology and Science**, v.15, n.5, 2015.

KIM, Hyunuk; TADESSE, Yonas; PRIYA, Shashank. Piezoelectric Energy Harvesting. In: PRIYA, Shashank; INMAN, Daniel J. **Energy Harvesting Technologies**. Blacksburg: Springer US, 2009. cap. 1. p. 03-13.

KONG, Ling Bing et al. Waste Mechanical Energy Harvesting (I): Piezoelectric Effect. In: BING, Ling et al. **Waste Energy Harvesting**. Berlin Heidelberg: Springer US, 2014. cap 2. p. 19-133.

LEDPLANET. **Lúmens e Watts?** Como escolher corretamente lâmpadas econômicas LED. 2016. Disponível em: <<http://www.ledplanet.com.br/blog/lumens-e-watts-como-comprar-lampadas-economicas-led/>>. Acesso em 20 nov. 2017.

LI, S.; LIPSON, H. **Vertical-stalk flapping-leaf generator for wind energy harvesting**. In: ASME Conference on Smart Materials. Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS, September 21-September 23, Vol. 2, American Society of Mechanical Engineers, 2009.

LI, S.; YUAN, J.; LIPSON, H. **Ambient wind energy harvesting using cross flow fluttering**. Journal of Applied Physics, 109(2), 2011 Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.3525045>>. Acesso em 01 de nov. de 2017.

LIMA, Washington Batista. **Transdutores de deformação a base de sensores piezoelétricos**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Niterói, 2013.

LOPES , A.C.; MARTINS, P.; LANCEROS-MENDEZ, S. **Polímeros piezoelétricos: características, aplicações, perspectivas**. Publicado e gazeta de física, 2014. Disponível em: <<https://www.spf.pt/magazines/GFIS/115/article/937/pdf>>. Acesso em 20 de nov. de 2017.

MEAS. **LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch**. Measurement Specialties, 2008. Disponível em: <www.meas-spec.com>. Acesso em 15 out de 2017

MINETO, Andreza Tangerino. **Geração de energia através de vibração estrutural de dispositivos piezoelétricos não-lineares**. 2013. 167 f. Tese (Doutorado em Dinâmica de Máquinas e Sistemas) – Universidade de São Paulo, Curso de Pós-Graduação em Ciências, Rio Claro (SP), 2012.

MOON, Frank - Cornell Chronicle. **Students harness vibrations from wind for electricity**. 2010. Disponível em: <<http://news.cornell.edu/stories/2010/05/researchers-harness-energy-wind-vibrations>>. Acesso em 20 jun. 2017.

MUCHERONI, Marcos Luiz. Vibrações mecânicas. In: _____. **Vibrações forçadas** – força harmônica. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Paulo, EESC e USP 2003. cap 3. p. 28-42.

NAKASHIMA, Kazuo. **Valor médio e eficaz**. 2013 Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/kazuonakashima3/rms-27746406>>. Acesso em 01 de nov. 2017.

NOGUEIRA, Cícero Urbanetto. **Utilização de sistema solar e eólico no bombeamento de água para uso na irrigação**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -

Universidade Federal de Santa Maria, Curso de pós graduação em Engenharia de Produção, Santa Maria, 2009.

ORREGO, Santiago et al. **Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag**. Applied Energy v. 194, p. 212–222, 2017.

PALACIOS-FELIX, Jorge Luis. **Teoria de Sistemas Vibratórios Aporticados Não-Lineares e Não-Ideias**. 2002. 205f. Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas – SP, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Campinas (SP), 2002.

PALACIOS-FELIX, Jorge Luis et al. **Um novo protótipo de gerador piezoeletrico de energia sujeito a uma excitação não-ideal e modos de saturação**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2014.

PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas piezoeletricas: funcionamento e propriedades**. ATCP Engenharia Física. [s. n.], ATCP Engenharia Física, São Carlos, 2010.

PERLINGEIRO, Antônio Ramos; PIMENTA, Gilberto Maia; SILVA, Salviano Evaristo. **Geração de energia através de materiais piezoeletricos**. 2016. 62f. Projeto final para obtenção do título de Bacharel (TCC em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Projeto final em Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2016.

PORTAL ENERGIA. **Energias Renováveis**. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com>>. Acesso em: 20 de jun. de 2017.

PRIYA, S.; INMAN, D.J. **Energy Harvesting Technologies**. Springer Science Business Media, LLC, 2009. Disponível em: . Acesso em 01 de nov. de 2017.

RAO, Singeruso S. Vibrações mecânicas. In: _____. **Fundamentos de vibrações**. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. cap 1. p. 01 – 47.

RAO, Singeruso S. Vibrações mecânicas. In: RAO, Singeruso S. **Vibração excitada harmonicamente**. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. cap 3, 8 e 10. p. 101 – 139, p. 272 – 304 e p. 344 – 375.

RIDDEN, Paul. **Power Flowers to domesticate wind turbines**. 2011. Disponível em: <<https://newatlas.com/power-flowers-project-aims-to-bring-wind-turbines-closer-to-home/18049/>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

ROCHA, Rodrigo Tumolin. **Comportamento Dinâmico Não-Linear em Fenômenos de Colheita de Energia usando Dispositivos baseados em Materiais Piezoeletricos em Estruturas Aporticadas**. 2014. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Paulo, 2014.

ROCHA, Rodrigo Tumolin. **Colheita de energia usando dispositivos baseados em materiais piezoeletrico**. 2012. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Geociências e Ciências

Exatas). Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho, Curso de Graduação em Física, Rio Claro (SP), 2012.

ROSSI, P. H.; OLIVEIRA, C. P. **Perguntas Frequentes sobre Energia Eólica** (PUC-RS). Disponível em:

<<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php>>. Acesso em: 01 de abr. de 2017.

SCHONARTH, A. e PALACIOS-FELIX, J. L. **Estudo da conversão de energia usando dispositivos baseados em materiais piezo-elétrico apoiados em plataformas apórticadas**. VII Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica, Erechim, 2017, 4 pgs.

SIMAS, M.; PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Publicado em Scientific Electronic Library Online (SCIELO)**, São Paulo, vol.27, n.77, p. 1-20, set. de 2013.

SUNDARARAJAN, Visvanatha et al. **Energy Harvesting from Fluttering Membranes**. 10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology – LACCEI 2012, p. 23-27, Panamá, jul. 2012.

TICHÝ, Jan et al. Principles of Piezoelectricity. In: _____. **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials**. 1. ed., Berlin Heidelberg, 2010. p. 01-14.

THORNTON, J. J. **Design and analysis of a wind energy harvesting circuit using piezoelectric polymers**. 2011. 100 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2011.

TOLMANSQUIM, Mauricio Tiomno. Eólica. In: Souza, Gustavo Brandão Haydt. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro, 2016, cap. 4, p. 237-309.

ZUNPANO, Antônio; ERCOLA, Grey; BUENO, Hamilton. Teoria clássica do sistema massa-mola. In: _____. **Ressonância para além dos cursos de física**. Minas Gerais: UFMG, 2004, cap. 1, p. 1-8.

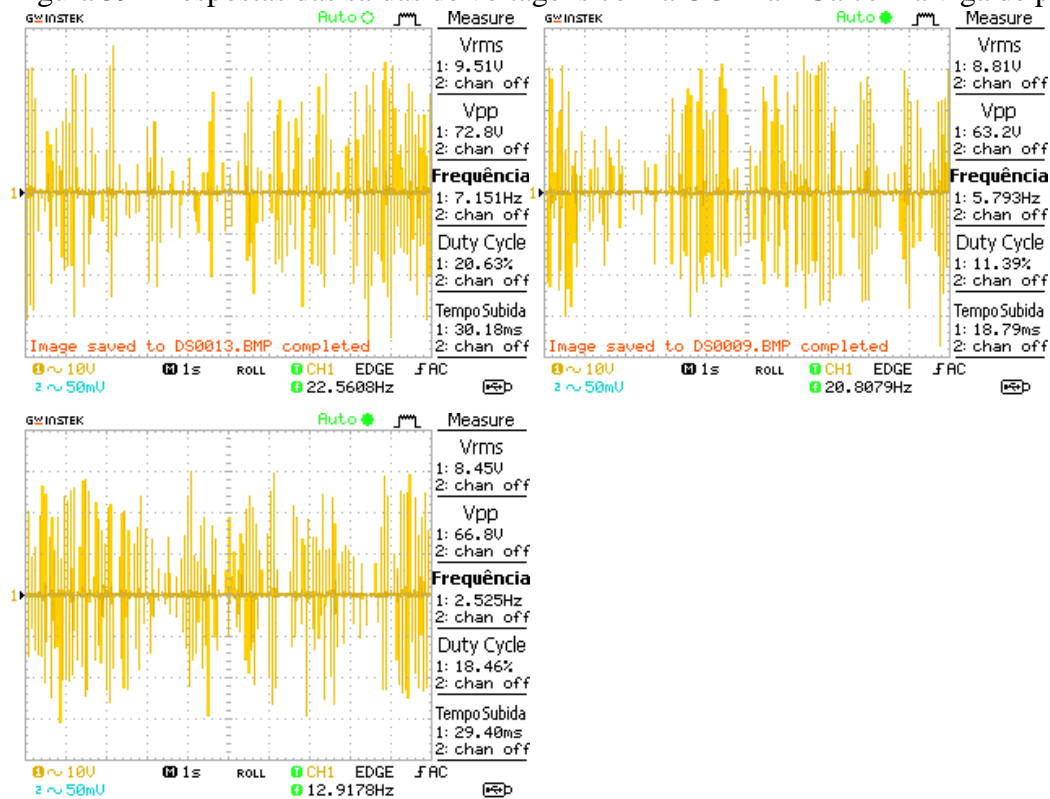
WENZEL, Guilherme München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**, 2007. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC no Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, TCC em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, 2007.

WINDTECH. **Vibro-Wind Energy Technology for Architectural Applications**. 2010. Disponível em: <<https://www.windtech-international.com/editorial-features/vibro-wind-energy-technology-for-architectural-applications>>. Acesso em: 04 jul. 2017.

ANEXOS

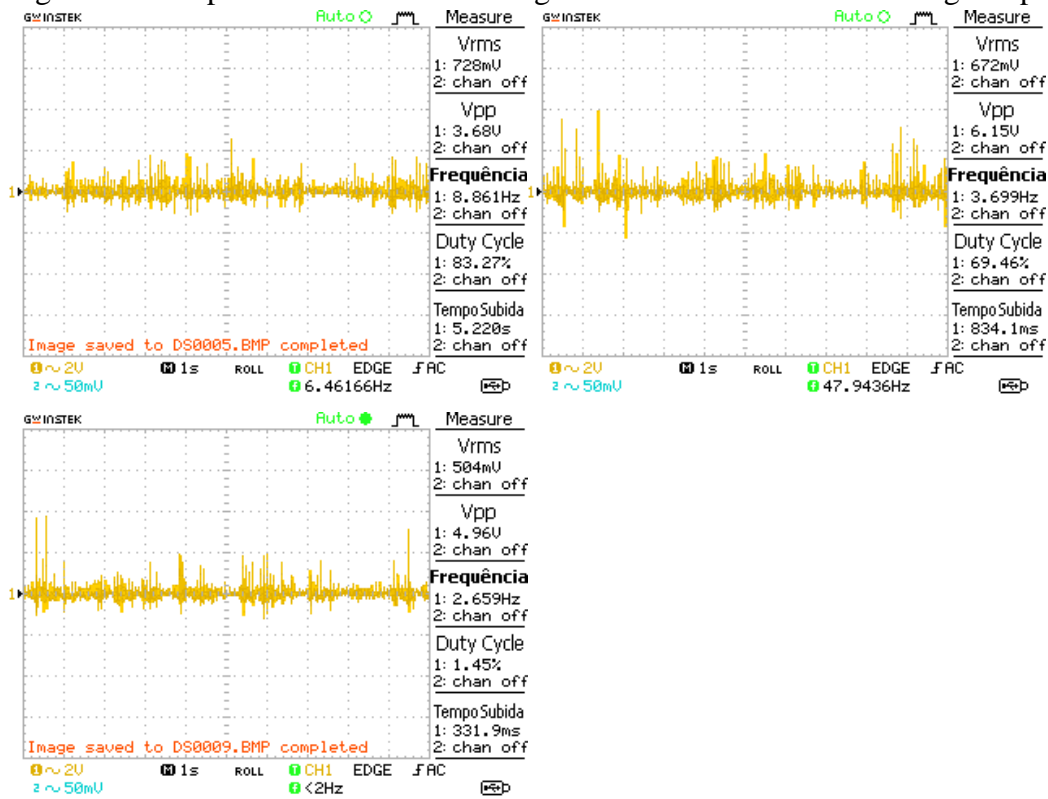
As respostas de saídas de voltagens capturadas pelo osciloscópio digital para todos os modelos experimentais efetuados nesse trabalho de conclusão de curso (TCC) são apresentados da figura 39 até a figura 74. Ademais, vale ressaltar, que o eixo vertical das figuras corresponde às voltagens em volts (V), enquanto que o eixo horizontal representa o tempo em segundos (s), através de três melhores respostas para a obtenção de resultados mais precisos.

Figura 39 - Respostas das saídas de voltagens com a CG1 na PGa com a viga de plástico na V_{v1}



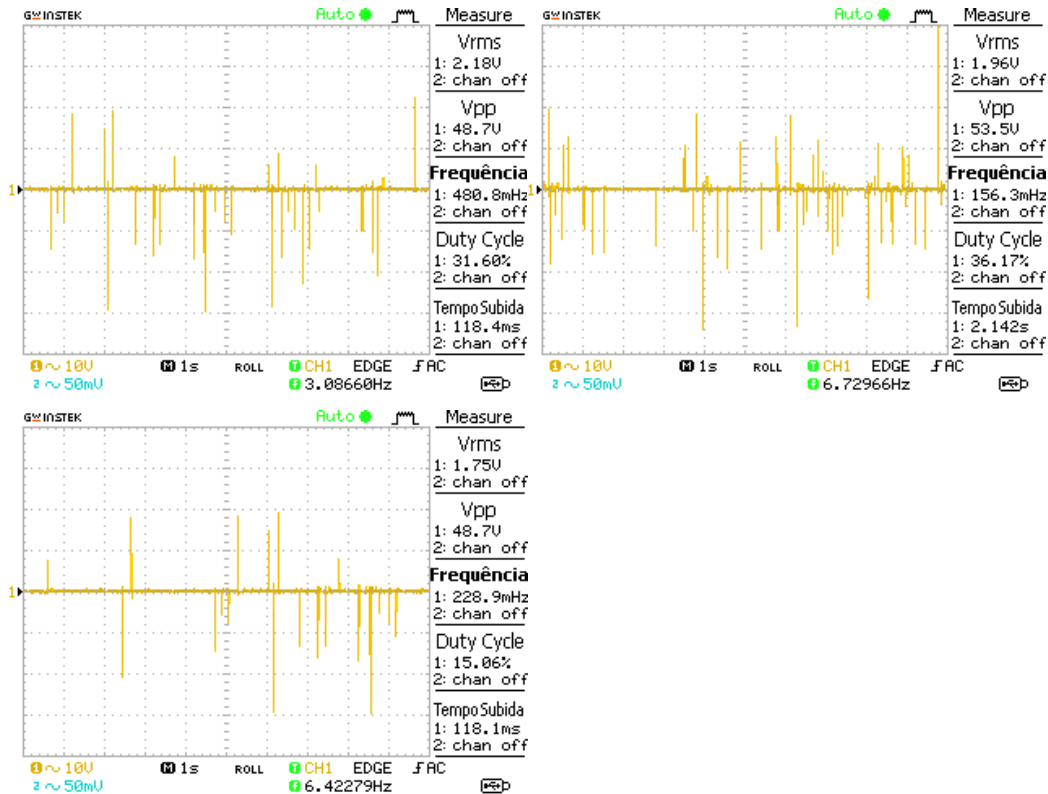
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 40 - Respostas das saídas de voltagens com CG1 na PGa com a viga de plástico na V_{v2}



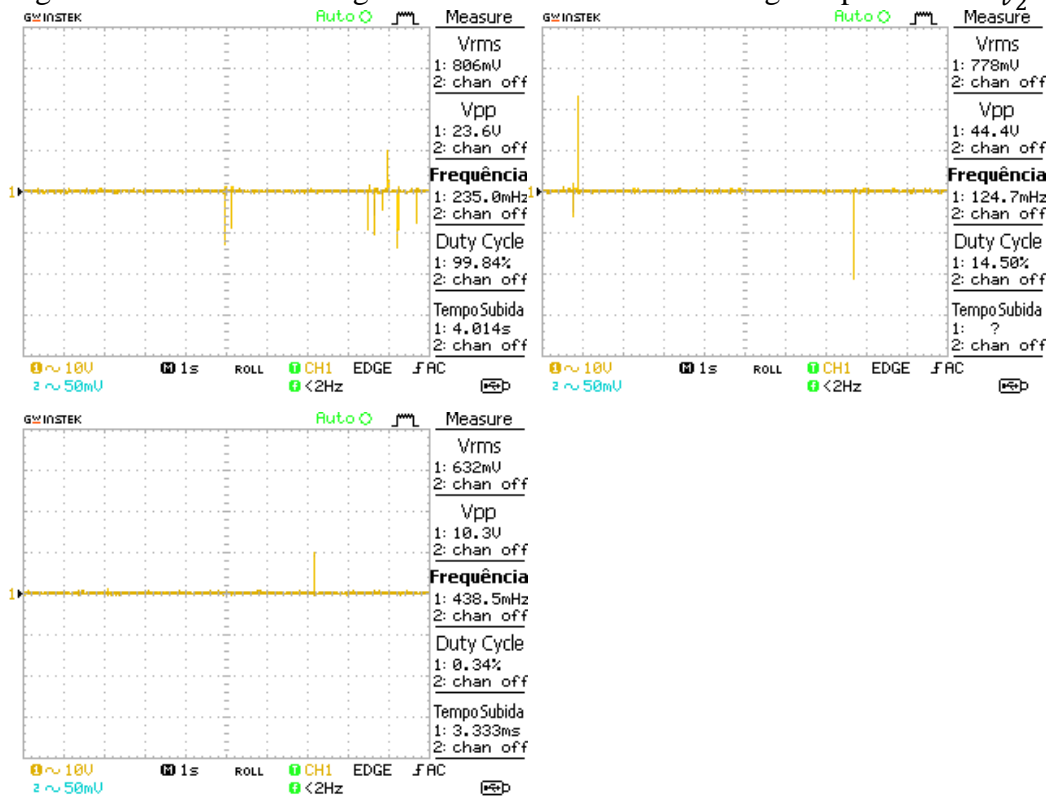
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 41 - Saídas de voltagens da CG1 na PGb com a viga de plástico na V_{v1}



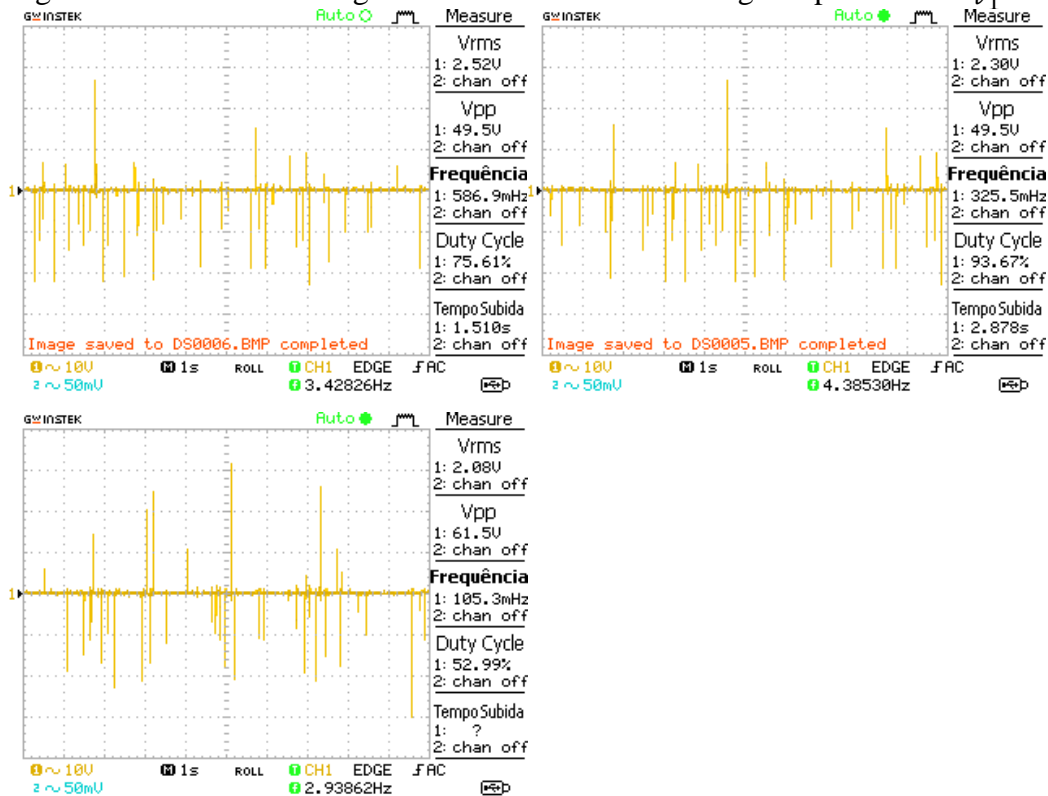
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 42 - Saídas de voltagens com CG1 na PGB com a viga de plástico na V_{v2}



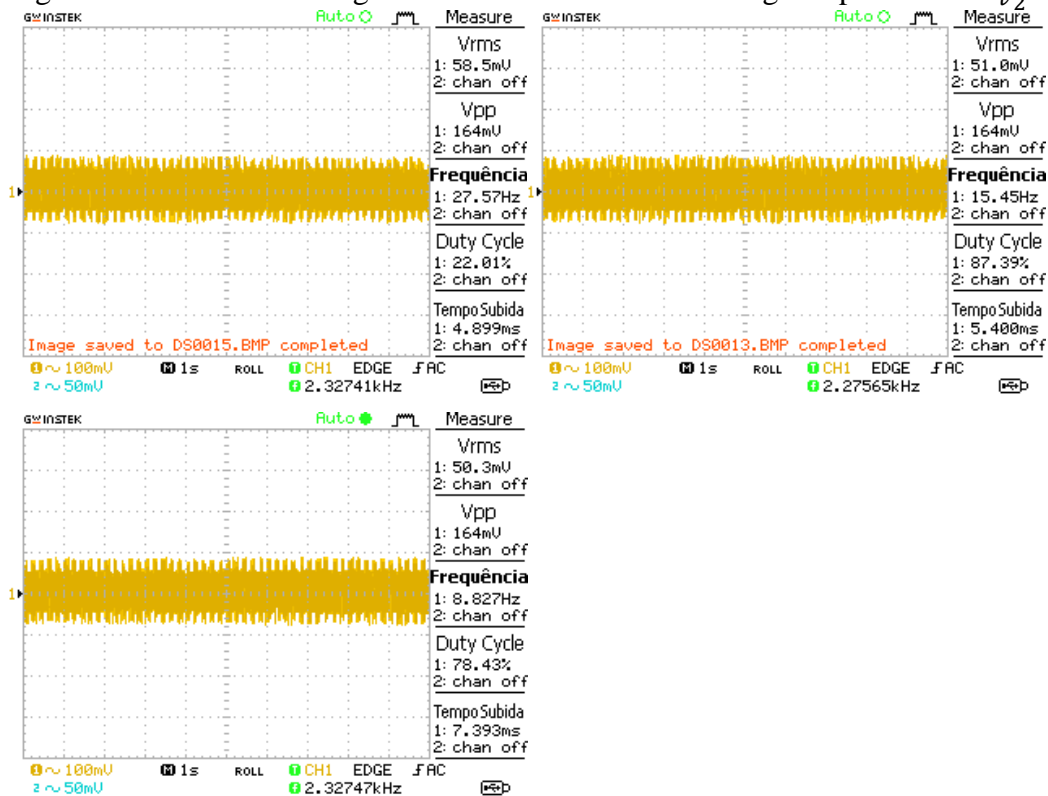
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 43 - Saídas de voltagens da CG1 na PGc com a viga de plástico na V_{v1}



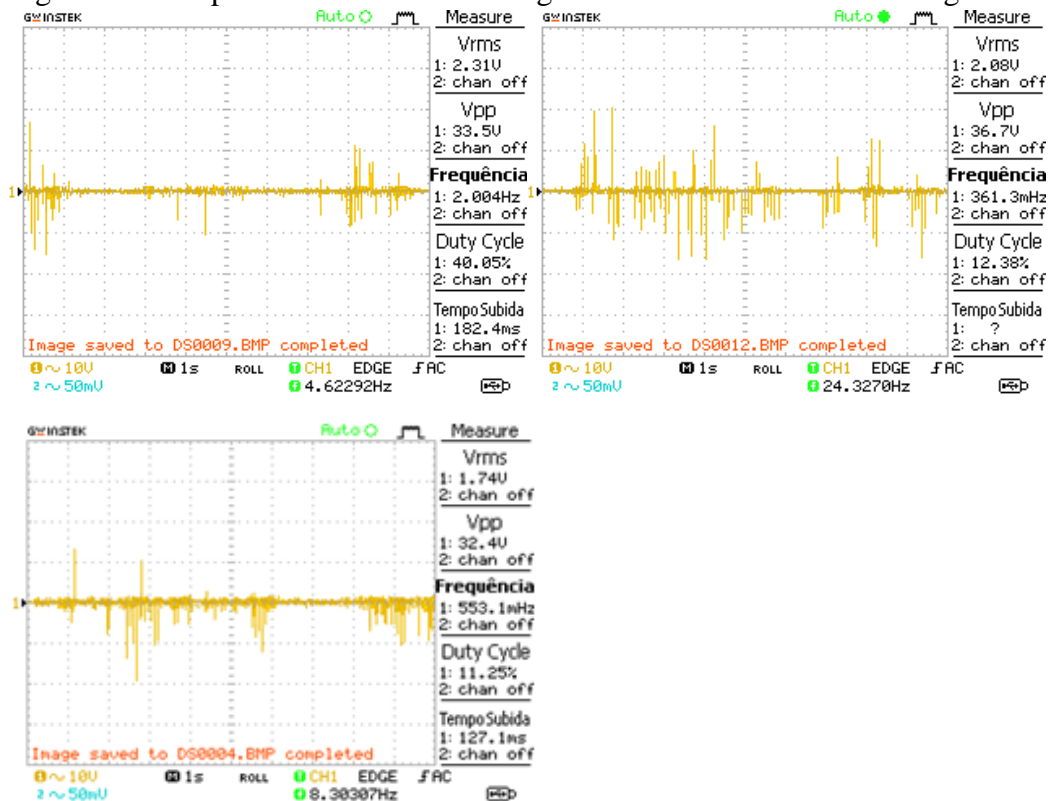
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 44 - Saídas de voltagens com CG1 na PGc com a viga de plástico na V_{v2}



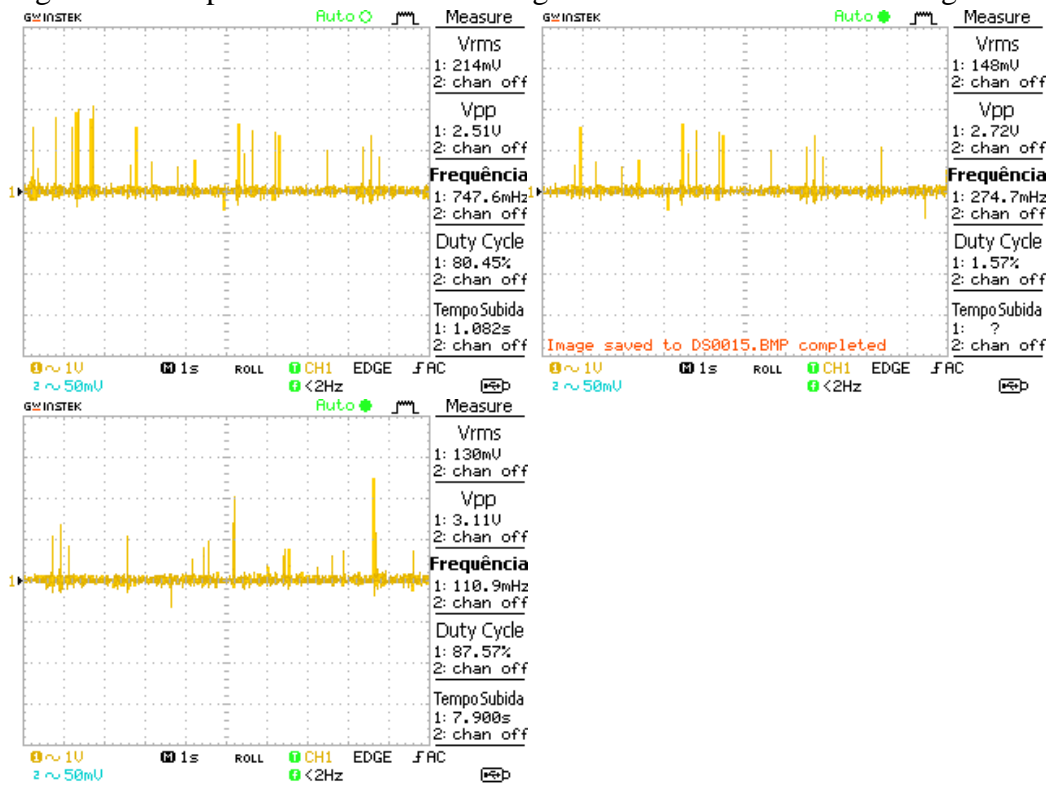
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 45 – Respostas das saídas de voltagens com CG1 na PGa com a viga de alumínio na V_{v1}



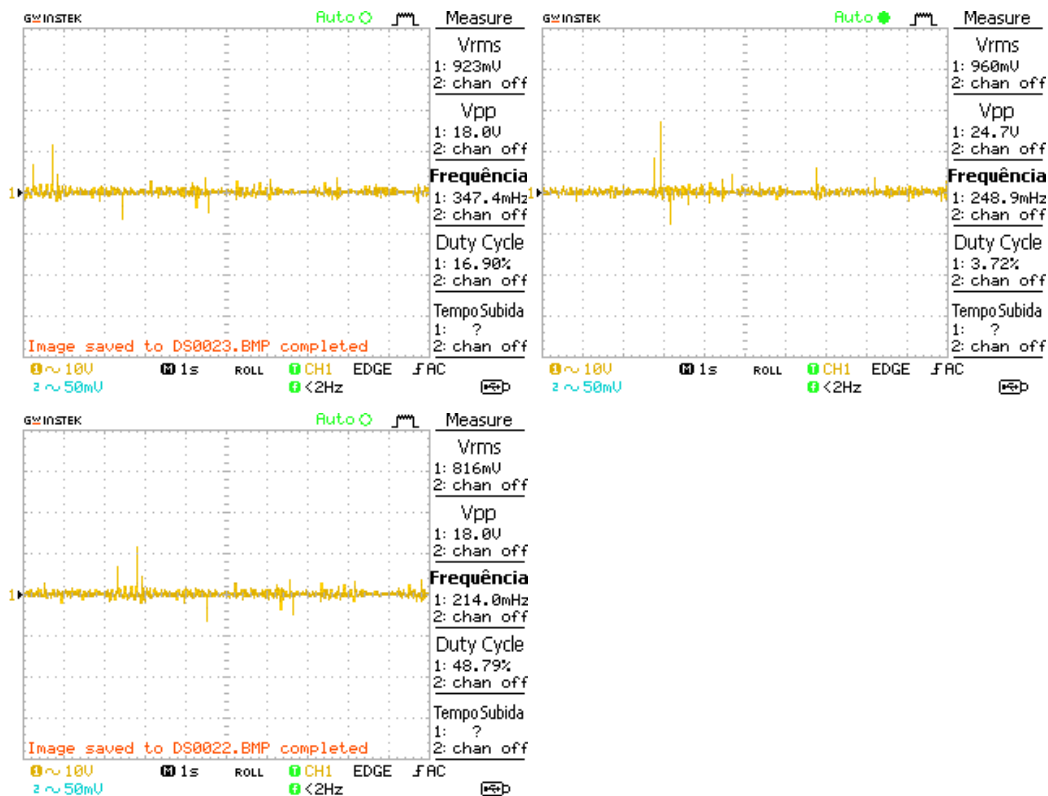
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 46 - Respostas das saídas de voltagens com CG1 na PGa com a viga de alumínio na V_{v_2}



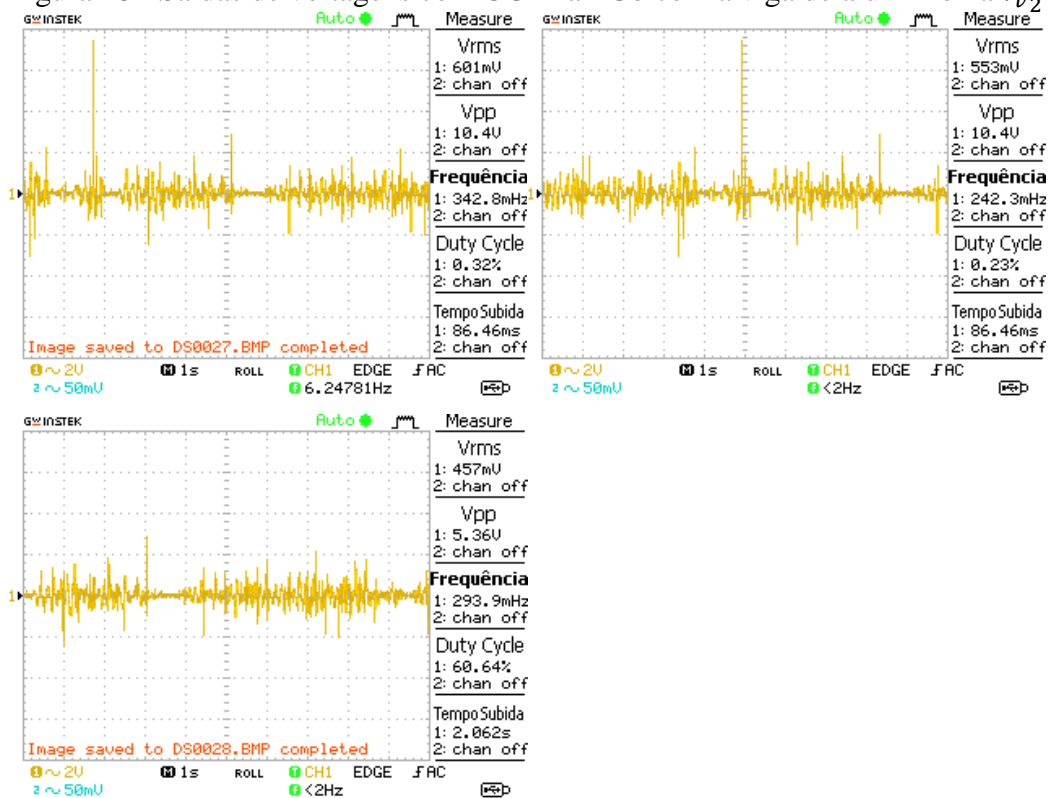
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 47 - Saídas de voltagens com CG1 na PGb com a viga de alumínio na V_{v_1}



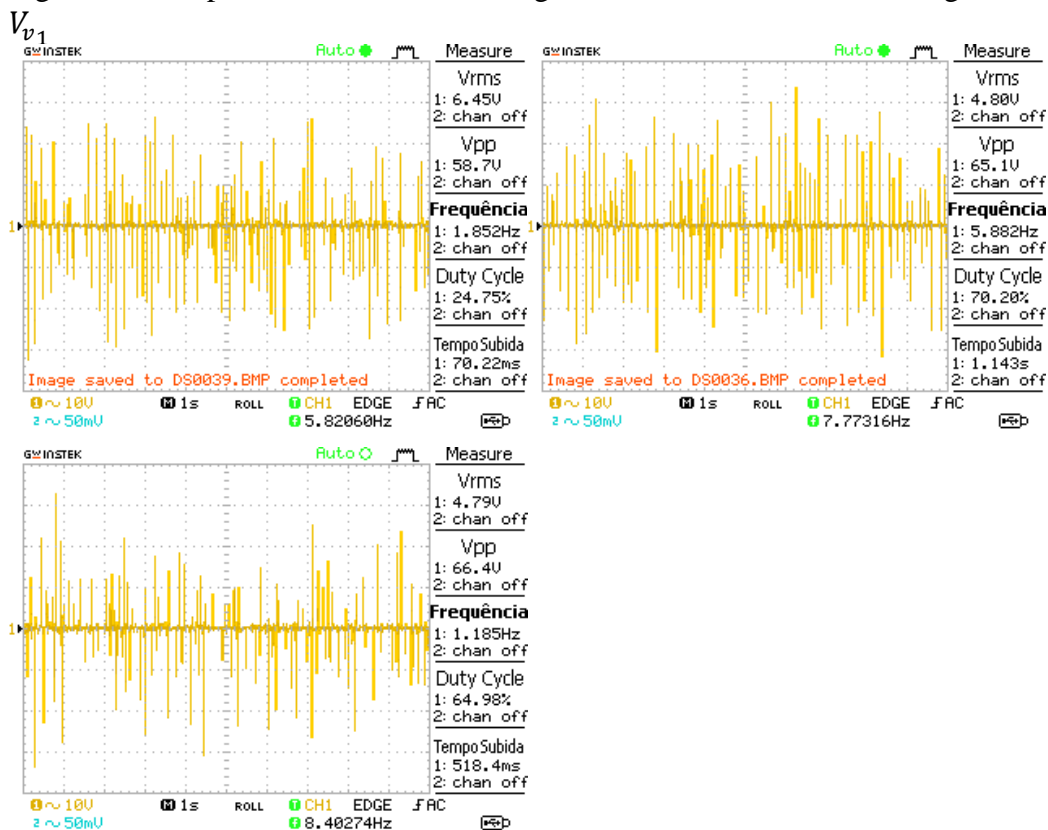
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 48 - Saídas de voltagens com CG1 na PGb com a viga de alumínio na V_{v2}



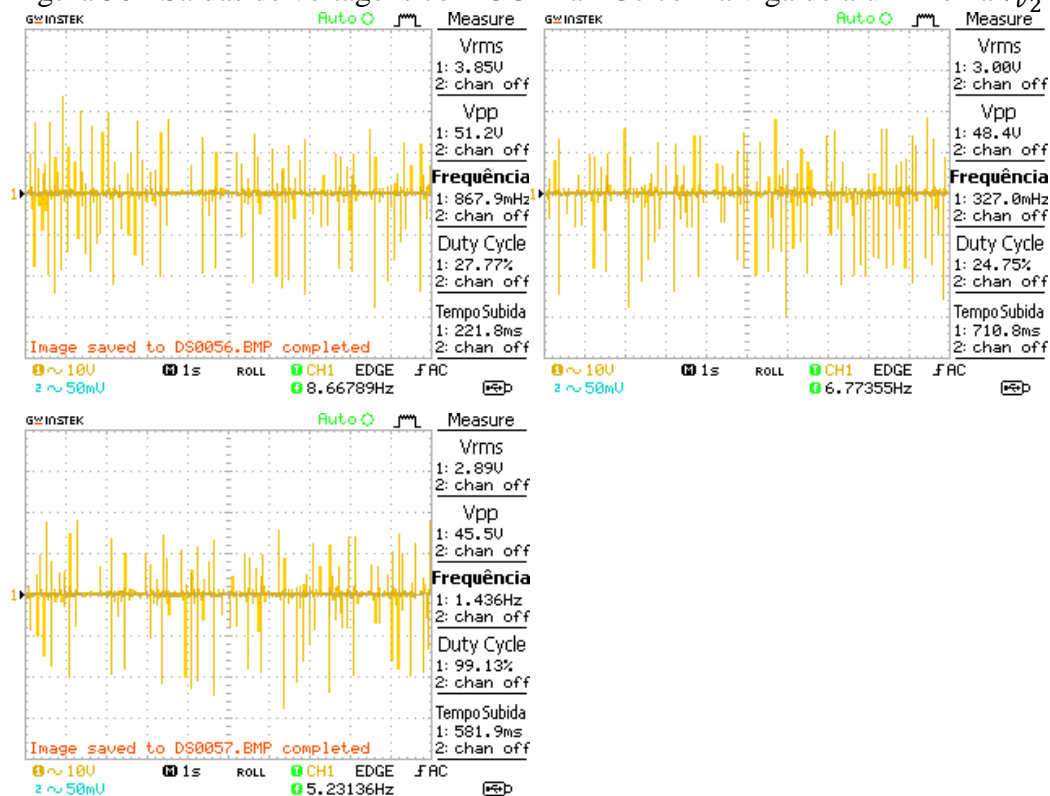
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 49 - Respostas das saídas de voltagens com CG1 na PGc com a viga de alumínio na V_{v1}



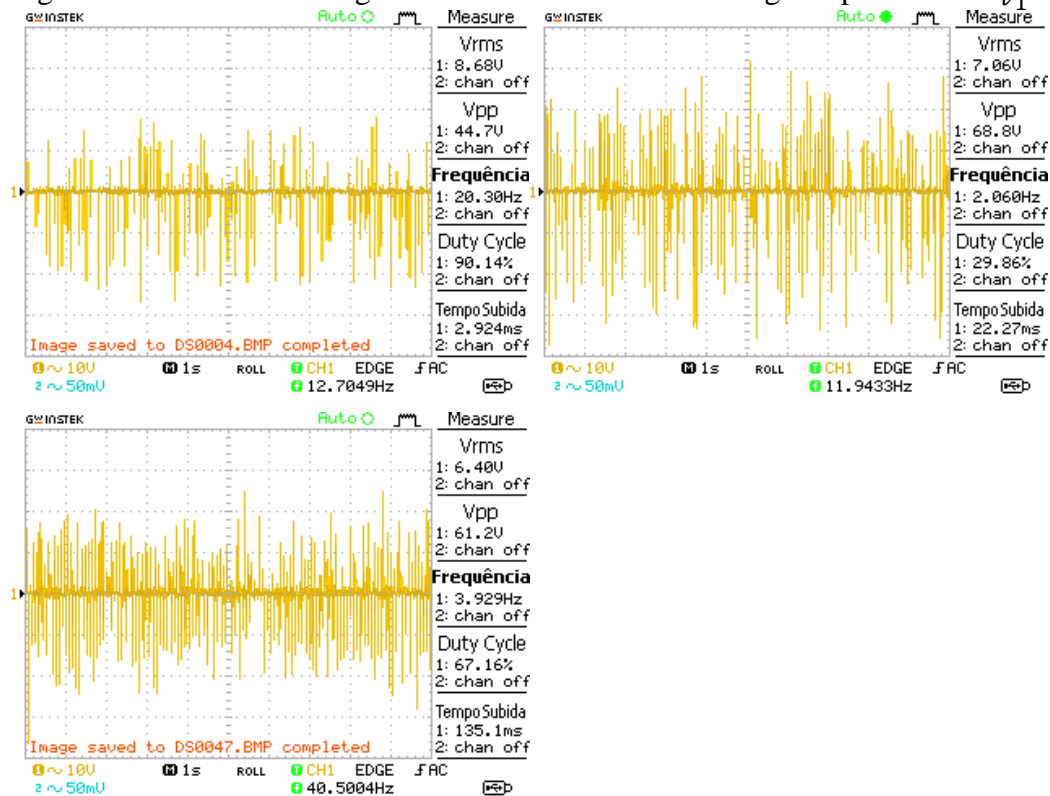
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 50 - Saídas de voltagens com CG1 na PGC com a viga de alumínio na V_{v2}



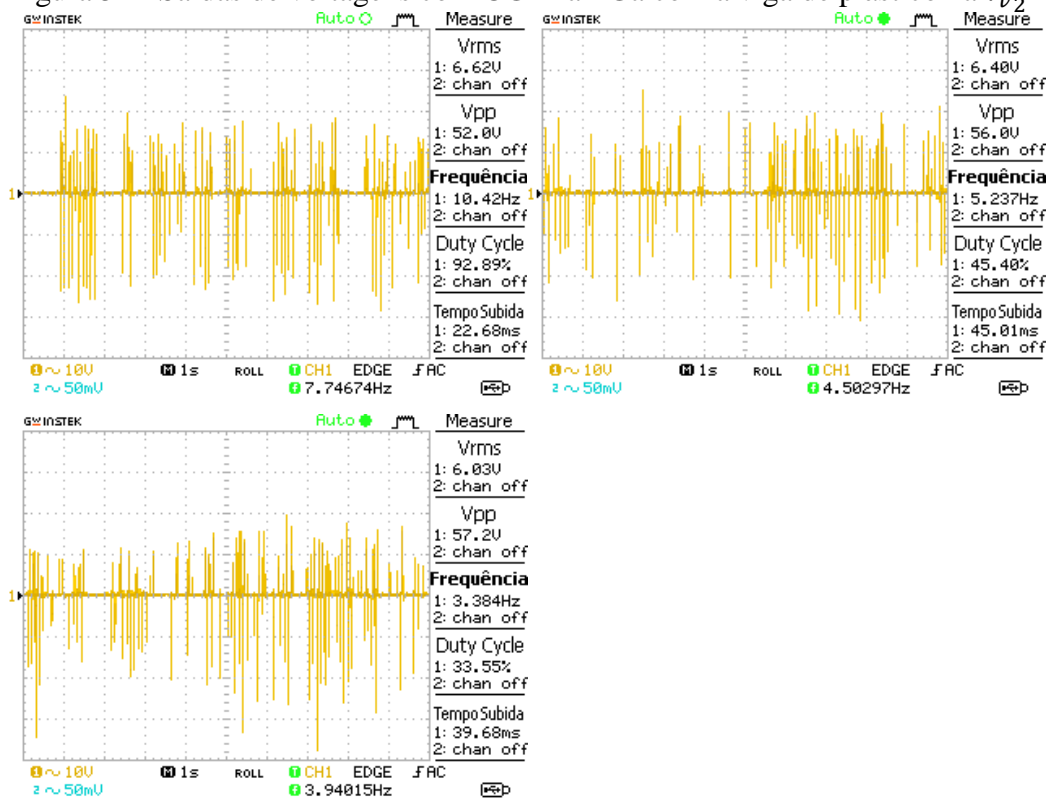
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 51 - Saídas de voltagens com CG2 na PGa com a viga de plástico na V_{v1}



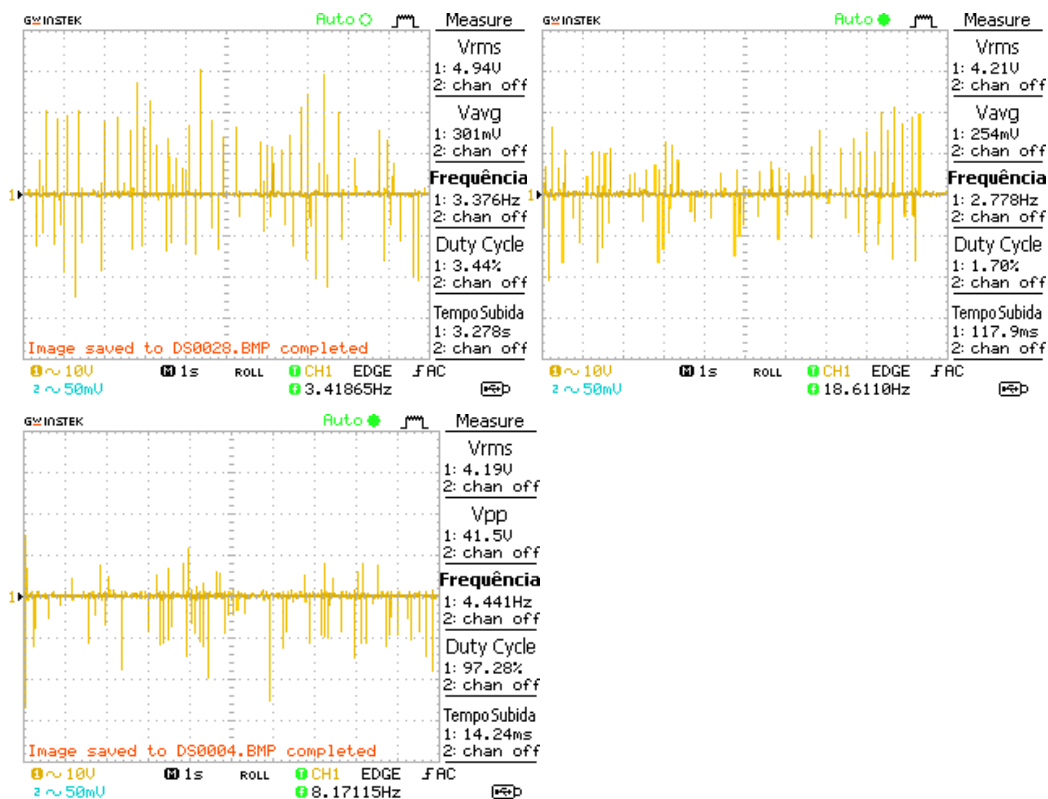
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 52 - Saídas de voltagens com CG2 na PGa com a viga de plástico na V_{v2}



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 53 - Saídas de voltagens com CG2 na PGb com a viga de plástico na V_{v1}



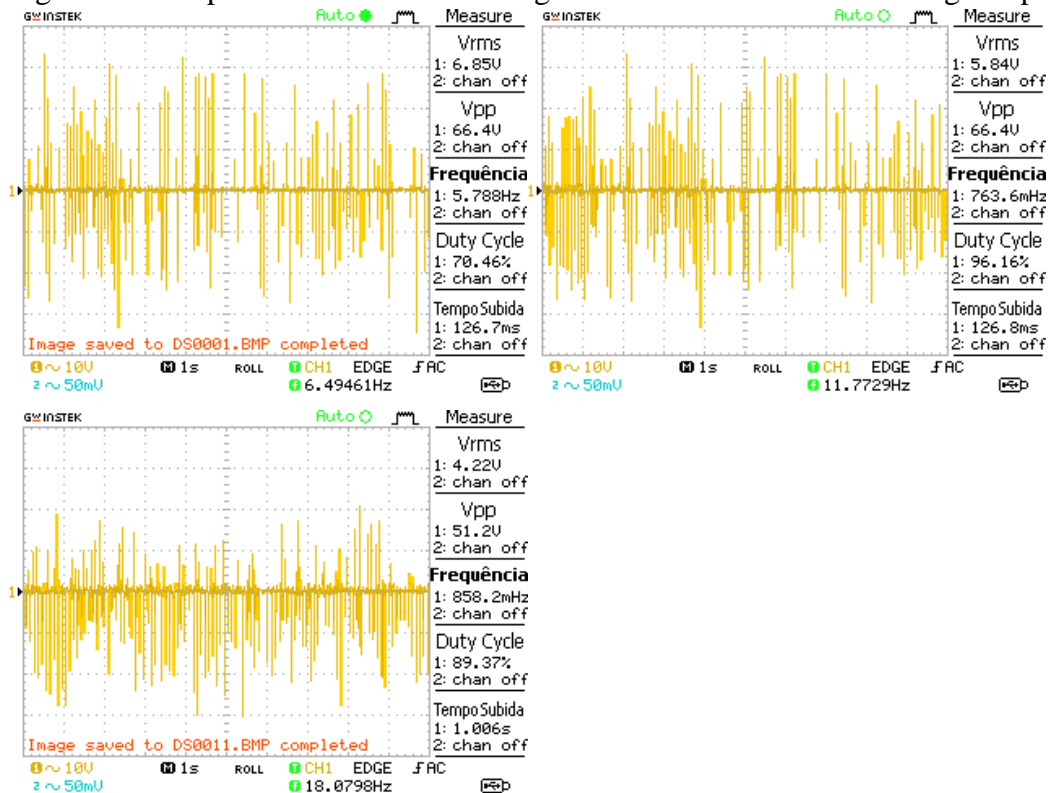
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 54 - Saídas de voltagens com CG2 na PGB com a viga de plástico na V_{v2}



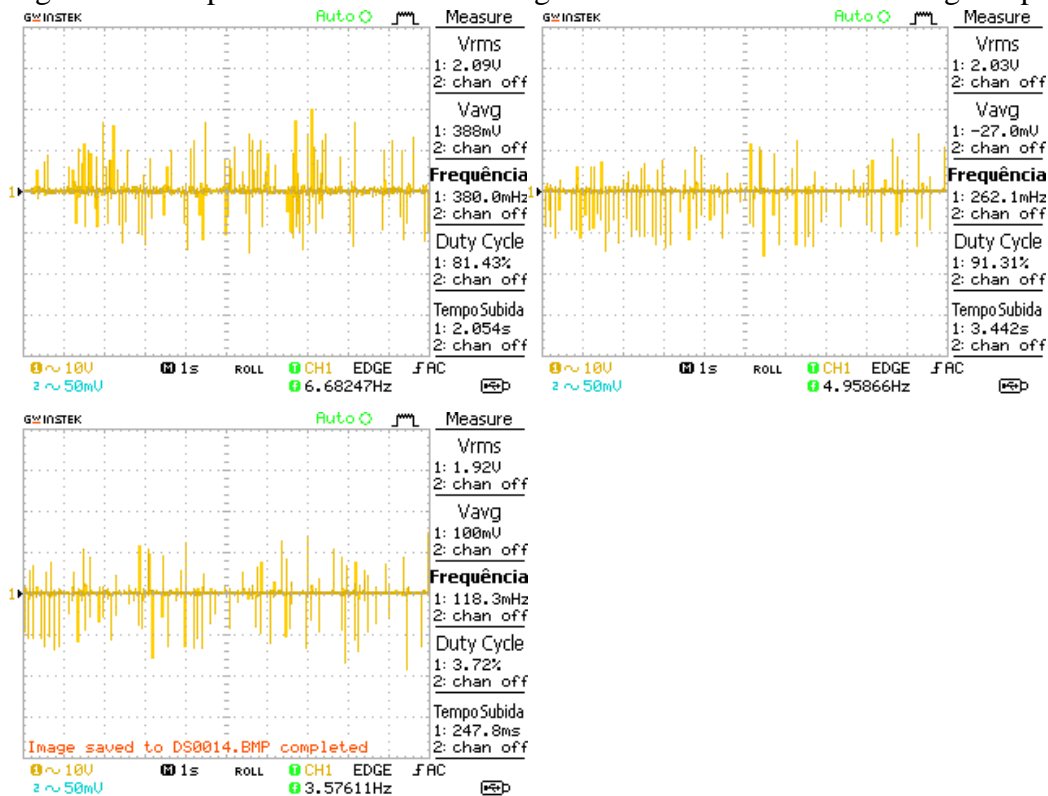
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 55 - Respostas das saídas de voltagens com CG2 na PGC com a viga de plástico na V_{v1}



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 56 - Respostas das saídas de voltagens com CG2 na PGc com a viga de plástico na V_{v2}



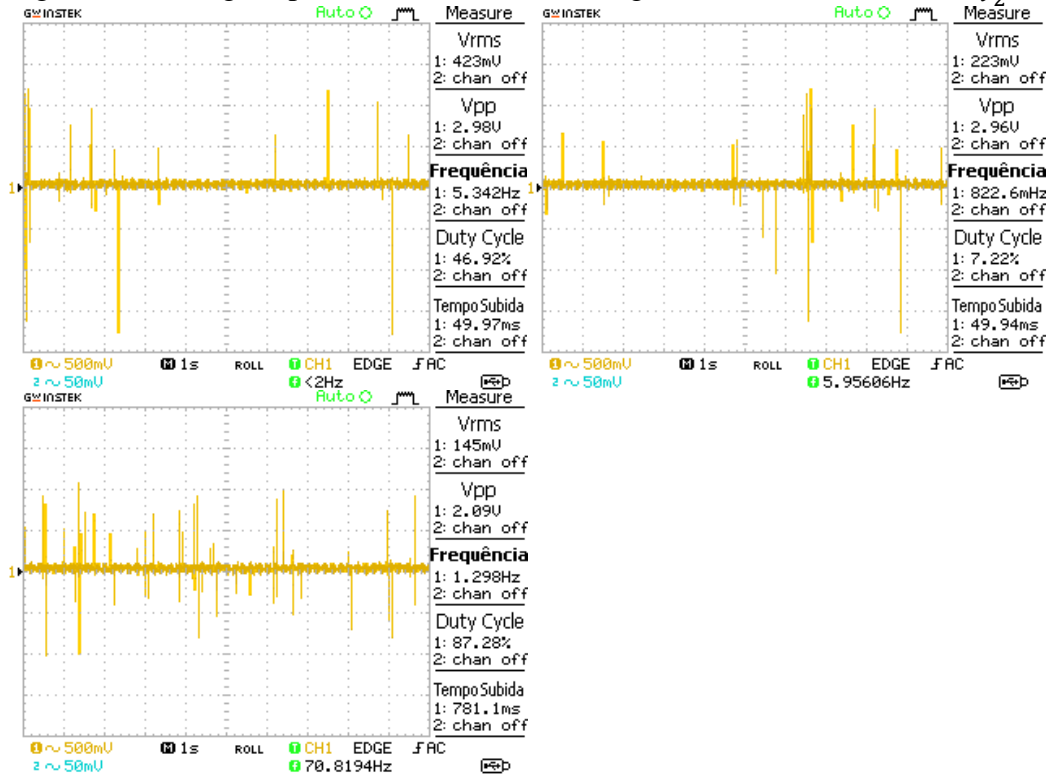
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 57 - Respostas das voltagens pela CG2 na PGa com a viga de alumínio através da V_{v1}



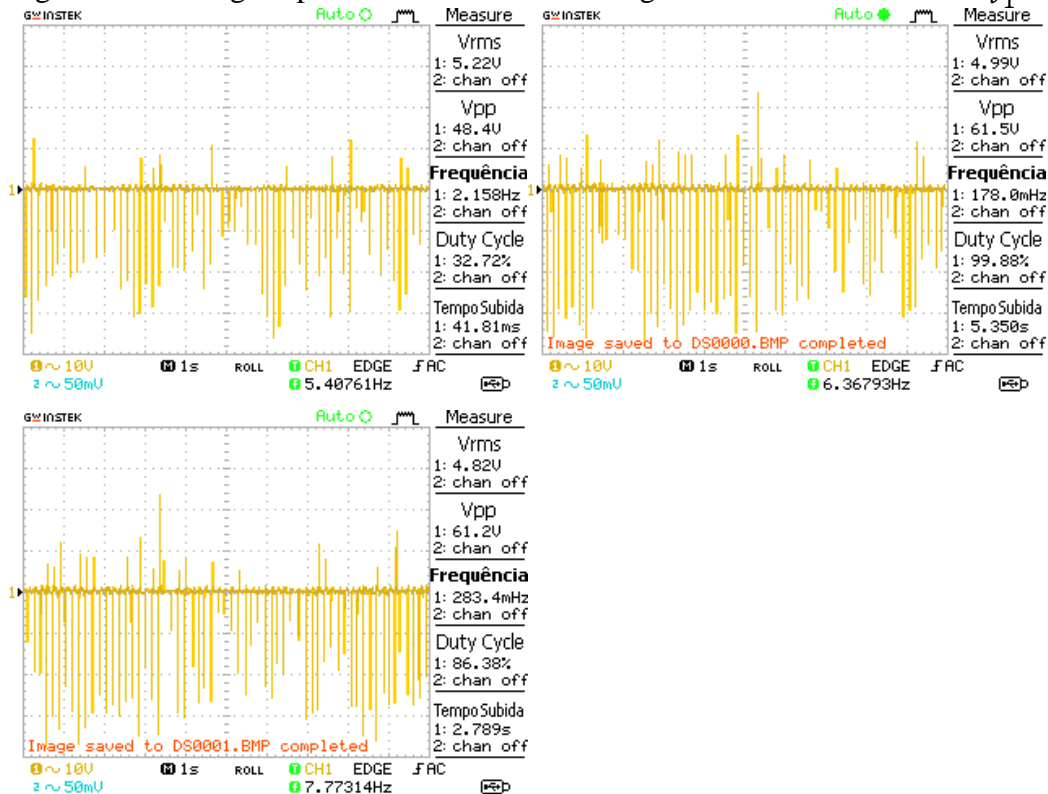
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 58- Voltagens pela CG2 na PGa com a viga de alumínio através da V_{v2}



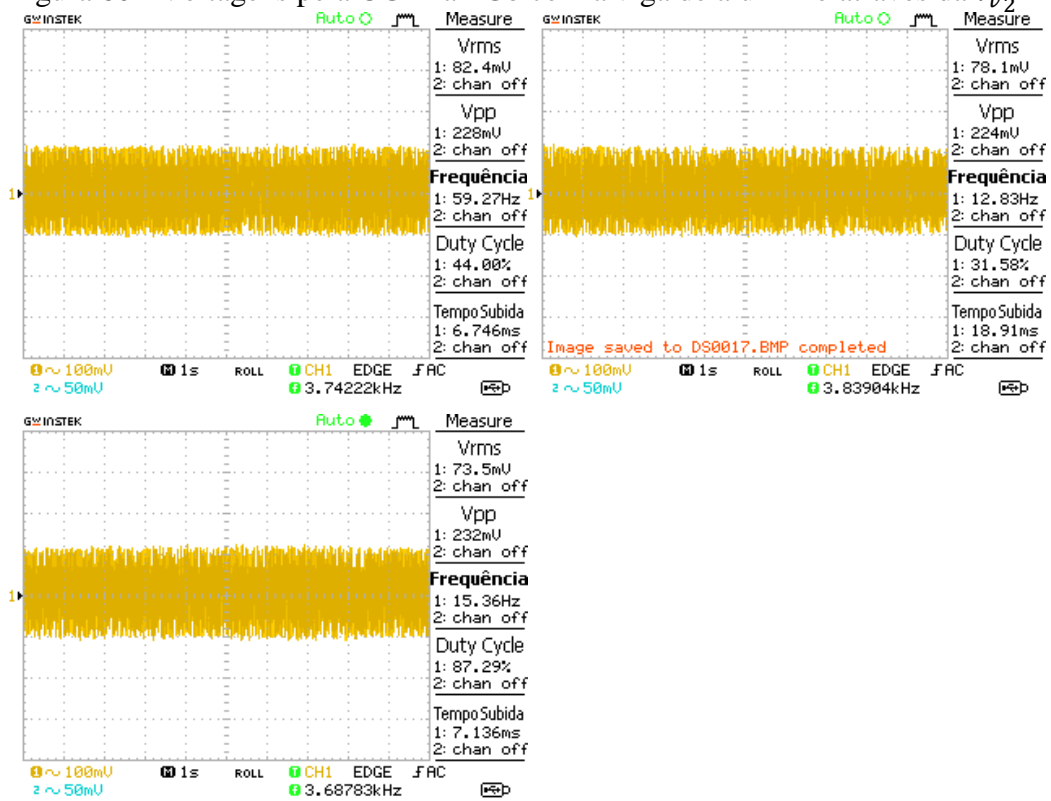
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 59 - Voltagens pela CG2 na PGb com a viga de alumínio através da V_{v1}



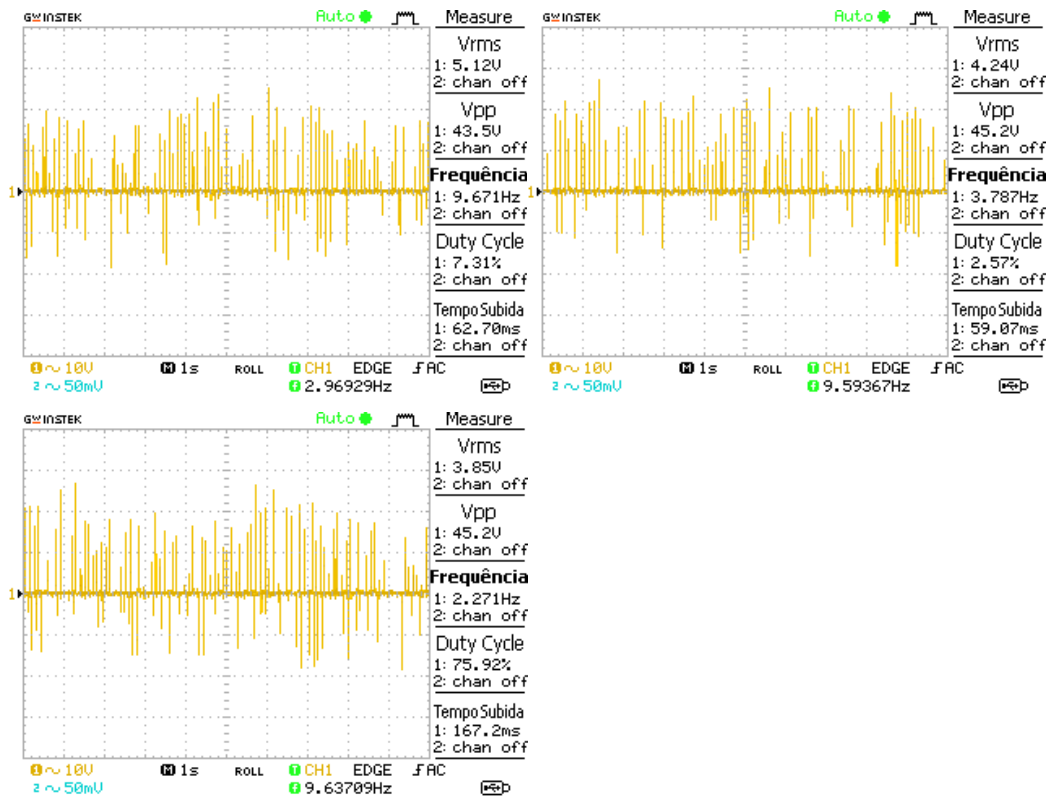
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 60 - Voltagens pela CG2 na PGB com a viga de alumínio através da V_{v2}



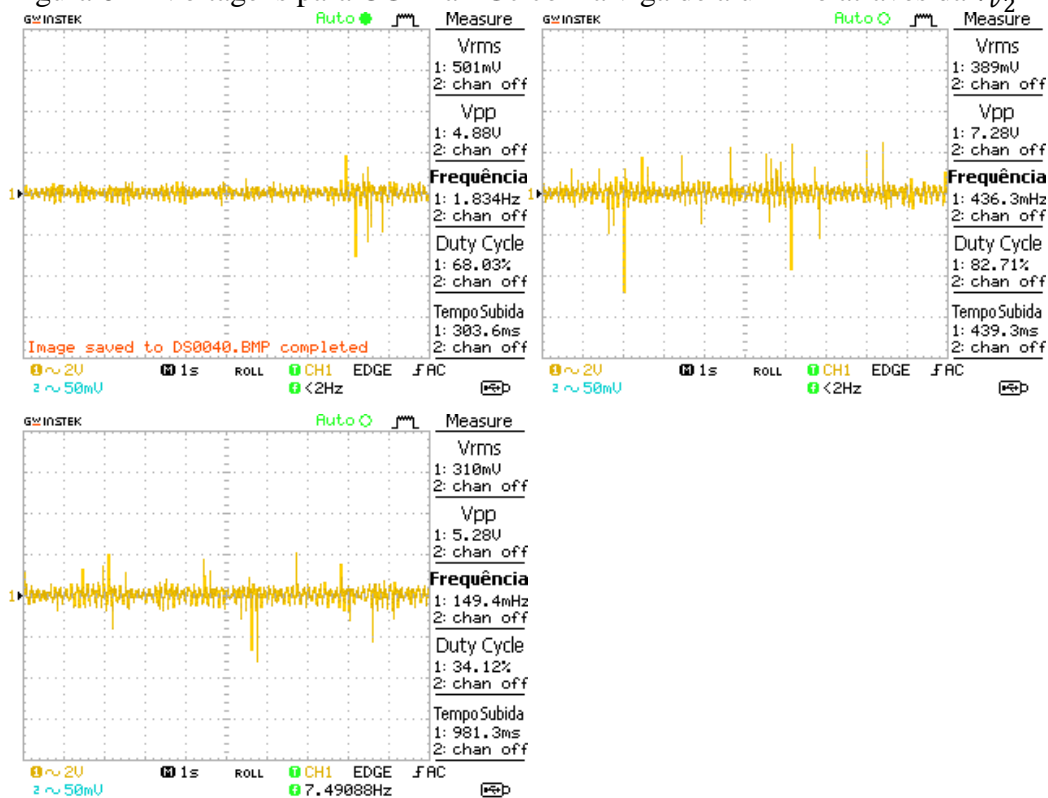
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 61 - Saídas de tensão para CG2 na PGc com a viga de alumínio através da V_{v1}



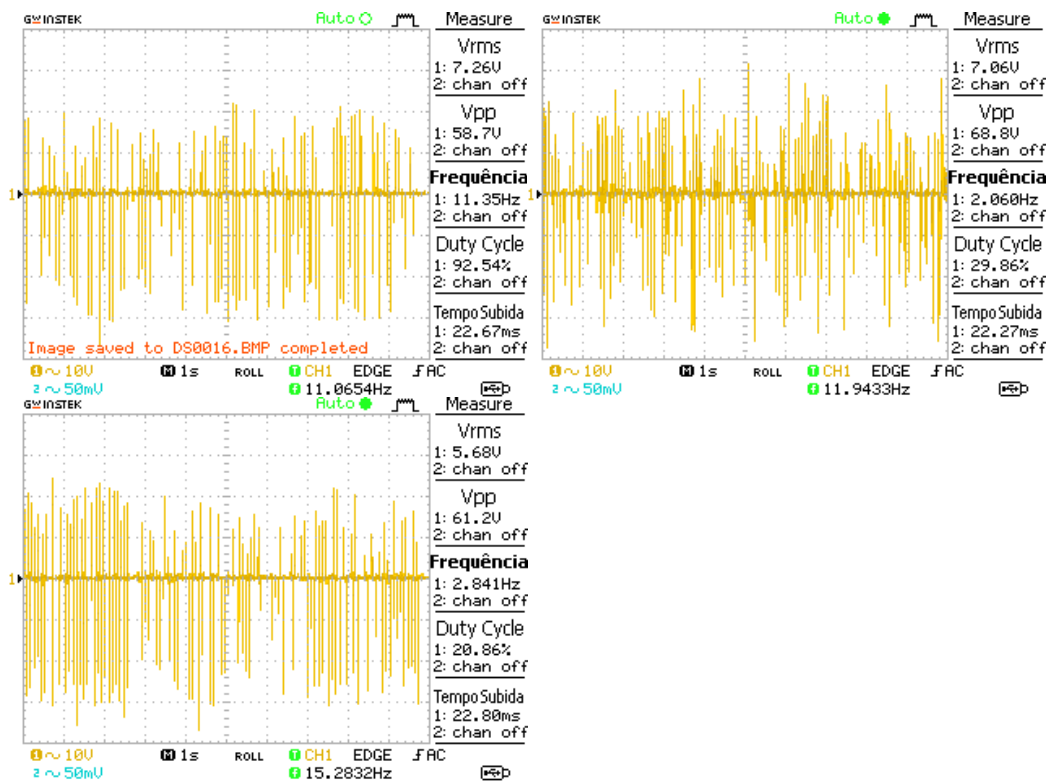
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 62 - Voltagens para CG2 na PGC com a viga de alumínio através da V_{v2}



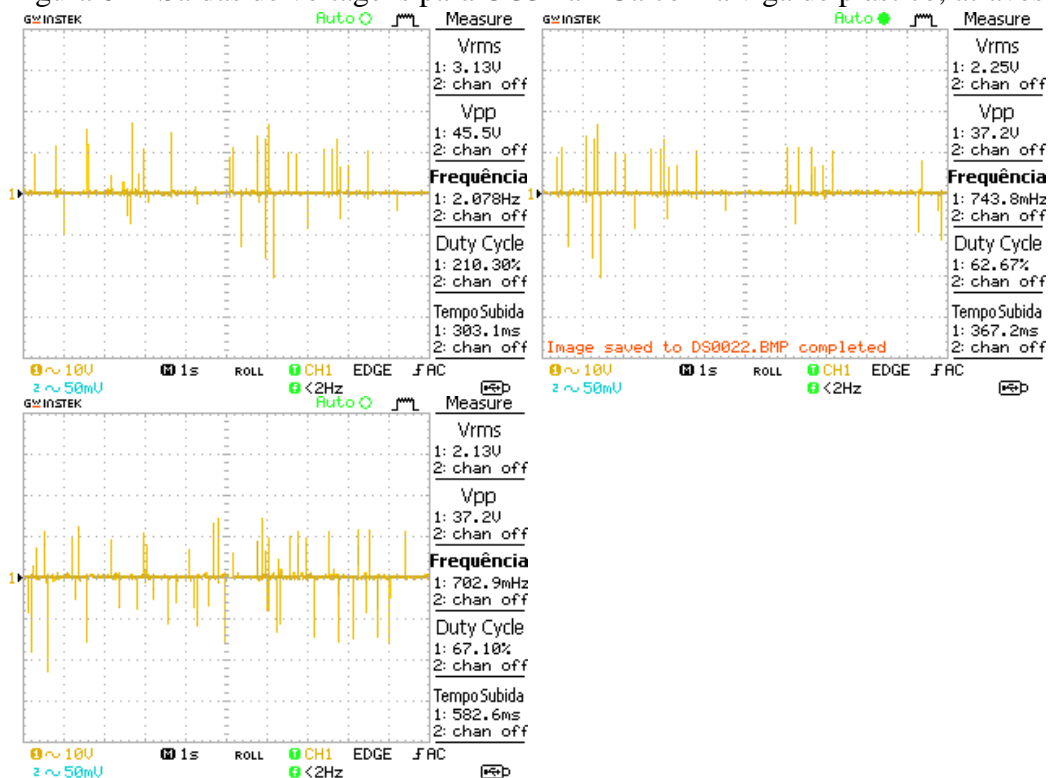
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 63 - Voltagens para CG3 na PGA com a viga de plástico através da V_{v1}



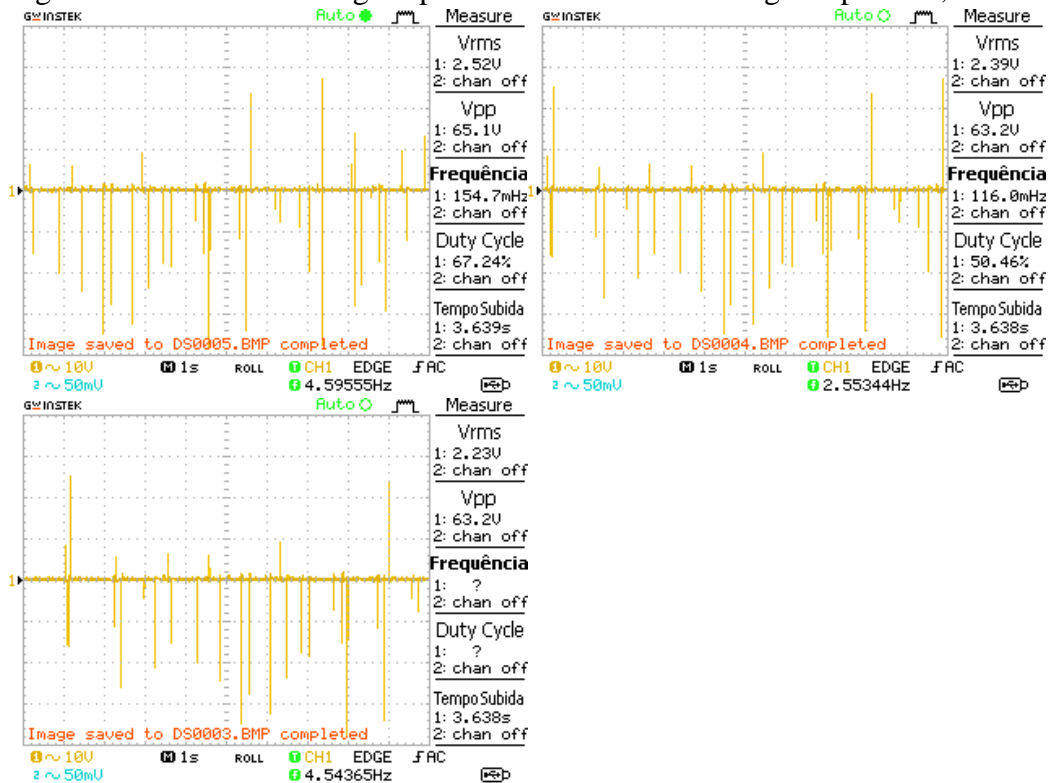
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 64 - Saídas de voltagens para CG3 na PGa com a viga de plástico, através da V_{v2}



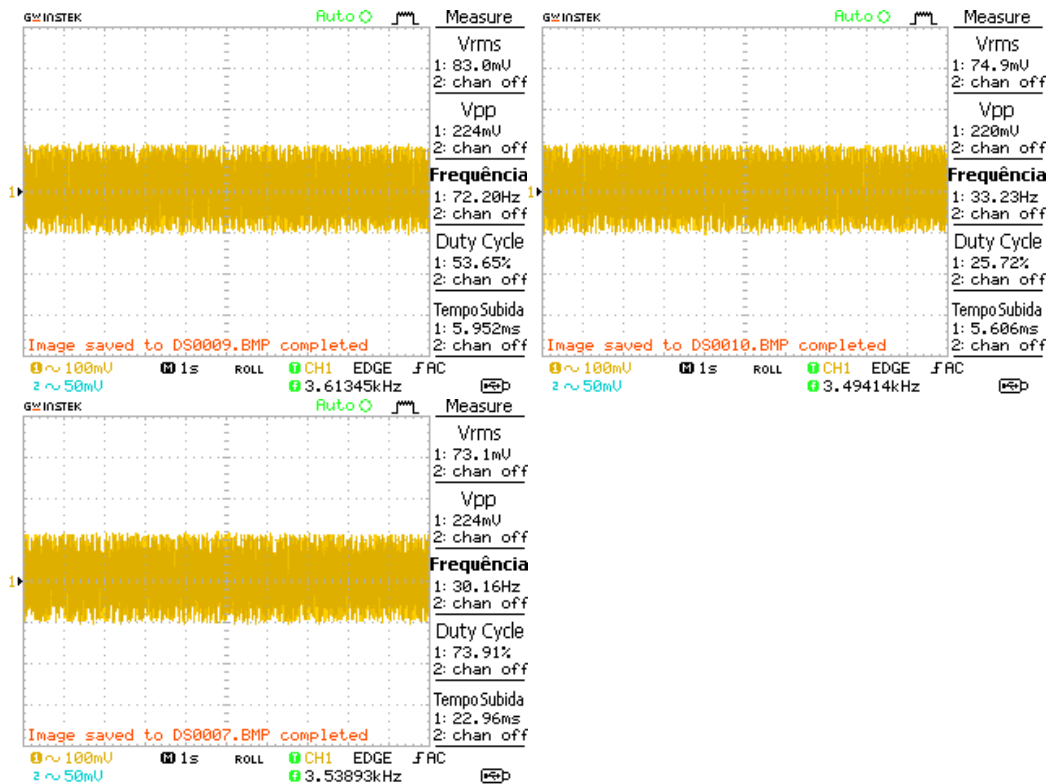
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 65 - Saídas de voltagens para CG3 na PGb com a viga de plástico, através da V_{v1}



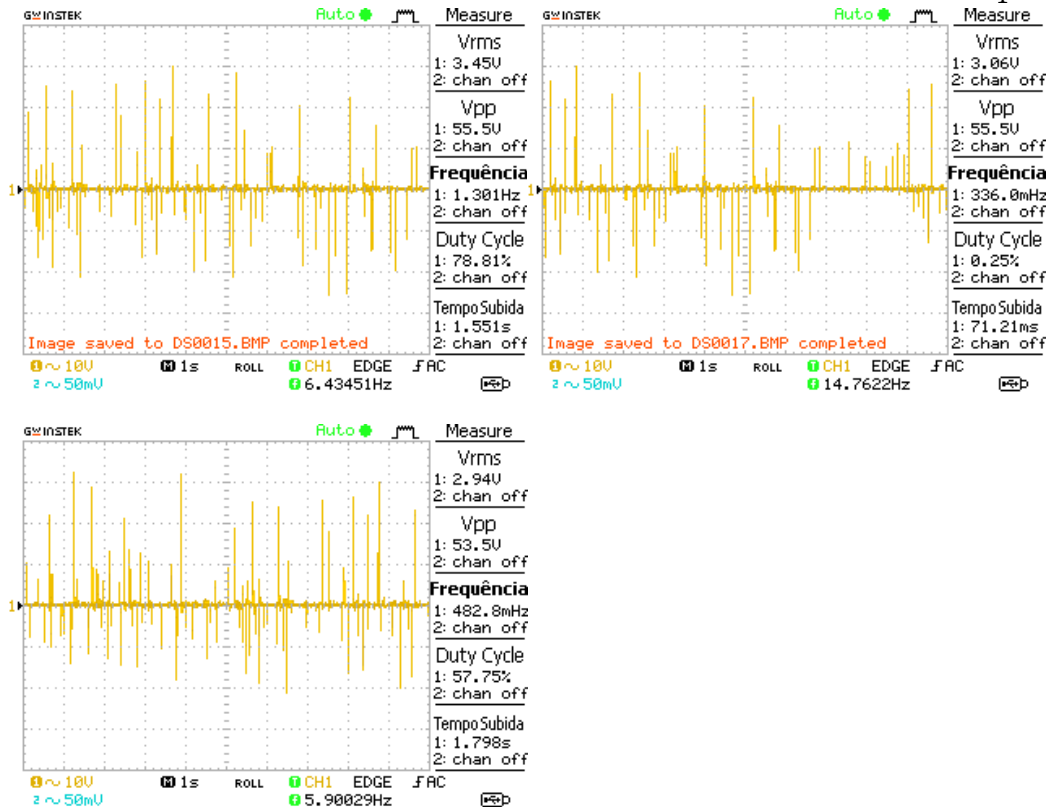
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 66 - Saídas de voltagens para CG3 na PGB com a viga de plástico através da V_{v_2}



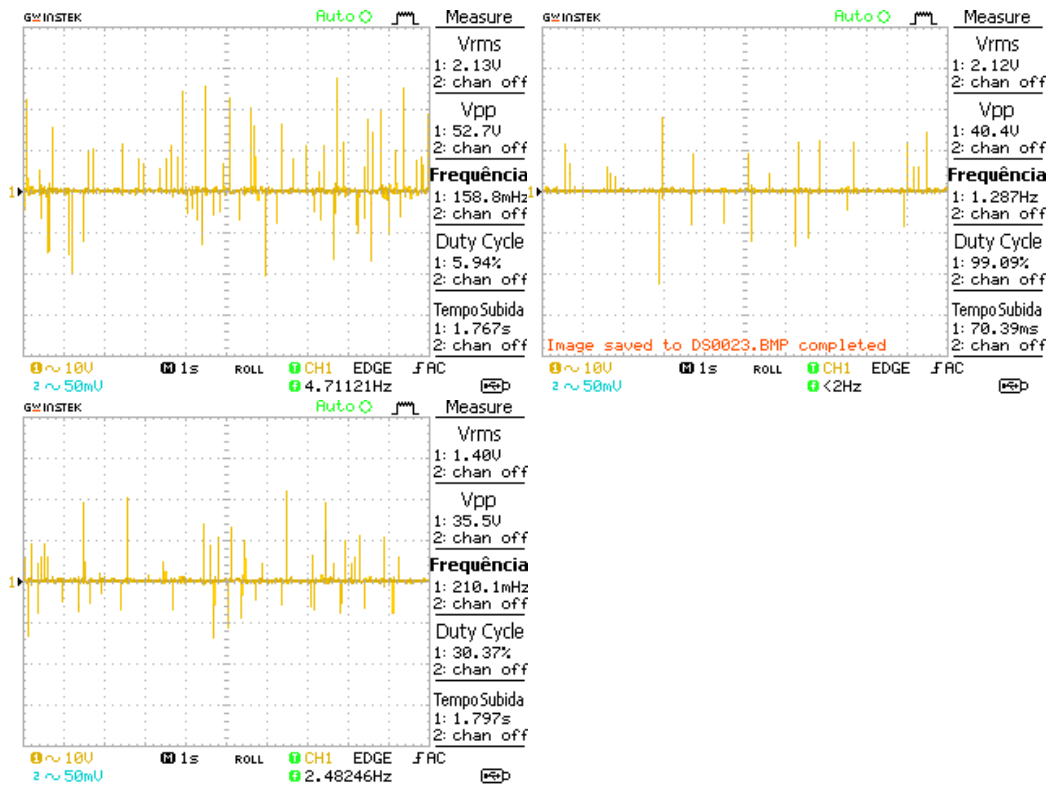
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 67 - Voltagens para CG3 na PGC com a viga de plástico, através da V_{v_1}



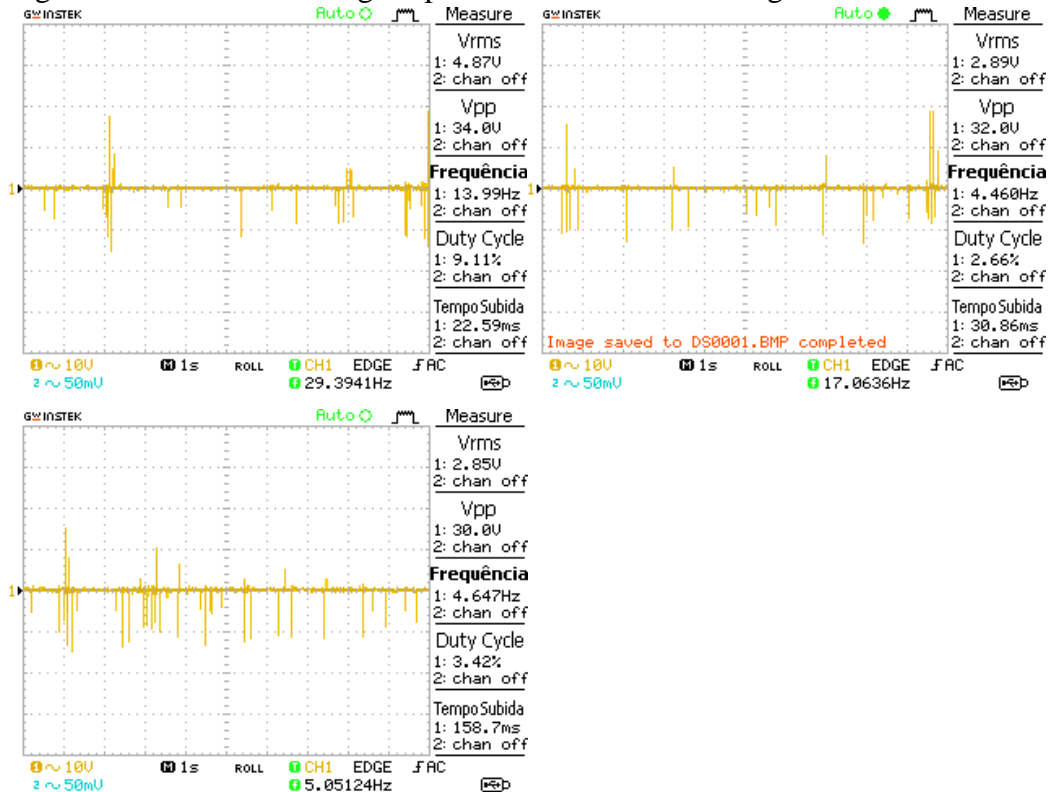
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 68 - Voltagens para CG3 na PGC com a viga de plástico, através da V_{v2}



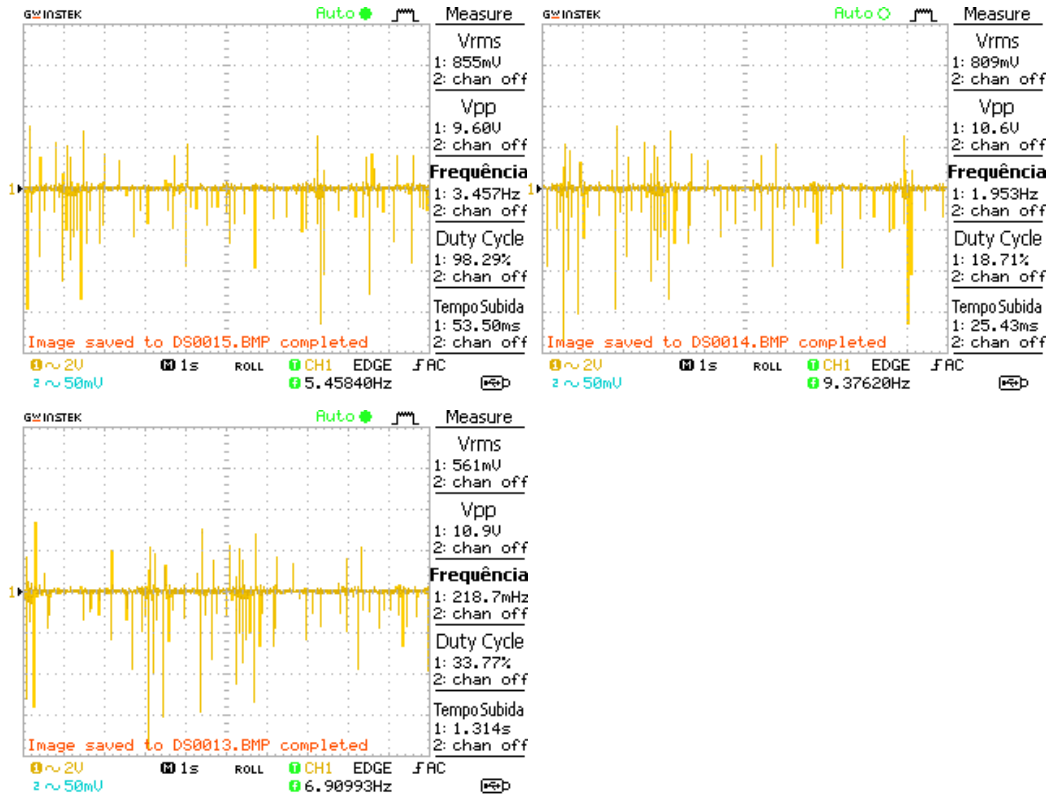
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 69 – Saídas de voltagens para CG3 na PGC com a viga de alumínio através da V_{v1}



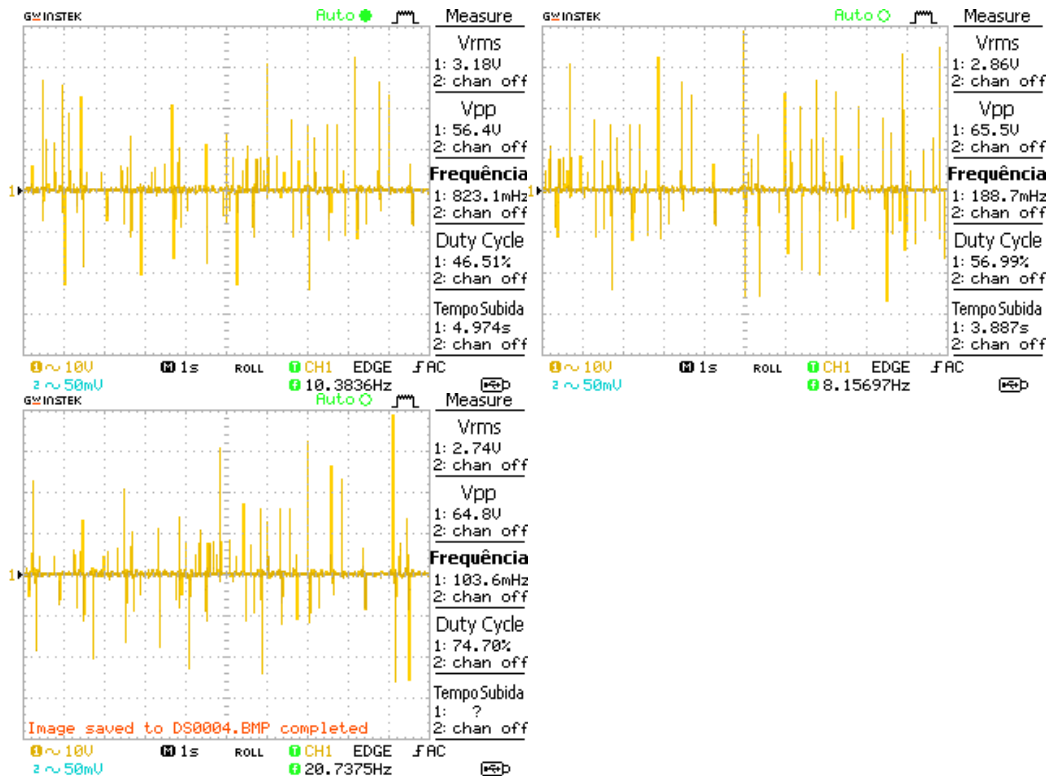
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 70 - Voltagens para CG3 na PGa com a viga de alumínio, através da V_{v_2}



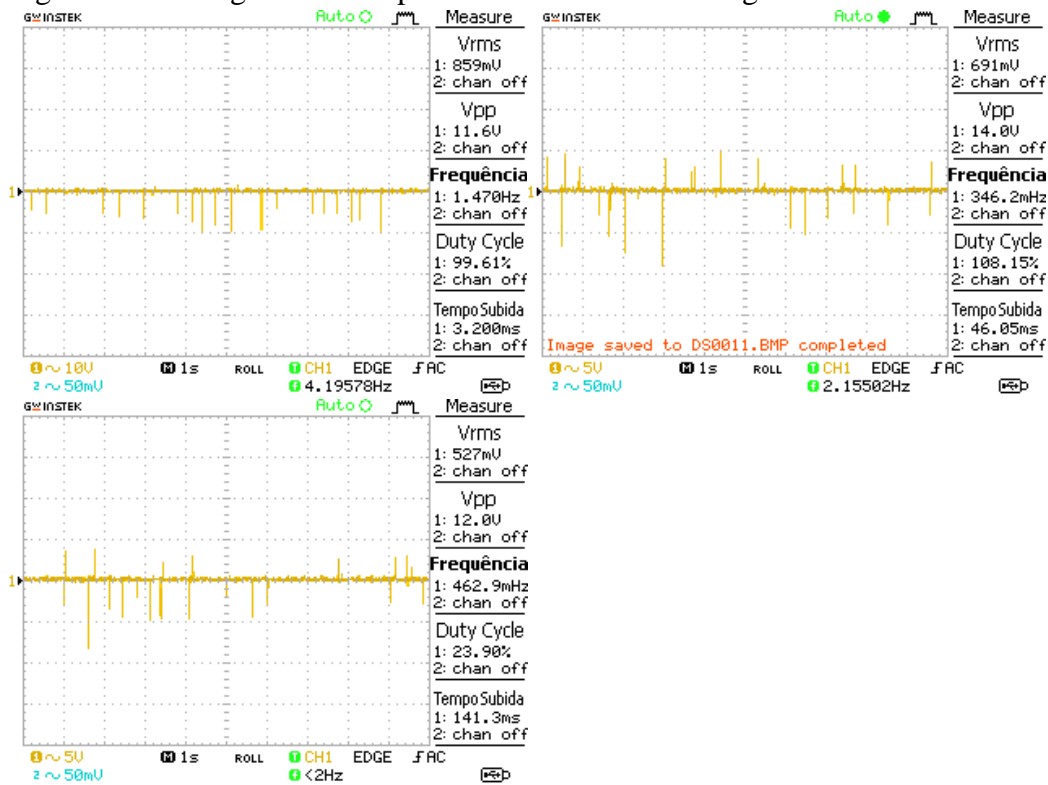
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 71 - Voltagens obtidas para CG3 na PGb com a viga de alumínio, através da V_{v_1}



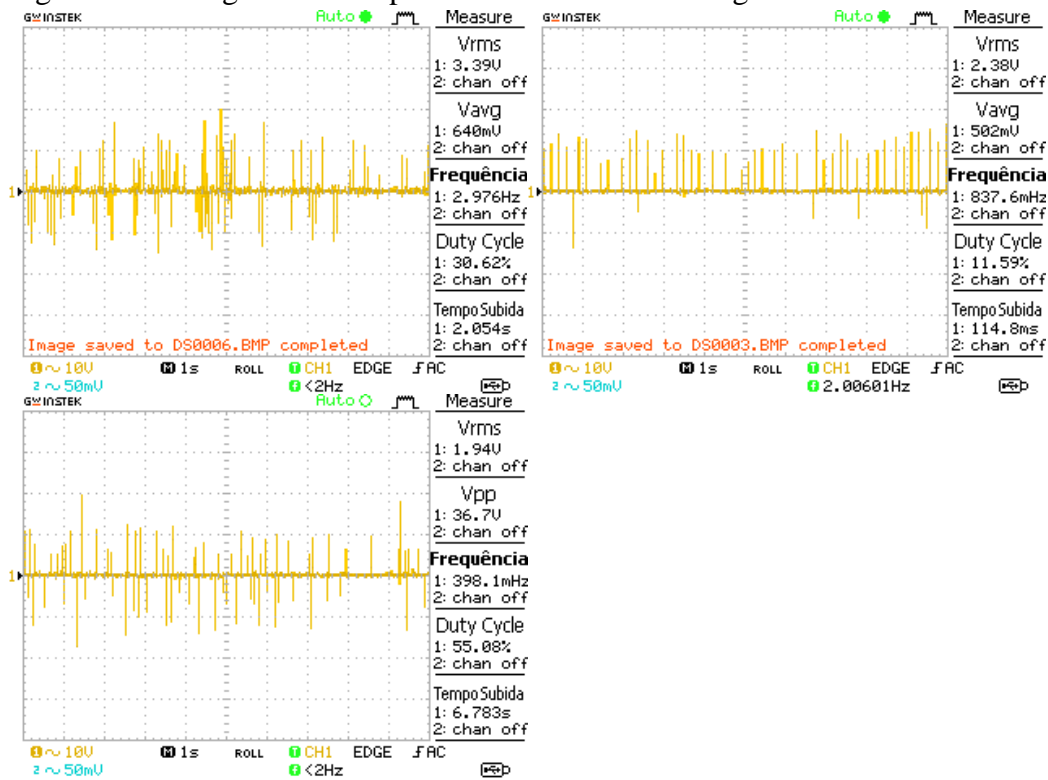
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 72 - Voltagens obtidas para CG3 na PGb com a viga de alumínio através da V_{v_2}



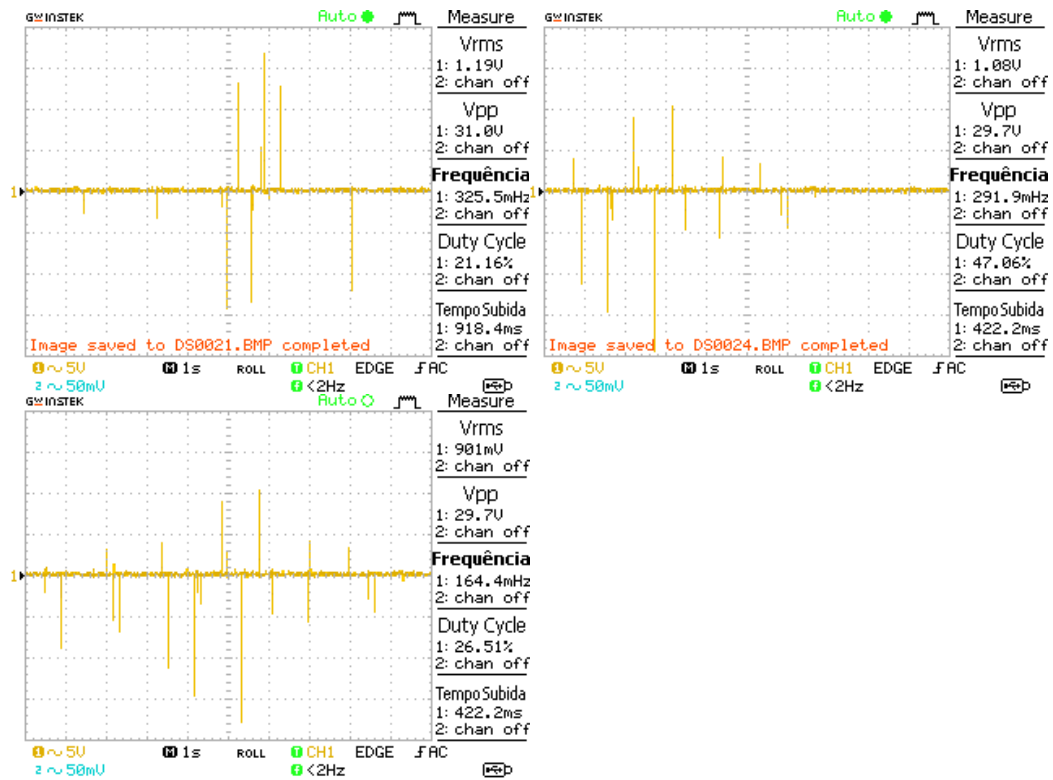
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 73- Voltagens obtidas para CG3 na PGC com a viga de alumínio através da V_{v_1}



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 74 - Voltagens da CG3 na PGc com a viga de alumínio através da V_{v2}



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.