



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
**CAMPUS CERRO LARGO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E TECNOLOGIAS**  
**SUSTENTÁVEIS**

**LUANA RUWER DAMKE**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO MATERIAL POLÍMERO  
PIEZOELÉTRICO: UM NOVO CONCEITO DE ENERGIA RENOVÁVEL**

**CERRO LARGO**

**2019**

**LUANA RUWER DAMKE**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO MATERIAL POLÍMERO  
PIEZOELÉTRICO: UM NOVO CONCEITO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis, da Universidade Federal Fronteira Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis.

Linha de pesquisa: Desenvolvimento de Processos e Tecnologias.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix.

**CERRO LARGO**

**2019**

**Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS**

Damke, Luana Ruwer

Análise da eficiência energética do material polímero piezoelétrico: um novo conceito de energia renovável / Luana Ruwer Damke. -- 2019.

75 f. : il.

Orientador: Dr Jorge Luis Palacios Felix .  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis-PPGATS, Cerro Largo, RS , 2019.

1. Materiais Piezoelétricos. 2. Energia Renovável. I. , Jorge Luis Palacios Felix, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

LUANA RUWER DAMKE

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO MATERIAL POLÍMERO  
PIEZOELÉTRICO: UM NOVO CONCEITO DE ENERGIA RENOVÁVEIS**

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis.

Área de Concentração: Monitoramento, Controle e Gestão Ambiental.

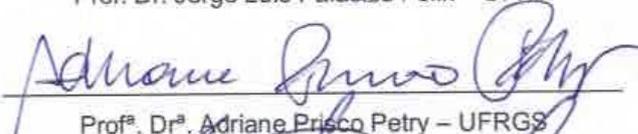
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Processos e Tecnologias.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

Esta Dissertação foi defendida e aprovada pela banca em: 23 / 05 / 2019

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix – UFFS

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry – UFRGS

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Flavio Vanderlei Zancanaro Junior – UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

*Aos meus pais, Lisméia Ruwer e Nelson Davi Damke, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me em todas as decisões tomadas, fazendo com que essa etapa da minha vida fosse alcançada.*

*A minha irmã Victória Fernandes, por fazer parte dessa fase da minha vida.*

*Ao meu companheiro Cleiton Luis Martiny que, durante todo esse tempo, foi presença constante com palavras de apoio e incentivo, impulsionando-me à conquista de novas metas.*

*Ao Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix, pelo seu incentivo e dedicação na orientação segura, quando da realização deste trabalho.*

*À Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), seu corpo docente, direção, administração e equipe técnica, pela oportunidade de estudo e formação.*

*E a todos os demais envolvidos, direta ou indiretamente, na efetivação deste trabalho.*

## RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a aplicação dos materiais piezoelétricos na geração de energia renovável. Foi confeccionada uma plataforma, a qual consiste em um suporte rígido vertical de ferro, de pequeno porte, em que foi utilizada uma garra, para que esta servisse de suporte ao polímero piezoelétrico PVDF (Fluoreto de Polivinilideno) LDT0-028K. Foi utilizado um simulador de vento, através de um ventilador de seis pás, e produzidas várias velocidades de ventos, entre 4 e 7 m/s, variando as distâncias entre o piezoelétrico e o gerador de escoamento de ar. Foram utilizados materiais de plásticos flexíveis de PVC, de diferentes configurações, que foram acoplados no extremo livre do piezoelétrico, para melhorar as deformações e obter melhores resultados na saída de tensão. Foi possível avaliar as melhores condições experimentais na configuração geométrica, formato T pequena (CGT 1) a uma velocidade do vento de 6,74 m/s, sendo que obteve-se 9,40 mW de energia. Os resultados obtidos nos experimentos são válidos em comparação às citações realizadas, mas não é suficiente para fornecer energia elétrica a uma bateria recarregável. No entanto, para melhorar o desempenho de potência, sugere-se colocar vários elementos PVDF em série, para obter mais potência de saída, a partir de um único dispositivo.

**Palavras-chave:** Materiais Piezoelétricos. Energia Renovável. Polímeros.

## ABSTRACT

The purpose of the present study was to evaluate the application of piezoelectric materials in renewable energy generation. Thus, a platform was constructed, which consists of a small iron vertical rigid support, wherein a claw was used as a support for the piezoelectric polymer PVDF (Polyvinylidene Fluoride) LDT0-028K. To simulate the wind, a fan of six blades has been used, and many wind velocities were generating varying the distances between the piezoelectric and the airflow generator (ranging the four to seven m/s). Moreover, flexible PVC plastic materials of different configurations were used which were coupled to the piezoelectric free end to improve the deformations and obtain better results in the voltage output. In this study, it was possible to evaluate the best experimental conditions in the geometric configuration, which was the small T-shape (CGT 1) at a wind speed of 6.74 m/s, obtaining 9.40 mW of energy. The results obtained in the experiments are valid in comparison to the literature mentioned, but it is not enough to supply electricity to a rechargeable battery. However, to improve the power performance, it is suggested to use multiples elements of PVDF in series, for greater power output from a single device.

**Keywords:** Piezoelectric materials. Renewable energy. Polymers.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistemas que funcionam com baterias .....	17
Tabela 2 – Definição das classes de energia .....	40
Tabela 3 – Velocidade média do vento. ....	46
Tabela 4 – Respostas saídas de tensão para a geometria em formato de Flecha....	51
Tabela 5 – Respostas das saídas de tensão para a geometria em formato de Bandeira.....	52
Tabela 6 – Respostas das saídas de tensão para a geometria em formato de L.....	53
Tabela 7 – Respostas das saídas de tensão para a geometria em formato de T. ....	54
Tabela 8 – Potência das configurações geométricas. ....	60
Tabela 9 - Estudos de geração de energia. ....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações sobre coletas de energia piezoelétricos, eletromagnéticos e eletrostáticos na Web of Science entre 2003 e 2013 (TOPRAK; TIGLI, 2014). .....	23
Figura 2 – Modelo árvore piezoelétrica (OH et al., 2010). .....	26
Figura 3 – Folhas de plástico em forma de cottonwood montadas em treliça de alumínio (MCCLOSKEY et al., 2017). .....	27
Figura 4 - Diferentes configurações da piezo-folha (LI E LIPSON, 2009). .....	28
Figura 5 – Protótipo de gerador de energia na sola do sapato (ROCHA et al., 2010). .....	28
Figura 6 – Configuração experimental gota de chuva – experiência com o vento (VATANSEVER et al., 2011). .....	29
Figura 7 – Ilustração modo 33 e modo 31, operação para materiais piezoelétricos (ANTON e SODANO 2007). .....	30
Figura 8 – (A) Uma série tripla tipo de camada de sensor piezoelétrico. (B) Um sensor de tripla camada tipo piezoelétrico paralelo. (C) Um unimorph do sensor piezoelétrico (ANTON e SODANO, 2007). .....	32
Figura 9 – Os modos de transdução piezoelétricos (RAMADAN et al., 2014). .....	33
Figura 10 – Diagrama dos tipos de polímeros piezoelétricos (RAMADAN et al., 2014). .....	34
Figura 11 – Exemplos de estruturas de cristal 2D: (a) quadrado não piezoelétrico e (b) hexagonal piezoelétrico (RAMADAN et al., 2014). .....	36
Figura 12 – Estrutura molecular PVDF (RAMADAN et al., 2014). .....	37
Figura 13 – Velocidade média anual do vento a 50 metros de altura referente a cinco condições topográficas (LETCHER, 2017). .....	39
Figura 14 – Modelo de material piezoelétrico PVDF. .....	45
Figura 15 – Plataforma com barra vertical e ventilador na mesma direção. ....	45
Figura 16 – Ventilador marca ARNO. ....	45
Figura 17 – Plataforma de estudo, medidas com o anemômetro. ....	46
Figura 18 - Modelo do osciloscópio digital. ....	47
Figura 19 – Formato Flecha, CGF1 (a), CGF2 (b) e CGF3 (c). ....	48
Figura 20 – Formato Bandeira CGB1 (a), CGB2 (b) e CGB3 (c). ....	48
Figura 21 – Formato L, CGL1 (a), CGL2 (b) e CGL3 (c). ....	48

Figura 22 – Formato T, CGT 1 (a), CGT 2 (b) e CGT 3 (c). .....	49
Figura 23 – Posição do material piezoelétrico no plástico PVC. ....	49
Figura 24 – Componentes do circuito elétrico para captura de tensões instantâneas e resistor de 1000 OHMS. ....	50
Figura 25 – Imagem gravada do osciloscópio. ....	50
Figura 26 – Imagem capturada do osciloscópio. ....	58
Figura 27 – Respostas de tensão de saída obtidas com o resistor. ....	60
Figura 28 – Imagem experimento Thornton, 2011. ....	62

## INDÍCE DE GRÁFICO

Gráfico 1 – Desempenho da configuração geométrica formato flecha.....	55
Gráfico 2 – Desempenho da configuração geométrica formato Bandeira.....	56
Gráfico 3 – Desempenho da configuração geométrica formato L. ....	57
Gráfico 4 – Desempenho da configuração geométrica formato T. ....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
2.1 ENERGIA RENOVÁVEL .....	14
2.2 COLETA DE ENERGIA .....	15
<b>2.2.1 Coleta de Energia Vibracional</b> .....	18
2.2.1.1 Coleta de energia de vibração eletrostática .....	18
2.2.1.2 Coleta de energia de vibração eletromagnética .....	19
2.2.1.3 Coleta de energia de vibração Piezoelétrica .....	19
2.3 PIEZOELETRICIDADE.....	21
<b>2.3.1 Materiais Piezoelétricos</b> .....	22
2.3.1.1 Estudos com Materias Piezoelétricos.....	25
<b>2.3.2 Efeito Piezoelétrico</b> .....	29
<b>2.3.3 Os coeficientes e modos piezoelétricos</b> .....	32
<b>2.3.4 Acoplamento eletromecânico</b> .....	33
2.4 PIEZOELETRICIDADE EM POLÍMEROS .....	34
<b>2.4.1 Polímeros piezoelétricos a granel</b> .....	35
2.4.1.1 Polímeros piezoelétricos semicristalinos .....	35
2.5 MATERIAL PIEZOELÉTRICO PVDF .....	36
2.6 ESCOAMENTO FORÇADO .....	38
2.7 VIBRAÇÕES PIEZOELÉTRICAS SUJEITAS À FORÇA DO VENTO .....	41
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	44
3.1 MATERIAIS .....	44
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	44
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	51
<b>5 CONSIDERAÇÃO FINAL</b> .....	64
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	65

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial de energia está aumentando de forma significativa, por causa do crescimento populacional e da revolução industrial. Com isso, diferentes países mundiais têm suas próprias estratégias, planos, políticas e medidas de controle para se estabelecerem no mundo. A partir das iniciativas de crescimento populacional e desenvolvimento, recursos disponíveis no mundo estão sendo esgotados (SHAFIEE; TOPAL, 2009).

A energia acessível não é suficiente para toda a população usufruir, por várias razões, como o perfil de desenvolvimento de um país, o status econômico de pessoas e a natureza dos avanços tecnológicos do país. Conseqüentemente, o ecossistema está sendo prejudicado com a poluição causada pelas emissões de gases gerados com a queima de combustível fóssil, prontamente disponíveis e comumente usados para satisfazer a demanda de energia do mundo (HALMANN; STEINBERG 1998).

Com isso, os países em desenvolvimento são pressionados a procurar fontes de energia alternativa, já que o crescimento de suas populações é alto e eles estão buscando a progressão econômica para se tornarem economicamente viáveis (ASAFU-ADJAYE, 2000). À medida que o desenvolvimento econômico ocorre, a produção de energia e sua demanda também aumentam, uma vez que estas são proporcionais ao crescimento.

Por conseguinte, é vital buscar fontes de energia ecológicas, para a melhoria do futuro (ALANNE; SAARI 2006). Nesse sentido, as fontes de energia renovável, como energia solar, energia eólica, energia hidrelétrica e energia geotérmica são criticamente muito importantes (HERZOG et al., 2001).

Nesse contexto, a energia eólica consiste em uma das alternativas de fonte renovável e fonte de fornecimento de energia elétrica, por suas características únicas, como energia mais limpa, acessível e inesgotável. Assim, muitos estudos estão sendo voltados à conversão de energia eólica em eletricidade (EWERE et al., 2014). Isso devido à percepção da necessidade de reduzir a dependência global de fontes de energia com base em combustíveis fósseis e de conscientizar a população de seus efeitos negativos sobre o meio ambiente.

Nessa mesma perspectiva, estudos relatados no decorrer do trabalho estão relacionados à geração de energia limpa e à produção, em pequena escala, de

energia elétrica, utilizando em comum o material piezoelétrico, que converte a energia mecânica em energia elétrica, ou vice-versa.

Esses materiais piezoelétricos são de grande importância devido à sua capacidade de converter diretamente a energia aplicada em energia elétrica utilizável e a capacidade de receber qualquer pressão e converter isso em sinal elétrico. E para a obtenção de energia estes podem ser configurados de várias maneiras que se revelam úteis em aplicações de coleta de energia (ANTON; SODANO, 2007).

No decorrer do estudo apresenta uma revisão desses estudos onde percebe-se a quantidade de aplicações com uso de piezoelétricos, desde a sua utilização em pisos (no chão) que, com o passar das pessoas, possibilitam uma geração de energia; também na estrutura de prédios, na corrente de um rio e, até mesmo, com o vento.

No presente estudo utilizou-se a geração de energia através da vibração realizada pela intensidade do vento, com o intuito de calcular a potência máxima gerada. Assim, com a finalidade de, ao utilizar uma quantidade maior de materiais piezoelétricos obter geração de energia suficiente para acender uma lâmpada LED, confirmar, além da necessidade, a possibilidade de buscar novas alternativas para gerar energia elétrica de forma sustentável.

Nesse sentido, escolheu-se um material piezoelétrico flexível e robusto - PVDF - como um componente essencial do dispositivo, para permitir uma ampla gama de frequências de vibração, impulsionada a oscilar como uma folha batendo ao vento.

O objetivo do estudo ora relatado foi o de investigar os princípios e a viabilidade da captação de energia elétrica em microescala, a partir das vibrações realizadas pelo fluxo do vento, como uma alternativa renovável, com o intuito de projetar futuramente um sistema de energia eólica em forma de uma árvore, usando materiais piezoelétricos, podendo, com isso, gerar energia no campus da UFFS; seguindo-se as especificidades de:

- Investigar a aplicabilidade do piezoelétrico polifluoreto de vinilideno (PVDF) – LDT0 da MEAS a partir da potência gerada.
- Analisar a eficiência das diferentes configurações geométricas de folhas de PVC fixados ao piezoelétrico.

- Validar os resultados encontrados em experimento com diferentes estudos realizados com PVDF na finalidade de gerar energia elétrica.

O presente relato do estudo está dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo referente à introdução, que apresenta a necessidade da utilização de energia renovável através do uso de materiais piezoelétricos.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica, em que serão abordados os principais aspectos referentes à energia eólica, vento, material piezoelétrico, piezoeletricidade, e assuntos que fundamentem a dissertação.

No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia, a qual abordará os materiais e equipamentos utilizados e a forma como os experimentos se sucederam a fim de calcular a potência gerada.

O quarto capítulo refere-se aos resultados e às discussões. Assim, através de tabelas e gráficos os resultados serão apresentados e discutidos, além de que, serão comparados os melhores resultados, verificando-se a sua viabilidade.

Por último, o quinto capítulo aborda as conclusões a que se chegou após o estudo, apresentando, também, sugestões ao trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ENERGIA RENOVÁVEL

A energia renovável compreende uma solução para diversos problemas ambientais, principalmente aos que se referem à energia elétrica que, cada vez mais, tem o seu consumo aumentado. No entanto, a partir das fontes de energia renovável é possível produzir energia mais limpa, diminuindo, conseqüentemente, os impactos a serem causados no meio ambiente.

A energia renovável pode fornecer uma série de benefícios para a sociedade. Em relação à redução de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), os governos aprovaram políticas de energia renovável (ER) para atender a uma série de objetivos, incluindo a criação de benefícios ambientais e de saúde local. Ainda, a facilitação do acesso à energia, particularmente, para as zonas rurais, o avanço das metas de segurança energética, diversificando a carteira de tecnologias energéticas e recursos, e a melhoria no desenvolvimento social e econômico, por meio de potenciais oportunidades de emprego tem motivado tais políticas (ELLABBAN et al., 2014).

As energias renováveis são fontes de energia que são continuamente reabastecidos pela natureza e derivados diretamente do sol (térmica, fotoquímica e foto-elétrico), indiretamente do sol (eólica, hidrelétrica e energia fotossintética armazenado na biomassa), ou a partir de outros movimentos e mecanismos do ambiente natural (geotérmica e energia das marés) (ELLABBAN et al., 2014)

Porém, algumas das fontes de geração de energia renovável podem causar impactos no meio ambiente (ELLABBAN et al., 2014). São:

Biomassa – Pode causar poluição do ar;

Geotérmico – Custo de manutenção caro, devido à corrosão;

Marinha – Impacto negativo sobre a vida selvagem;

Solar – Confiabilidade depende da disponibilidade da luz solar;

Eólica – Impacto visual e sonoro.

Atualmente, grande parte da geração de energia elétrica provém de combustíveis, em que o calor é gerado pela combustão de combustíveis, convertendo em eletricidade através da rotação mecânica. A utilização de combustíveis, no entanto, é limitada, além de causar diversos impactos no meio

ambiente, apontando para a necessidade de utilização de outros meios para gerar eletricidade, como fontes de energias renováveis, a fim de satisfazer uma demanda necessária (JAMAL et al., 2015).

Nesse sentido, fontes renováveis de grande potencial e inesgotáveis são encontradas a partir da luz solar e do ar. Elas são capazes de produzir energia elétrica através da geração de energia por células solares e moinhos de vento (ZAHEDI, 2006; BURTON et al., 2011). A energia gerada pela ação do vento requer um moinho de vento convencional, para girar a turbina, convertendo energia eólica em eletricidade.

Da mesma forma, a energia cinética está presente na forma de vibrações, deslocamentos ou forças aleatórias, que são convertidos em energia elétrica através de mecanismos eletromagnéticos, piezoelétricos ou eletrostático. As vibrações podem ser encontradas em inúmeras aplicações, incluindo eletrodomésticos, equipamentos de instalação industrial, estrutura de móveis, edifícios, pontes, entre outros (ROUNDY et al., 2003). A quantidade de energia gerada a partir deste contexto depende da quantidade e da forma de energia cinética disponível no meio ambiente e da eficiência do mecanismo de conversão.

Dentre as vibrações citadas, uma das conversões de energia limpa usada se dá através do uso de materiais piezoelétricos, certos materiais cristalinos - como quartzo, sal Rochelle, turmalina e titanato de bário, que desenvolvem eletricidade quando sofrem certa pressão, conhecida como efeito direto (GINLEY et al., 2008). Por outro lado, esses cristais sofrem deformação quando um campo elétrico é aplicado, o que é denominado de efeito inverso. Esse efeito inverso pode ser usado como atuador e o efeito direto pode ser usado como sensor ou transdutor de energia.

## 2.2 COLETA DE ENERGIA

Na sua forma mais simples, coleta de energia pode ser definida como a conversão da energia não utilizada disponível no ambiente em energia elétrica, a qual pode ser utilizada imediatamente, ou armazenada para uso posterior. Assim, fontes de grande escala, tais como sistemas de suspensão de veículos, edifícios altos, ou ondas do mar podem conter níveis de potência até dezenas de quilowatts,

o que pode ser utilizado como uma forma de fonte de energia renovável (ZUO; TANG, 2013).

Na outra extremidade da escala, as fontes de energia relativamente pequenas, tais como vibrações ambientais ou gradientes de temperatura não são capazes de proporcionar níveis de saída de alimentação suficientemente elevados para serem considerados para redes de energia. Em vez disso, eles podem ser utilizados para fornecer energia sustentável, limpa para sensores ou transdutores em elementos eletrônicos autônomos (KIM et al., 2012).

Com os recentes avanços na tecnologia sem fio e MEMS, a coleta de energia é destacada como as alternativas da bateria convencional. Eletrônicos portáteis de baixa potência e sensores sem fio usam as baterias convencionais como fontes de energia, no entanto a vida útil da bateria é limitada e muito curta em comparação com a vida útil dos dispositivos. Assim, a substituição ou a recarga da bateria é ineficiente e, às vezes, impossível (KIM et al., 2012).

A coleta de energia tem uma capacidade pequena de conversão e armazenamento de energia, sendo que, antes da tecnologia de Microeletromecânica (MEMS), essa energia capturada não tinha muita utilidade, devido ao fato de os equipamentos não trabalharem com pouca energia. Os dispositivos MEMS atuam entre a eletrônica digital e o mundo físico, sendo aplicados em todos os tipos de sistemas, por serem pequenos, rápidos e mais energéticos (GALHARDI, 2010).

Os sistemas MEMS têm um tamanho extremamente pequeno, tornando-se adequados para algumas aplicações específicas. Dessa forma, a simplicidade dos microgeradores piezoelétricos é atraente para aplicações de MEMS, especialmente para sistemas remotos. À medida que os sistemas MEMS e as tecnologias inteligentes se desenvolvem, os sistemas remotos e as estruturas incorporadas atraem, cada vez mais, interesse. Materiais piezoelétricos são materiais prospectivos para conversão de energia, pois possuem bons efeitos de acoplamento, assim como o gerador solar e o gerador eletromagnético (WILLIAMS; YATES, 1996).

Nesse sentido, o microgerador piezoelétrico se constitui em uma alternativa para aplicações de equipamentos de pequeno porte, especialmente para sistemas dinâmicos envolvendo vibrações mecânicas. Além disso, a simplicidade do microgerador piezoelétrico é, particularmente, atraente para uso em MEMS (GALHARDI, 2010).

O tamanho, o peso e o custo desses sistemas estão atualmente limitados pelas tecnologias de bateria disponíveis. Mais importante ainda, a substituição de baterias descarregadas é principalmente inviável, o que limita o tempo de vida e a sustentabilidade desses sistemas. Concomitantemente, há um número de fontes de energia ambientalmente adequadas disponíveis para aplicações de captação de energia solar, incluindo as de vibração, de frequência de rádio, de ondas acústicas, e de gradientes de temperatura (BAKER et al., 2005).

Vibrações ambientais podem proporcionar uma elevada densidade de energia por volume de unidade de dispositivo e, ao contrário das células solares, elas podem operar em sistemas implantados ou incorporados. Existem várias fontes de vibração no ambiente, gerando vibrações com diferentes amplitudes e frequências (REILLY et al., 2009; ROUNDY et al., 2003).

Existem três tipos principais de coletas de energia baseado na vibração: piezoelétrico, eletromagnética e eletrostática (TOPRAK; TIGLI, 2014).

Entretanto, as principais limitações que os pesquisadores enfrentam no campo da produção de energia elétrica giram em torno do fato de que a energia gerada pelos materiais piezoelétricos é pequena demais para alimentar a maioria dos eletrônicos. Portanto, métodos para aumentar a quantidade de energia gerada pelo dispositivo de coleta de energia ou para desenvolver novos e inovadores métodos de acumulação de energia são necessários (SODANO et al., 2005).

Na tabela 1, a seguir, é possível verificar uma comparação de vários sistemas de armazenamento de energia (VULLERS et al., 2009).

Tabela 1 – Sistemas que funcionam com baterias

	Dispositivo de consumo	
	Energia	Autonomia energética
Smartphone	1 W	5 h
Leitor mp3	50 mW	15 h
Áudio fone	1 mW	5 dias
Marca-passo cardíaco	50 $\mu$ W	7 anos
Relógio de quartzo	5 $\mu$ W	5 anos

Fonte: VULLERS et al., 2009

Além disso, a eficiência do circuito de coleta de energia deve ser maximizada para permitir que a quantidade total de energia gerada seja transferida para o meio de armazenamento. Os ganhos nesta área são uma necessidade para o uso bem sucedido de materiais piezelétricos como dispositivos de coleta de energia (SODANO et al., 2005).

### **2.2.1 Coleta de Energia Vibracional**

O trabalho de Coleta de energia vibracional em pequena escala se deu utilizando os três mecanismos comuns de conversão, sendo eles: as conversões de energia eletrostática, as conversões de energia eletromagnética e as conversões de energia piezoelétrica. Cada um destes mecanismos de coleta é discutido a seguir, com foco em aplicativos desenvolvidos em pequena escala (DU TOIT, 2005).

#### **2.2.1.1 Coleta de energia de vibração eletrostática**

A grande vantagem de conversores eletrostáticos é que a tecnologia de processamento de MEMS oferece um método eficaz para obter uma estreita integração com a eletrônica. Além disso, o potencial de reduzir a tamanhos muito menores é maior para conversores eletrostáticos (ROUNDY et al., 2003).

O primeiro mecanismo de conversão é baseado no conceito de capacitor variável, que consiste em dois condutores, separados por um material dielétrico. Quando os condutores são colocados em um campo elétrico e são movidos, um em relação ao outro, a corrente é gerada (DU TOIT, 2005).

A principal vantagem dos conversores eletrostáticos é seu potencial de integração em microsistemas, já a principal desvantagem desse método é que uma fonte de tensão separada é necessária para criar um campo elétrico (ROUNDY et al., 2003). Por outro lado, a configuração do capacitor é facilmente integrável em microsistemas, usando processos de fabricação de MEMS padrão (DU TOIT, 2005).

Rocha et al. (2010), a partir da experiência de utilização de um gerador eletrostático acoplado a uma sola de sapato com finalidade de aumentar a geração de energia apontam que, quando a pessoa pisa com um pé no chão, a capacitância aumenta cerca de duas vezes, o que significa que a tensão diminui para metade.

Nesse momento, a tensão piezoelétrica é maior do que a dos terminais do gerador eletrostático, portanto, sua capacitância será carregada. Quando a pessoa levanta o pé, a capacitância do gerador eletrostático diminui e a tensão aumenta. Neste caso, a carga é um dispositivo de armazenamento de energia.

#### 2.2.1.2 Coleta de energia de vibração eletromagnética

Quando uma bobina, dentro de um campo magnético, é movida, a corrente flui de acordo com a Lei de Faraday. Este mecanismo é utilizado para converter movimento (vibração) em energia elétrica e possui as seguintes propriedades (ROUNDY et al., 2003):

- Nenhuma fonte de tensão separada é necessária.
- Um campo magnético permanente é necessário. Os ímãs permanentes são normalmente volumosos e apresentam uma fraca escala para um tamanho de MEMS (SPEARING, 2000).
- A tensão de saída é, normalmente, em torno de 0,1 – 0,2 V; portanto, é necessário transformar a tensão em níveis utilizáveis para nós.

A vibração de baixa frequência é convertida magneticamente em oscilações de frequência mais altas, usando um ímã grande como uma massa sísmica de um oscilador de baixa frequência. Nesse contexto, a baixa frequência de ressonância da grande estrutura de massa é compatível com a frequência de vibração. Um conjunto de feixes menores, com bobinas indutivas para conversão de energia é colocado próximo ao campo magnético criado pela massa sísmica. À medida que a grande massa se move em direção à matriz de feixes menores, os feixes são “capturados” no campo magnético e desviam em direção à massa sísmica. Quando a massa sísmica se afasta, os pequenos raios são “libertados” e vibram nas suas elevadas frequências de ressonância. Esse movimento pode ser usado para coleta de energia (DU TOIT, 2005).

#### 2.2.1.3 Coleta de energia de vibração Piezoelétrica

Conversores piezoelétricos não necessitam de uma fonte de tensão separada, mas eles não são tão facilmente integrados em um processo de micro fabricação. O capacitor variável é o acoplamento piezoelétrico reduzido à base da

conversão de energia eletrostática. Assim, se a carga no capacitor for limitada, a tensão aumentará, conforme a capacitância diminuir. Se a tensão através do capacitor for limitada, a carga se moverá do capacitor, quando a capacitância diminuir. Em ambos os casos, a energia cinética mecânica é convertida em energia elétrica (ROUNDY et al., 2003).

Cabe destacar que o interesse na aplicação de coletores de energia piezoelétricos para converter energia mecânica em energia elétrica aumentou nos últimos anos, embora a ideia não seja nova. A aplicação de elementos piezoelétricos ao amortecimento de vibrações (ativo e passivo) tem recebido muita atenção (MOHEIMANI, 2003).

Em vista disso, alguns autores propuseram usar a energia extraída do sistema para alimentar sensores ou eletrônicos, ao invés de dissipar a energia através de aquecedores resistivos ou outros elementos dissipados (ONODA et al., 2003; ELVIN et al., 2001).

Por outro lado, quando uma coleta de energia é aplicada a um sistema, o amortecimento estrutural pode ser alcançado se o tamanho do coletor de energia estiver na mesma ordem que a estrutura (SODANO et al., 2004; LESIEUTRE et al., 2004).

Essa configuração tem a vantagem de ser compatível com os processos de fabricação de MEMS. A análise é relativamente direta e a estrutura é muito compatível, permitindo frequências de baixa ressonância. Uma densidade de potência para este tipo de harvesting foi prevista como sendo o mais alto dos três mecanismos de conversão (DU TOIT, 2005).

No entanto, usar o efeito piezoelétrico para converter energia de vibração mecânica em energia elétrica tem vantagens e desvantagens (ROUNDY et al., 2003). Entre as vantagens, destaca-se por ser o mecanismo de conversão mais eficiente - conforme simulações efetuadas -, de modo que se faz necessária em uma fonte de tensão separada, como para colheitadeiras eletrostáticas. Ainda, suas tensões de saída são da ordem correta (3 – 8 V). Já como desvantagem aponta-se o fato de ser mais complexo integrar configurações de material piezoelétrico em microssistemas, pois o material precisa ser polido em um campo elétrico forte ( $> 1$  kV mm (CRAWLEY; ANDERSON, 1990)) e em uma temperatura elevada (PZT-5A e PZT- 5H têm temperaturas Curie de  $\sim 365^{\circ}\text{C}$  e  $\sim 190^{\circ}\text{C}$ , respectivamente (BERLINCOURT et al., 2000)). Essa integração pode ser simplificada usando uma

configuração piezoelétrica de filme fino, uma vez que é necessária uma tensão mais baixa para o polimento (~ 200 V para um filme com 127 µm de espessura).

### 2.3 PIEZOELETRICIDADE

Existem vários métodos para se obter energia elétrica a partir de vibrações geradas pelo meio ambiente, incluindo o uso da indução eletromagnética (GLYNNE-JONES et al., 2004), geração eletrostática (MITCHESON et al., 2004) e materiais piezoelétricos.

A geração de energia através de materiais piezoelétricos consiste em um método que transforma energia mecânica em energia elétrica, ao deformar um material piezoelétrico (SODANO et al., 2004). O efeito piezoelétrico foi descoberto por J e P Curie em 1880. Eles descobriram que certos cristais, quando foram submetidos a uma tensão mecânica, tornaram-se polarizados eletricamente e o grau desta polarização era proporcional à tensão aplicada. Por outro lado, quando expostos a um campo elétrico, esses materiais se deformavam (ANTON; SODANO, 2007).

A piezoeletricidade é a capacidade de gerar um potencial elétrico de elementos como cristais e alguns tipos de cerâmica de um estresse mecânico. (SKOOG et al., 2006). Se o material piezoelétrico não estiver em curto-circuito, o esforço mecânico aplicado induz uma tensão em todo o material. O tipo mais comum de dispositivo utilizado para reduzir a energia de vibração é um dispositivo piezoelétrico em cantilever que gera eletricidade dobrando-o, agitando-o e deformando-o (CHOI et al., 2006).

O efeito piezoelétrico pode se dar em dois momentos. O primeiro refere-se ao efeito piezoelétrico direto, que descreve a capacidade do material de transformar tensão mecânica em carga elétrica. O segundo, por sua vez, consiste no efeito inverso, que é a capacidade de converter um potencial elétrico aplicado em energia de deformação mecânica. Assim, o efeito piezoelétrico direto é responsável pela capacidade do material de funcionar como um sensor, enquanto o efeito piezoelétrico inverso é responsável pela sua capacidade de funcionar como um atuador (SODANO et al., 2004).

O comportamento mecânico e elétrico de um material piezoelétrico pode ser modelado por duas equações constitutivas linearizadas. Essas equações contêm

duas variáveis mecânicas e duas elétricas (SODANO et al., 2004). O efeito direto e o efeito inverso podem ser modelados pelas seguintes equações:

$$\text{Efeito piezoelétrico direto: } \{D\} = [e]^T \{S\} + [\alpha^S] \{E\} \quad (1)$$

$$\text{Efeito piezoelétrico inverso: } \{T\} = [c^E] \{S\} - [e] \{E\} \quad (2)$$

Onde,  $\{D\}$  é o vetor de deslocamento elétrico,  $\{T\}$  é o estresse do vetor,  $[e]$  é a matriz de permitividade dielétrica,  $[c^E]$  é a matriz de coeficientes elásticos a força elétrica constante,  $\{S\}$  é o vetor de deformação,  $[\alpha^S]$  é a matriz dielétrica em constante tensão mecânica e  $\{E\}$  é o vetor de campo elétrico.

O campo elétrico pode ser aplicado ao longo de qualquer superfície do material, cada uma resultando em um potencial de geração de tensão diferente. Portanto, as propriedades do material piezoelétrico devem conter uma convenção de sinal para facilitar a capacidade de aplicar potencial elétrico em três direções (SODANO et al., 2004).

### 2.3.1 Materiais Piezoelétricos

Os materiais piezoelétricos vêm recebendo uma grande atenção devido à sua capacidade de converter diretamente a energia aplicada em energia elétrica utilizável e à facilidade com que podem ser integrados em um sistema. Essa conversão direta de energia ocorre porque a estrutura molecular piezoelétrica é orientada de tal modo que o material exibe uma separação de carga local, conhecida como um dipolo elétrico (ANTON; SODANO, 2007).

A capacidade dos materiais piezoelétricos para receber qualquer pressão e converter isso em sinal elétrico tem atraído muitos pesquisadores, que tentam implementar circuitos e sistemas para converter pressão e vibrações em energia elétrica (ANTON; SODANO, 2007).

Outra vantagem do mecanismo de conversão piezoelétrica é a capacidade de conversão recíproca inerente, onde materiais piezoelétricos convertem a energia mecânica diretamente em energia elétrica, sem qualquer entrada externa adicional. Essa capacidade inerente permite arquiteturas mais simples para Harvesters de Energia Piezoelétrica (HEPs), em comparação com suas contrapartes eletromagnéticas e eletrostáticas. Devido a essas vantagens, as HEPs foram

estudadas, extensivamente, na última década, como pode ser verificado na Figura 1 (TOPRAK; TIGLI, 2014).

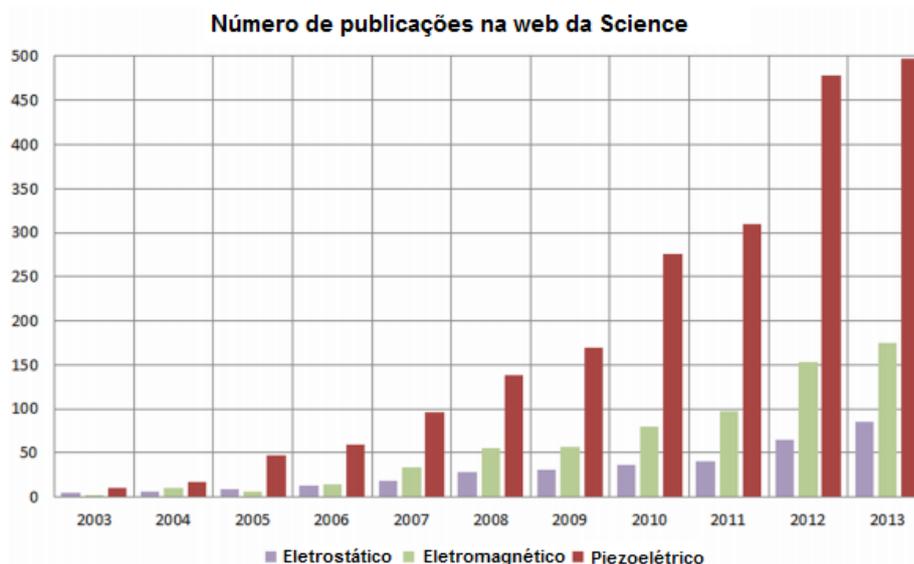


Figura 1 – Número de publicações sobre coletores de energia piezoelétricos, eletromagnéticos e eletrostáticos na Web of Science entre 2003 e 2013 (TOPRAK; TIGLI, 2014).

Através da visualização do gráfico (Figura 1), é possível perceber claramente o crescente interesse em HPEs, especialmente, nos últimos 5 anos, confirmando que a energia gerada a partir de materiais piezoelétricos tem muito mais publicações e, sendo assim, tem despertado maior interesse por parte dos pesquisadores.

Os materiais piezoelétricos podem ser configurados de diferentes formas, conforme a aplicação desejada para geração de energia. Assim, a configuração do dispositivo para extração de energia pode ser alterada através da modificação de materiais piezoelétricos, da alteração do padrão dos elétrodos, da alteração da direção do impulso. Também é possível sua alteração estendendo-se o material para maximizar o volume ativo, adicionando pré-esforço para maximizar o acoplamento e a tensão aplicada do material e, ainda, sintonizando a frequência de ressonância do dispositivo (ANTON; SODANO, 2007).

A colisão ou deformação de um material piezoelétrico causa separação de carga através do dispositivo, produzindo um campo elétrico e resultando em uma tensão, queda proporcional ao estresse aplicado. O sistema oscilante é tipicamente um feixe de cantilever, estrutura com uma massa na extremidade solta da alavanca,

uma vez que proporciona maior tensão para uma dada força de entrada (ROUNDY et al., 2003).

Há várias formas disponíveis de materiais piezoelétricos, como: monocristalino (por exemplo, quartzo); piezocerâmico (por exemplo, titanato de zirconato de chumbo ou PZT); filme fino (por exemplo, óxido de zinco pulverizado); filmes baseados em tela em pós piezocerâmicos (WHITE; TURNER, 1997; BAUDRY, 1987) e materiais poliméricos, como o fluoreto de polivinilideno (PVDF) (BEEBY et al., 2006).

Nessa diversidade de materiais, o mais usado na geração de energia elétrica é o titanato de zirconato de chumbo, cerâmica piezoelétrica, ou piezocerâmico, conhecido como PZT. Embora, o PZT seja amplamente utilizado como material de geração de energia, o piezocerâmico é extremamente frágil, causando limitações nas tensões aplicadas que podem ser absorvidas com segurança sem danos. Outro material piezoelétrico comumente utilizado é o poli (vinilideno fluoreto) (PVDF) (ANTON; SODANO, 2007).

Devido aos materiais PZT serem rígidos e quebradiços, as cerâmicas monolíticas não podem ser coladas em superfícies curvas, limitando assim sua faixa de aplicação. Já os polímeros piezoelétricos, no caso o poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF), são polímeros amplamente utilizados em várias aplicações, pois são flexíveis e, portanto, podem facilmente assumir a forma de uma superfície curva (JAIN et al., 2014).

O polímero de PVDF tem propriedades piezoelétricas muito melhores do que qualquer outro material orgânico. Além disso, os elementos PVDF parecem ter certas vantagens em comparação com suas contrapartes piezocerâmicas. Esse polímero pode ser caracterizado como um material leve, complacente, que exibe considerável resistência dielétrica, alta sensibilidade a cargas mecânicas e propriedades piezoelétricas estáveis em diversos ambientes químicos. Devido a essas qualidades, o PVDF tem sido usado cada vez mais em uma variedade de aplicações, particularmente em dispositivos como sensores e transdutores (CROSS, 1995).

Atualmente, o polímero PVDF é produzido na forma de filmes finos de espessuras que variam de  $102 \times 10^{-4}$  a  $762 \times 10^{-3}$  mm. Tipicamente, uma fina camada de níquel ou alumínio é depositada em ambas as superfícies do material, para fornecer condutividade elétrica quando um campo elétrico é aplicado, ou para

permitir medições da carga induzida por deformações mecânicas (VINOGRADOV et al., 1999).

As principais vantagens da utilização de filmes poliméricos em vez de piezocerâmicas ou cristais individuais são que os filmes poliméricos são flexíveis e podem ser fabricados nas formas e tamanhos desejados, através de processos de processamento simples (ROCHA et al., 2010). Assim, além de serem isentos de chumbo, são fáceis de processar e mais baratos que os demais materiais piezoelétricos (VATANSEVER et al., 2011).

Os filmes piezo poliméricos PVDF têm muitas vantagens, principalmente devido às suas propriedades mecânicas: flexibilidade, alta resistência mecânica, estabilidade dimensional, atividade piezoelétrica homogênea no plano do filme, altos coeficientes piezoelétricos, sem efeito de envelhecimento para temperaturas até 808°C (PVDF) ou 1108°C (copolímero), constante dielétrica alta, material quimicamente inerte com baixa impedância acústica próxima à da água. A piezoelectricidade do PVDF é então caracterizada com coeficientes de proporcionalidade entre valores mecânicos e elétricos (ou causas e efeitos). Além de que, por causa da anisotropia desses materiais piezoelétricos, os coeficientes são determinados para cada direção do elemento (UEBERSCHLAG, 2001).

As propriedades básicas do PVDF permitem uma grande variedade de aplicações, especialmente com materiais altamente reprodutíveis. Entre elas, pode ser citada a sua utilização em microfones, alto-falantes, hidrofones, sistemas de sonar, dispositivos ultrassônicos, dispositivos de localização de impacto, dispositivos de reconhecimento de formas, teclados, obturadores ópticos, sensores e atuadores robóticos, instrumentos de medição e amortecimento de vibrações, além de inúmeras aplicações na área médica, como em osteogênese, monitoramento de movimento e ecografia (UEBERSCHLAG, 2001).

#### 2.3.1.1 Estudos com Materiais Piezoelétricos

Os materiais piezoelétricos podem ser configurados de várias maneiras que se revelam úteis em aplicações de coleta de energia. Uma grande quantidade de pesquisas recentes em coleta de energia com materiais piezoelétricos concentrou-se em melhorar a eficiência de sistemas de captação de energia piezoelétrica (ANTON; SODANO, 2007). Alguns artigos são citados a seguir, onde apresentam variedades

nas configurações e aplicações utilizadas, investigando diferentes formas de gerar energia elétrica através da utilização de materiais piezoelétricos, nesse caso o polímero PVDF.

Oh et al. (2010) relatam uma investigação experimental de um sistema de energia eólica em forma de árvore, usando materiais piezoelétricos, através da construção de uma árvore, utilizando dois tipos diferentes de materiais piezoelétricos. Inicialmente um material flexível e macio foi usado para fazer as folhas, enquanto o outro, duro, foi aplicado na parte do tronco da árvore, exigindo ventos fortes para gerar energia.

Os principais esforços desse trabalho foram feitos para gerar eletricidade usando um número de filmes piezoelétricos finos (LDT4-028K / L). O modelo de PZT usado nesse estudo para extrair energia de um vento forte foi o Q220-A4-503YB. Os PZTs foram colocados na parte inferior da árvore, no local onde o tronco é conectado às raízes e onde ocorre a geração de eletricidade quando o vento atinge velocidades altas (OH et al., 2010).

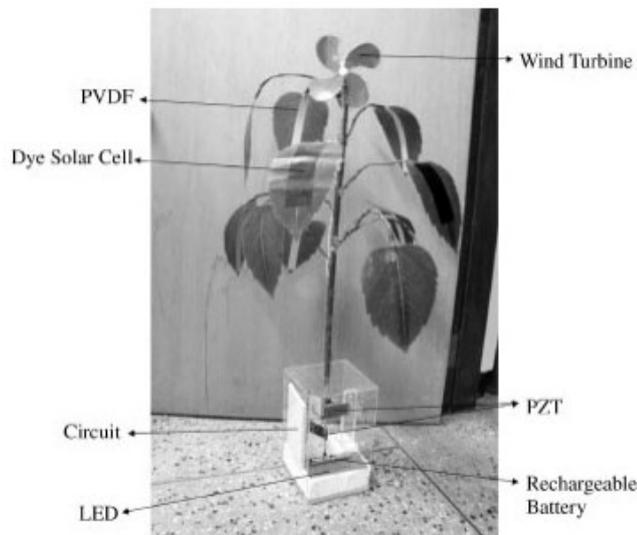


Figura 2 – Modelo árvore piezoelétrica (OH et al., 2010).

Mais recentemente, McCloskey et al. (2017) realizaram um estudo a fim de converter a energia gerada a partir de folhas piezoelétricas de PVDF (MSI-LDT2-028K/L), sugerindo a sua utilização na implantação de árvores piezoelétricas em ambientes populosos, uma vez que turbinas são vistas como incômodo. Seu estudo

constou da formação de uma árvore piezelétrica a partir de dez folhas montadas em uma treliça, como pode ser verificado na Figura 3.

Os experimentos também foram realizados junto ao meio ambiente, onde a velocidade média do vento era medida durante o tempo de realização do experimento. Dessa forma, os experimentos realizados internamente possuíam uma dependência quanto ao ângulo, gerando uma potência bem inferior que o experimento ao ar livre, em que todas as folhas eram excitadas pela vibração do vento (MCCLOSKEY et al., 2017).

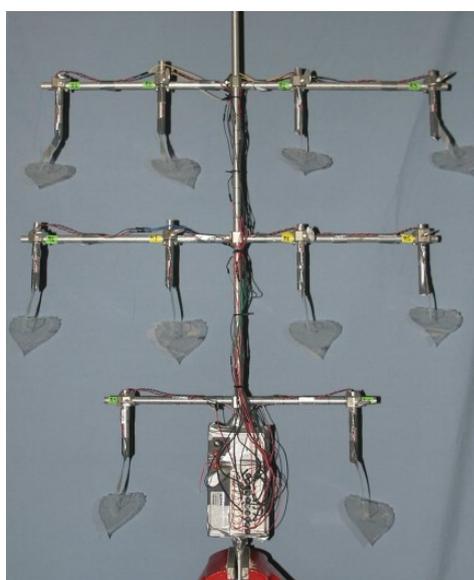


Figura 3 – Folhas de plástico em forma de cottonwood montadas em treliça de alumínio (MCCLOSKEY et al., 2017).

Nessa mesma linha, Li e Lipson (2009) investigaram os princípios e a viabilidade da energia de coleta do vento em espaços restritos, como em torno de edifícios, buscando uma alternativa às turbinas eólicas rotativas convencionais. A ideia central foi colher energia da vibração induzida pelo vento, em vez da rotação induzida pelo vento.

Assim, foi proposto um design em forma de L com haste vertical e horizontal, em que a haste horizontal apresentou uma densidade maior de saída de potência. Nesse estudo, os materiais piezoelétricos utilizados foram o PVDF (DT2-028K/L; LDT1-028K/L e LDT2-028K/L), sendo a chapa e os filmes flexíveis conduzidos a oscilar, assim como uma bandeira ou folha ao bater do vento (LI; LIPSON, 2009).

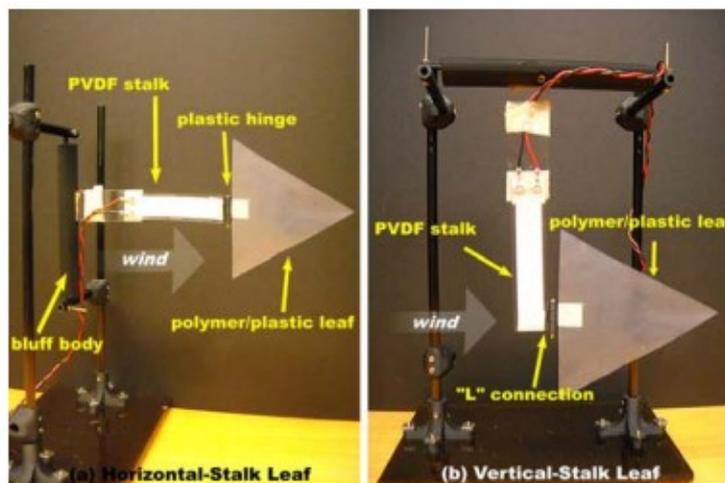


Figura 4 - Diferentes configurações da piezo-folha (LI E LIPSON, 2009).

Rocha et al. (2010) descreveram o uso de polímeros piezoelétricos para coleta de energia de pessoas caminhando, através da fabricação de um calçado capaz de gerar e acumular energia. Neste âmbito, o fluoreto de p-polivinilideno PVDF eletroativo utilizado como elemento de captação de energia foi introduzido numa sola bicolor preparada por injeção, juntamente com a eletrônica necessária para aumentar a eficiência da transferência e armazenagem de energia. Um gerador eletrostático também foi incluído para aumentar a captação de energia.

O material precisou ser posicionado em locais com maiores proporções e mais pressão variável exercida durante a caminhada. A energia gerada pela folha de PVDF dentro do tênis variou de dezenas a centenas de miliwatts, dependendo da área, da colocação, da geometria e do número de folhas (ROCHA et al., 2010).



Figura 5 – Protótipo de gerador de energia na sola do sapato (ROCHA et al., 2010).

Vatansever et al. (2011) avaliaram as respostas de tensão de estruturas compostas de fibra piezoelétrica à base de cerâmica (PFCs) e tiras piezoelétricas baseadas em polímero, PVDF (fluoreto de polivinilideno), quando submetidas a várias velocidades de vento e gotículas de água, a fim de investigar a possibilidade de geração de energia a partir destes. Esse trabalho mostrou que materiais poliméricos piezoelétricos podem gerar maior tensão/energia do que materiais piezoelétricos baseados em cerâmica, provando-se que a produção de energia a partir de fontes renováveis, como gotas de chuva e vento, é possível usando materiais poliméricos piezoelétricos.

Os materiais cerâmicos geraram um pico de tensão relativamente menor comparado ao dos materiais piezoelétricos baseados em polímeros. Isso indica que a rigidez do material cerâmico dificulta as oscilações causadas pelas gotas de água. Assim, a massa de gotas de água não se mostrou suficiente para ativar os materiais cerâmicos piezoelétricamente. Observou-se, também, que a turbulência criada no túnel de vento foi capaz de sustentar as oscilações da amostra, o que contribuiu para a geração contínua de tensão, sendo que as gotas de água liberadas de maiores alturas e com massa maior causaram, conseqüentemente, maior geração de tensão (VATANSEVER et al., 2011).



Figura 6 – Configuração experimental gota de chuva – experiência com o vento (VATANSEVER et al., 2011).

### 2.3.2 Efeito Piezoelétrico

Os materiais piezoelétricos pertencem a uma classe maior de materiais chamado ferroelétricos. Um dos traços definidores de um material ferroelétrico é que

sua estrutura molecular está orientada de modo que o material exiba uma separação de carga local, conhecida como um dipolo elétrico (SODANO et al., 2004).

Ao longo da composição do material, os dipolos elétricos são orientados aleatoriamente, mas quando o material é aquecido a certo ponto, a temperatura Curie e um campo elétrico muito forte são aplicados, os dipolos elétricos reorientam-se em relação ao campo elétrico. Esse processo é denominado polling. Quando o material é resfriado, os dipolos mantêm sua orientação e, após o processo de polling ser concluído, o material exibirá o efeito piezoelétrico (SODANO et al., 2004).

Sugere-se que o polling apresenta dois efeitos principais em um nível estrutural, a reorientação dos dipolos ao longo da direção do campo e a transformação da fase  $\alpha$  para fase  $\beta$  (RAMOS et al., 2005).

Existem dois modos de acoplamento comumente usados para geradores de energia piezoelétricos, identificados pela direção da força mecânica e pela carga elétrica. A direção da polarização é convencionalmente designada como a direção "3". Como demonstrado na Figura 7, o modo "33" implica que as cargas são coletadas na superfície do eletrodo perpendicular à direção de polarização, quando forças mecânicas de tração ou compressão são aplicadas ao longo do eixo de polarização. Ainda, a Figura 7 ilustra que o modo "31" implica que as cargas são coletadas na superfície do eletrodo perpendicular à direção da polarização, quando a força é aplicada ao longo da direção perpendicular ao eixo de polarização (ZELENKA, 1986).

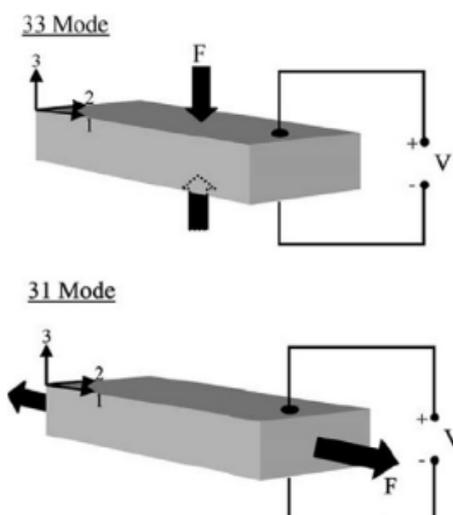


Figura 7 – Ilustração modo 33 e modo 31, operação para materiais piezoelétricos (ANTON e SODANO 2007).

Para a maioria dos materiais piezoelétricos, o fator de acoplamento do modo 33,  $k_{33}$  é maior que o fator de acoplamento do modo 31,  $k_{31}$ . No modo 31, as tensões mecânicas são aplicadas ao longo do eixo 1. As tensões podem ser facilmente conseguidas ligando o elemento piezoelétrico a uma subestrutura submetida à flexão. A conversão de energia de modo 33 pode alcançar maior potência de saída, aumentando a camada da cerâmica. Para fontes de pressão muito baixas e tamanhos limitados, a conversão de modo 31 pode ter uma vantagem maior na conversão de energia (BEEBY et al., 2006). Já para aplicação das estruturas de MEMS, o tamanho do gerador é pequeno e as fontes ambientais para energia mecânica são limitadas. A conversão de energia de modo 31 é adequada para microgeradores piezoelétricos usados em estruturas de MEMS (LU et al., 2003).

Um gerador de energia típico de modo 31 é um gerador de energia piezoelétrico tipo feixe, no qual uma camada piezoelétrica é ligada a um elemento hospedeiro. Quando o elemento hospedeiro está vibrando sob a excitação externa, uma deformação correspondente é induzida na camada piezoelétrica (LU et al., 2003).

Analiticamente, Yang et al. (2005) mostraram que, para uma placa piezoelétrica operando no modo 33, a potência de saída do dispositivo é proporcional ao coeficiente de acoplamento,  $k$ , e a constante dielétrica,  $\epsilon$ . Isso confirma que os dispositivos com maiores coeficientes de acoplamento produzirão mais energia e se comportarão de maneira mais eficiente.

Os materiais piezoelétricos podem ser configurados de muitas maneiras diferentes, o que se mostra muito útil em aplicações de coleta de energia. A configuração do dispositivo pode ser alterada através da modificação de materiais piezoelétricos, alterando o padrão do eletrodo, alterando o polimento e a direção da tensão, mergulhando o material para maximizar o volume ativo, adicionando tensão para maximizar o acoplamento e a tensão aplicada do material, e sintonizando a frequência de ressonância do dispositivo (ANTON; SODANO, 2007).

A configuração de cada dispositivo pode ser observada na Figura 8.

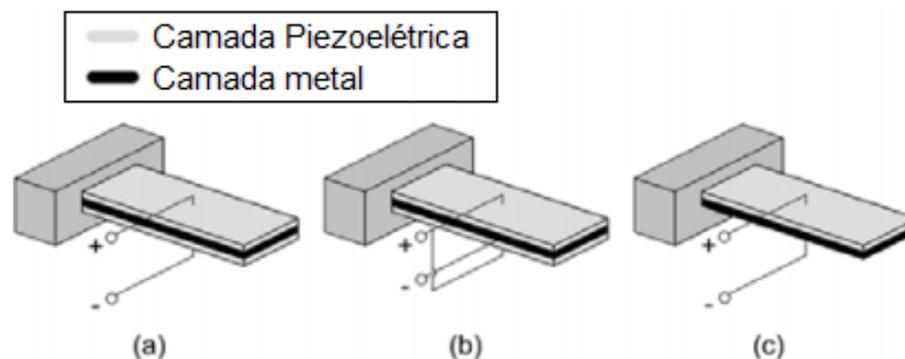


Figura 8 – (A) Uma série tripla tipo de camada de sensor piezoelétrico. (B) Um sensor de tripla camada tipo piezoelétrico paralelo. (C) Um unimorph do sensor piezoelétrico (ANTON e SODANO, 2007).

### 2.3.3 Os coeficientes e modos piezoelétricos

O coeficiente de deformação piezoelétrico  $d_{ij}$  é um tensor (3x6), que é definido como a polarização elétrica gerada na direção  $i$  do material por unidade de tensão mecânica do índice  $J$  aplicada a ele ou a tensão mecânica induzida do índice  $J$  por unidade de campo elétrico aplicado na direção  $i$ . O coeficiente  $d$  piezoelétrico tem a unidade de C/N ou m/V. Existem outros coeficientes piezoelétricos que são definidos de diferentes maneiras, como o coeficiente de tensão piezoelétrico, o coeficiente de tensão piezoelétrica  $g$  e o coeficiente de deformação piezoelétrica inversa  $h$  (HARRISON; OUNAIES, 2002).

Na maioria dos materiais piezoelétricos existem apenas 3 ou 4 elementos de coeficiente piezoelétrico, de modo que o restante dos elementos são zero no tensor (3x6). Os dois elementos populares e comuns na maioria dos materiais piezoelétricos são  $d_{31}$  e  $d_{33}$ . O coeficiente  $d_{33}$  é chamado de coeficiente longitudinal, sendo que descreve a polarização elétrica gerada na mesma direção da tensão aplicada (RAMADAN et al., 2014).

O coeficiente  $d_{31}$  é chamado de coeficiente transversal e descreve a polarização elétrica gerada em uma direção perpendicular à direção do estresse aplicado. Em MEMS piezoelétricos, é comum usar a terminologia modo 31 e modo 33 para distinguir os dois mecanismos de transdução (RAMADAN et al., 2014).

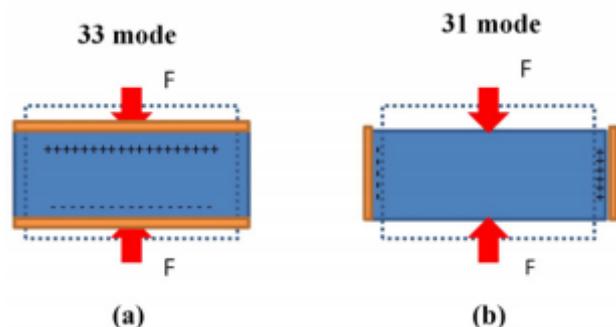


Figura 9 – Os modos de transdução piezoelétricos (RAMADAN et al., 2014).

### 2.3.4 Acoplamento eletromecânico

Um parâmetro útil para comparar diferentes materiais piezoelétricos é o coeficiente de acoplamento eletromecânico denotado como  $k$ . O coeficiente de acoplamento é uma medida da conversão entre energia mecânica e elétrica, usando o material piezoelétrico, e leva os mesmos índices que o coeficiente piezoelétrico  $d$  (HARRISON; OUNAIES, 2002).

O coeficiente piezoelétrico efetivo de um filme fino é diferente daquele de um substrato em massa do mesmo material, devido à qualidade da orientação do cristal do filme fino crescido e as condições de contorno que o substrato impõe ao crescimento. O coeficiente  $d_{iJ,f}$  é empregado para indicar o coeficiente piezoelétrico efetivo do filme fino, que é medido na prática e pode ser relacionado às constantes  $d_{ij}$  e  $S_{IJ}$  (HARRISON; OUNAIES, 2002).

$$k_{iJ} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon_{ij}^{\sigma} S_{JJ}^E} \quad (3)$$

A potência produzida no modo compressivo pode ser melhorada aumentando a espessura do elemento piezoelétrico, ou usando pilhas de camada múltipla. Já o carregamento compressivo, no entanto, não é um mecanismo de acoplamento prático para energia de vibração gerada na maioria das aplicações (RAMADAN et al., 2014).

As propriedades piezoelétricas variam de acordo com a idade, estresse e temperatura do material. Devido às características únicas dos materiais piezoelétrico, eles têm grande potencial para serem adotados em muitas aplicações

de engenharia, tais como sensores, atuadores, dispositivos e estruturas inteligentes. No entanto, os materiais piezoelétricos, geralmente, apresentam algumas falhas, como fratura, dureza e alto peso, essas deficiências limitam inevitavelmente suas aplicações (ANTON; SODANO, 2007).

## 2.4 PIEZOELETRICIDADE EM POLÍMEROS

Existem diferentes categorias de polímeros que podem ser consideradas piezoelétricas. A primeira categoria de polímeros piezoelétricos é o polímero a granel. Trata-se de filmes de polímeros sólidos que possuem o mecanismo piezoelétrico através de sua estrutura molecular (RAMADAN et al., 2014).

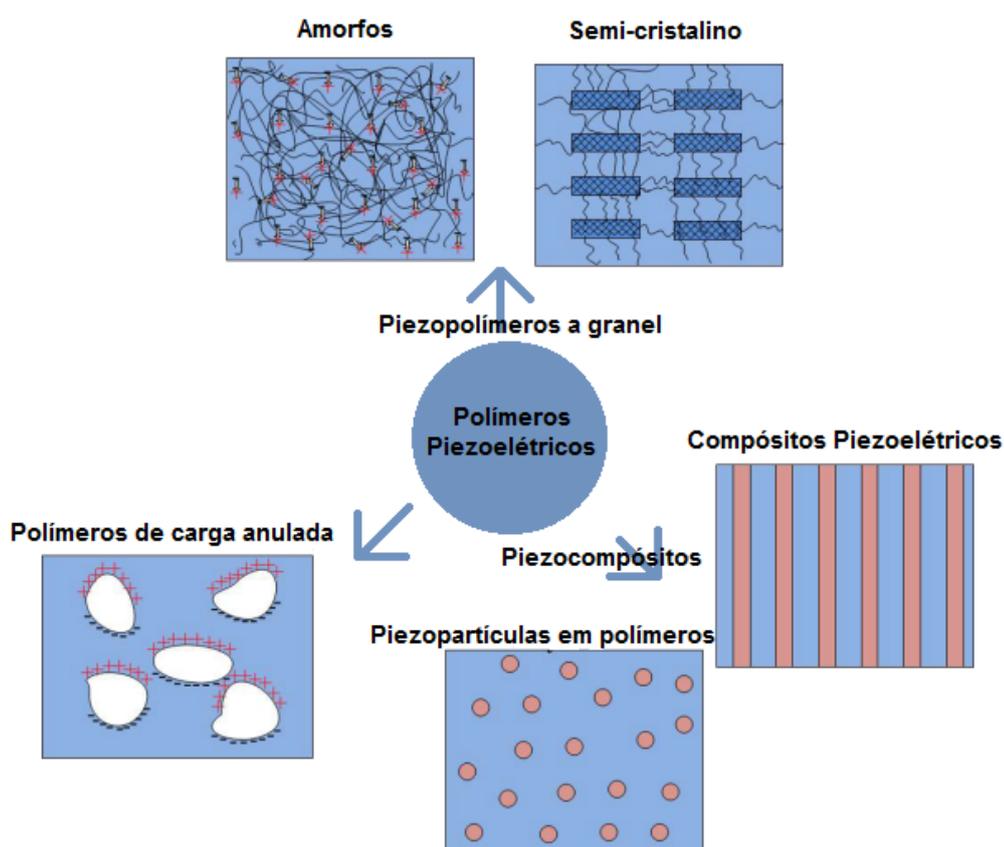


Figura 10 – Diagrama dos tipos de polímeros piezoelétricos (RAMADAN et al., 2014).

A segunda categoria é o polímero compósito piezoelétrico, estruturas poliméricas com cerâmicas piezoelétricas integradas, das quais o efeito piezoelétrico

é gerado. Estes compósitos fazem uso da flexibilidade mecânica dos polímeros e do alto acoplamento eletromecânico das cerâmicas piezoelétricas (RAMADAN et al., 2014).

O terceiro tipo é o polímero com carga anulada, um tipo de polímero piezoelétrico radicalmente diferente das duas primeiras categorias, no qual os vazios de gás são introduzidos e as superfícies são carregadas de forma a formar dipolos internos. A polarização desses dipolos muda com a tensão aplicada no filme polimérico (RAMADAN et al., 2014).

#### **2.4.1 Polímeros piezoelétricos a granel**

Os polímeros piezoelétricos a granel têm um efeito piezoelétrico, devido à estrutura molecular do polímero e a sua orientação. Existem dois tipos de polímeros a granel, os quais possuem princípios operacionais diferentes: os polímeros semicristalinos e os polímeros amorfos. Nesses dois tipos, impõem-se requisitos estruturais imprescindíveis para um material polimérico a granel ser piezoelétrico. Primeiro, a estrutura molecular do polímero deve conter inerentemente dipolos moleculares. Em segundo lugar, estes dipolos podem ser reorientados dentro do material a granel e mantidos no seu estado de orientação preferido, processo denominado *polling* (RAMADAN et al., 2014).

##### **2.4.1.1 Polímeros piezoelétricos semicristalinos.**

Há uma classe de materiais poliméricos que tem uma estrutura semicristalina, como o fluoreto de polivinilideno (PVDF) (ANTON; SODANO, et al., 2007), poliamidas, polímeros de cristal líquido (CUADRAS et al., 2010) e Parylene-C (ERTURK; INMAN, 2011). Polímeros semicristalinos operam em princípios similares a materiais inorgânicos piezoelétricos.

Os íons carregados positivamente e negativamente (ou grupo polar em polímeros) são dispostos em uma forma cristalina para causar a mudança na polarização com o estresse aplicado.

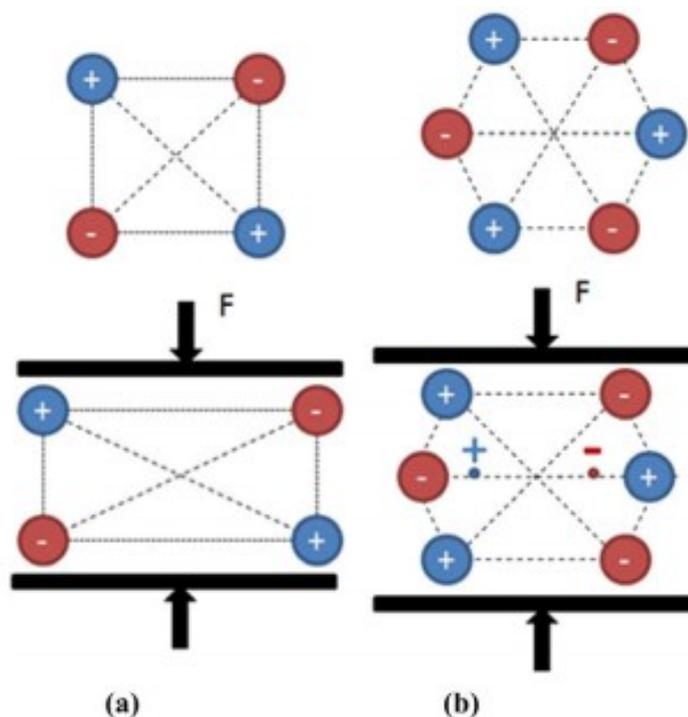


Figura 11 – Exemplos de estruturas de cristal 2D: (a) quadrado não piezoeétrico e (b) hexagonal piezoeétrico (RAMADAN et al., 2014).

Na Figura 11 (a), uma estrutura quadrada com arranjos de íons positivos e negativos é hipoteticamente colocada sob tensão de compressão. Para essa estrutura, o centro equivalente de carga dos íons positivos e negativos ainda está no mesmo ponto e não há mudança de polarização devido à força aplicada (RAMADAN et al., 2014).

Por outro lado, para um hexágono 2D com os arranjos iônicos mostrados na Figura 11 (b), o estresse aplicado induz uma mudança no centro de carga dos íons positivos e negativos, o que significa uma mudança na polarização que causa um efeito efetivo no campo elétrico. É preciso considerar que a maior parte de um polímero semicristalino não é uma estrutura cristalina única. Ele pode ser visto como cristais microscópicos aleatoriamente orientados e distribuídos em um volume amorfo. Assim, para obter uma resposta piezoeétrica efetiva, deve haver uma capacidade de reorientar esses cristalitos e mantê-los na orientação preferencial, o que é feito pelo processo de polimento (RAMADAN et al., 2014).

## 2.5 MATERIAL PIEZOELÉTRICO PVDF

O PVDF é o piezopolímero mais utilizado e citado em dispositivos eletromecânicos, devido ao maior coeficiente piezoelétrico, 20 – 28 pC N<sup>-1</sup>, comparado com outros polímeros (HARRISON; OUNAIES, 2002). O PVDF é um polímero semicristalino que é sintetizado pela polimerização dos monómeros H<sub>2</sub>C = CF<sub>2</sub> (ver Figura 6).

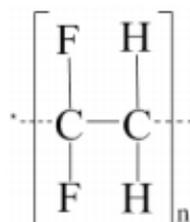


Figura 12 – Estrutura molecular PVDF (RAMADAN et al., 2014).

Um defeito na cadeia polimérica conectada ocorre quando dois grupos CF<sub>2</sub> ou grupos CH<sub>2</sub> estão conectados. Na cadeia polimérica aumenta a polaridade do filme polimérico semicristalino, o que conseqüentemente aumenta a resposta piezoeétrica (JONES et al., 2005).

As fases PVDF mais estudadas e comumente obtidas são as  $\alpha$  e fases  $\beta$  (MARTINS et al., 2014). A fase  $\alpha$  é obtida diretamente da massa fundida sob a forma de um filme compacto e apresenta boas propriedades mecânicas e estabilidade térmica; contudo, não apresenta piezoeletricidade. Por outro lado, a fase  $\beta$  é a fase que mostra o maior desempenho piezoelétrico entre os dois piezoelétricos cristalinos, fases de PVDF ( $\beta$  e  $\gamma$ ).

No entanto, a fase  $\beta$  não pode ser obtida diretamente de um estágio limpo e, quando preparado por fundição com evaporação em alta temperatura, resulta em um filme poroso muito frágil (SENCADAS et al., 2006). Dessa forma, o processo atual usado pela indústria para alcançar um filme puro e não poroso de  $\beta$ -PVDF, com propriedades mecânicas, envolve a aplicação de alto estresse à amostra  $\alpha$ -PVDF em uma temperatura de 80 °C (GUO et al., 2013).

O PVDF é representado por qualquer forma de deformação mecânica ou vibração. A energia de vibração pode ter várias origens, como movimentos do corpo, vibrações sonoras, movimentos hidráulicos, vento, chuva, fricção (TAYLOR et al., 2001; VATANSEVER et al., 2011).

Ainda, o PVDF pode oferecer a flexibilidade e a robustez necessárias para o desenvolvimento de microeletrônicos e dispositivos portáteis. Embora o filme PVDF gere energia elétrica, sob uma grande deformação elástica reversível, a maior desvantagem continua a ser a densidade de energia gerada ( $J/m^3$ ), geralmente inferior a materiais piezocerâmicos (NAKAJIMA et al., 2011).

Várias estratégias de design do PVDF vem sendo desenvolvidas para melhorar a produção de propriedades eletroativa, tais como a sua copolimerização com trifluoretileno poli (VDF-co-TrFE) e incorporação em camadas múltiplas (NAKAJIMA et al., 2011; LEE; CHOI, 2013); ou nanoestruturado compósitos (ZENG et al., 2013); a energia de irradiação elevada mostrou ser outra maneira competitiva de modificar as propriedades estruturais e físicas de polímero piezoelétrico (NAKAJIMA et al., 2011).

## 2.6 ESCOAMENTO FORÇADO

A velocidade do movimento do ar define a força do vento que está, diretamente, relacionada à quantidade de energia no vento, ou seja, sua energia cinética. A fonte dessa energia, no entanto, é a radiação solar, sendo que a radiação eletromagnética do Sol aquece de forma desigual a superfície da Terra, sendo mais forte nos trópicos e mais fraca nas altas latitudes. Esse aquecimento desigual é convertido através de processos convectivos que são perturbações do equilíbrio hidrostático, que é ajustado pela rotação da Terra (LETCHER, 2017).

A energia eólica depende da:

- quantidade de ar (o volume de ar em consideração);
- velocidade do ar (a magnitude de sua velocidade);
- massa de ar (relacionado ao seu volume via densidade).

Nesse contexto, entretanto, o vento, sendo um fenômeno natural, varia a cada dia e depende da estação do ano. Logo, para que o vento seja bem aproveitado, não pode ter nenhum obstáculo no caminho, como prédios, morros, dentre outros. É possível observar, na Tabela 2, o comportamento do vento, dependendo da região (FEITOSA et al., 2002).

A Figura 13, a seguir, apresenta a velocidade média anual do vento a 50 metros de altura, referente a cinco condições topográficas como:

Zona costeira – região predominantemente de areia (praia), local em que o sentido do vento é do mar-terra.

Campo aberto – área com vegetações como plantações e pastagens.

Mata – região com vegetação fechada, árvores de grande porte, local que, devido a esse tipo de vegetação, causa interferência no escoamento do vento.

Morro – região com relevo pouco ondulado, apresentando uma quantidade pequena de vegetação e/ou pasto.

Montanha – região de complexo relevo, devido à presença de montanhas altas.

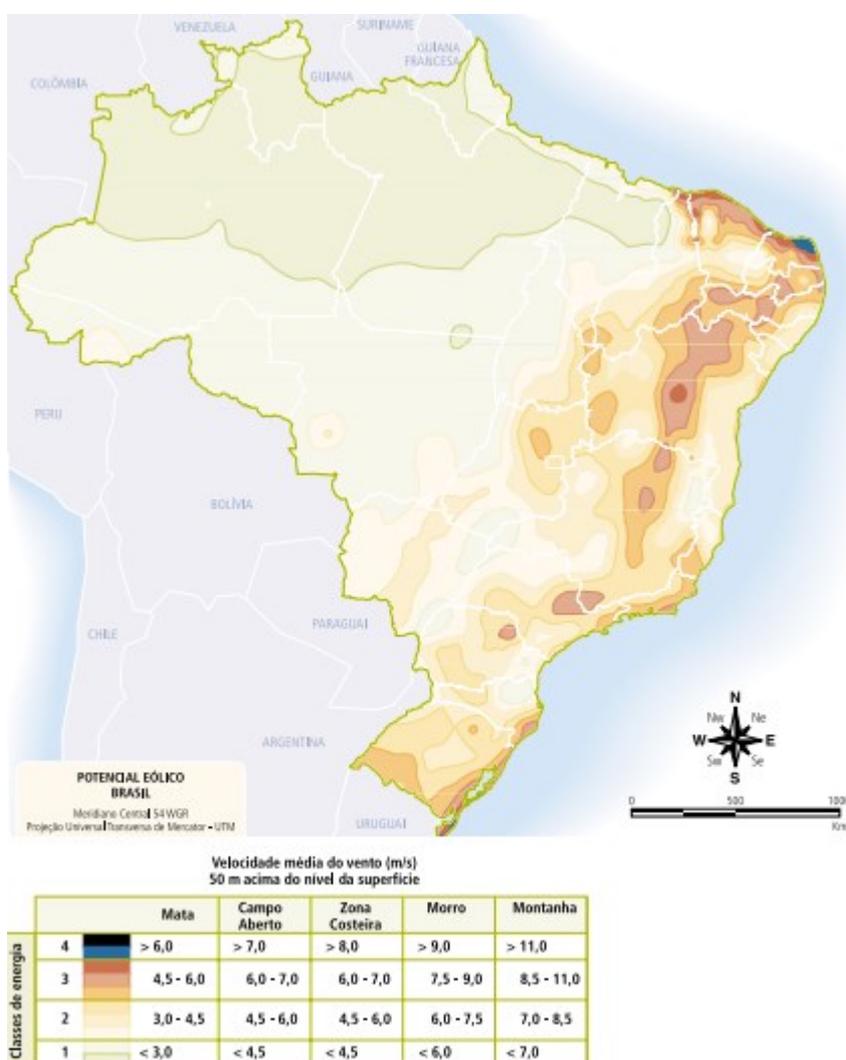


Figura 13 – Velocidade média anual do vento a 50 metros de altura referente a cinco condições topográficas (LETCHER, 2017).

A legenda apresenta as classes, as quais são definidas como:

Classe 1 – área com interesse relativamente baixo em questão de aproveitamento de energia eólica, devido ao seu baixo potencial.

Classe 2 e 3 – área que vai depender das condições do vento, condicionado ao local a ser realizada a medida, para ser ou não favorável.

Classe 4 – área com interesse alto de aproveitamento de energia eólica no Brasil.

Na sequência, a Tabela 2 apresenta as definições das classes de energia referentes à classificação das velocidades de vento, dependendo da região topográfica. Essa tabela apresenta a velocidade média anual do vento a uma altura de 50 metros em m/s (FEITOSA et al., 2002).

Tabela 2 – Definição das classes de energia

Classe	Mata Vm(m/s)	Campo Aberto Vm(m/s)	Zona Costeira Vm(m/s)	Morros Vm(m/s)	Montanhas Vm(m/s)
4	> 6	> 7	> 8	> 9	> 11
3	4,5 – 6	6 – 7	6,5 – 8	7,5 – 9	8,5 – 11
2	3 – 4,5	4,5 – 6	5 – 6,5	6 – 7,5	7 – 8,5
1	< 3	< 4,5	< 5	< 6	< 7

Fonte: Feitosa, 2002.

Uma alternativa renovável de conversão de energia de forma mais limpa é a conversão da pressão do vento em energia elétrica, usando materiais piezoelétricos. A piezoelectricidade é a eletricidade induzida pela pressão, em que certos materiais sólidos, como cristais e cerâmicas, vão acumulando carga devido ao estresse mecânico (LITTRELL et al., 2010).

Dispositivos piezoelétricos flexíveis têm sido utilizados para coletar energia eólica (DAGDEVIREN et al., 2016). O movimento oscilatório contínuo, requerido pelas coletoras piezoelétricas para aumentar a produção de energia, foi obtido pelo aproveitamento de instabilidades aerodinâmicas, incluindo vibração aeroelástica (BRYANT et al., 2011; ROSTAMI; ARMANDEI, 2017), vibrações induzidas por vórtices (BRYANT et al., 2011; LI et al., 2016) e vibrações induzidas por turbulência (VATANSEVER et al., 2011).

Ovejas e Cuadras (2011) utilizaram filmes piezoelétricos comerciais com diferentes áreas (de 3 a 30 cm<sup>2</sup>) e espessuras (40 a 64 µm), além de dois

escoamentos de vento diferentes foram investigados (2 – 18 m/s): escoamento laminar de um túnel de vento e escoamento turbulento de um secador usando três configurações diferentes e duas incidências de vento (paralelo e normal). Foi proposto um modelo simples baseado em geradores de corrente sinusoidal trabalhando em diferentes frequências, estudaram a dependência geométrica do piezofilme na geração de energia.

Por fim, verificaram que o acoplamento piezoelétrico sob o escoamento do vento melhora sua conversão na presença de turbulência, sendo facilmente alcançado em um escoamento do secador ou no caso do escoamento laminar em um túnel de vento. Esse estudo permite a construção de uma árvore piezelétrica que é capaz de coletar energia a energia em cargas convenientes. Também pode ser estendido a objetos em movimento, como carros, aviões ou navios, em que as correntes de ar são induzidas pelo deslocamento do objeto (OVEJAS; CUADRAS, 2011).

No caso de Myers et al. (2007), foram realizados experimentos em um moinho de vento piezoelétrico de pequena escala, pode resolver os problemas associados a redes de sensores autônomas em locais externos, remotos ou inacessíveis. Toda a estrutura do moinho de vento é feita de plástico e utiliza 18 piezoelétricos que tornam o projeto extremamente rentável.

A partir do princípio desse estudo eles concluem que com a metodologia utilizada é possível aproveitar a energia do vento livremente disponível em pequena escala. A energia gerada pode ser armazenada no super capacitor e pode ser usada para transmitir os dados do sensor sem fio para locais remotos (MYERS et al., 2007).

## 2.7 VIBRAÇÕES PIEZOELÉTRICAS SUJEITAS À FORÇA DO VENTO

A geração de energia cinética requer um mecanismo de transdução para que seja possível a conversão de energia, gerando energia elétrica a partir do movimento. O design de um sistema mecânico aumenta o acoplamento entre a fonte de energia cinética e o mecanismo de transdução, que dependem das características do meio ambiente, através do movimento gerado (ANTON; SODANO, 2007).

O transdutor piezoelétrico possui a capacidade de converter a energia elétrica em mecânica e/ou energia mecânica em elétrica, com isso essa propriedade pode ser considerada como um material inteligente, podendo se ajustar conforme ocorrerem as reações de mudanças no meio ambiente (GALHARDI, 2010).

Segundo Rao (2008), um transdutor é capaz de converter valores de variáveis físicas em sinais elétricos equivalentes. Devido à não linearidade ou resposta lenta, uns transdutores são mais utilizados que outros. Assim, os transdutores piezoelétricos são utilizados para medição de vibração.

Deivasigamani et al. (2014b) utilizaram a coleta de energia através do material polivinilideno-fluoreto de vinilideno (PVDF) em que vigas piezoelétricas de vibração induzidas pelo fluido foram estudadas. Os testes foram realizados num túnel de vento com fluido, forçando em oposição ao estado estacionário de vibração, a potência de saída do processo de torção combinada de flexão era mais baixa do que o processo de dobragem.

A otimização de um sistema usando vento laminar de velocidade constante não produz um sistema otimizado para funcionar com vento natural. Na natureza, rajadas de vento mudam de direção e são tornadas turbulentas por folhas e galhos vizinhos dentro da planta. Dessa forma, a natureza da fixação da folha e a mobilidade dos ramos de suporte se constituem em um determinante crucial do movimento da folha no vento natural (MCCLOSKEY et al., 2017).

Em uma árvore viva ao vento, uma porção considerável de folhas pode se assentar em uma sombra de vento criada pela folhagem densa do lado do vento. Além disso, em uma brisa forte, muitas folhas totalmente expostas podem permanecer empurradas para uma posição extrema e imóvel por longos períodos (MCCLOSKEY et al., 2017).

Sempre que um feixe experimenta carga transversal longe de seu eixo centróide, ele é submetido à flexão e torção acopladas. Isso significa que, em vez de uma única equação de flexão, o movimento é, na verdade, governado por um sistema de duas equações que precisam ser resolvidas simultaneamente. As equações são dadas por Weaver et al. (1990) como:

$$m \frac{\partial^2 (y - b\theta)}{\partial t^2} + YI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = f(t) \quad (4)$$

$$mc \frac{\partial^2 (y-b\theta)}{\partial t^2} + R \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - R_1 \frac{\partial^4 \theta}{\partial x^4} - \rho_s I_P \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = f(t) \quad (5)$$

Onde  $m = \rho_s hl$ , a massa por unidade de comprimento do feixe;  $\rho_s$  - densidade do feixe;  $h$  - espessura do feixe;  $l$  - Largura do feixe;  $Y$  - módulo de Young;  $I$  - momento de inércia;  $f(t)$  - função de carregamento transversal;  $b$  - distância entre o eixo central do feixe e seu centro de cisalhamento;  $I_P$  - momento polar de inércia;  $R$  - rigidez torcional e  $R_1$  - rigidez de deformação.

O estresse ( $T$ ) e a tensão ( $S$ ) induzidos pela torção de flexão acoplada são então:

$$T = \frac{Mz}{I} = -z \left( Y \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + G \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad (6)$$

$$S = -z \left( \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

Onde  $G$  - módulo de cisalhamento e  $z$  - distância do eixo neutro ao ponto de interesse. O estresse e a tensão induzidos pelas vibrações do feixe estão relacionados ao campo elétrico e ao deslocamento por (Erturk e Inman, 2011):

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & d \\ d^t & \varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde  $D$  - deslocamento elétrico;  $c$  - conformidade;  $d$ - coeficiente piezoelétrico direto;  $d^t$  - coeficiente piezoelétrico transversal,  $\varepsilon$ - permissividade;  $E$  - intensidade do campo elétrico.

Não é trivial obter uma solução de forma fechada para as Equações (4), (5) e (8). Como a captação de energia piezoelétrica envolve conversão de energia mecânica em energia elétrica, pode ser suficiente realizar uma análise teórica sobre a energia mecânica produzida na dobra transversal e compará-la com a energia mecânica produzida na torção de flexão acoplada. Essa análise pôde ser verificada posteriormente, com a potência elétrica obtida a partir dos estudos experimentais e computacionais (DEIVASIGAMANI et al., 2014b).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios e análises experimentais foram realizados no laboratório de Eletromagnetismo e Óptica, da Universidade Federal da Fronteira Sul, *Campus Cerro Largo* – RS.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados foram os seguintes:

- Um suporte rígido vertical, de ferro fundido, de 52 cm de altura e 2 cm de diâmetro;
- Material piezoelétrico de polifluoreto de vinilideno (PVDF LDT0-028K), fabricado pela MEAS, medindo 28  $\mu\text{m}$  de espessura, 25 mm de comprimento e 13 mm de largura;
- Pequenas conexões de “jacarés”;
- Fitas isolantes;
- Garra metálica;
- Ventilador comercial de mesa composto por 6 pás, marca Arno;
- Anemômetro, marca Minipa MDA-20 Data Logger;
- Osciloscópio digital, marca GW INSTEK, GDS – 1072 A – U, MemoryPrime;
- Materiais geométricos, de folhas laminados de PVC de diferentes geometrias.

#### 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para os ensaios com o polímero piezoelétrico de MEAS, Figura 14, na forma de viga engastada, foi necessário utilização de um suporte rígido vertical de pequeno porte minimizando a influência de vórtices. O piezoelétrico foi fixado na parte superior do suporte, na mesma direção horizontal e frontal em relação ao centro do ventilador, como mostra a Figura 15.

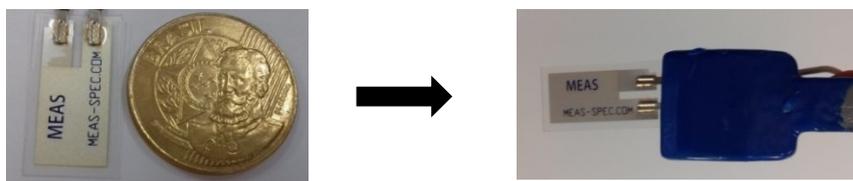


Figura 14 – Modelo de material piezoelétrico PVDF.

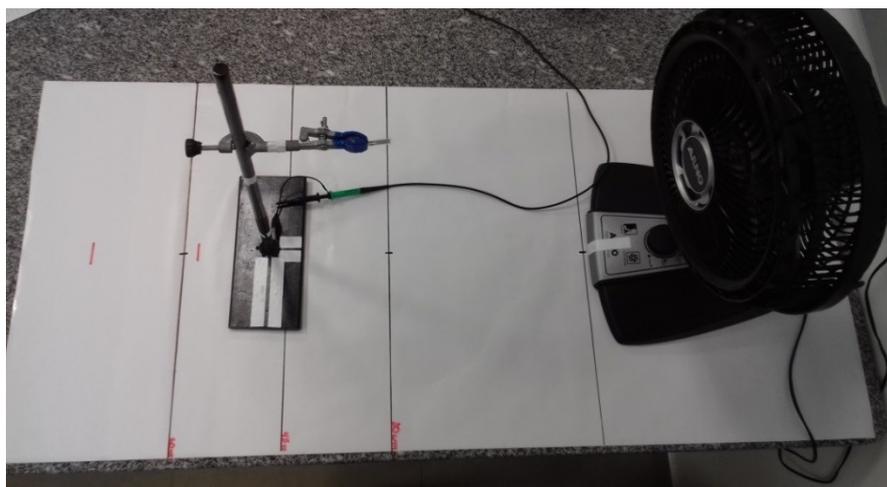


Figura 15 – Plataforma com barra vertical e ventilador na mesma direção.

Para facilitar a fixação dos fios de eletricidade do piezoelétrico foram utilizados pequenos “jacarés”, fitas isolantes para fixar o piezoelétrico na configuração geométrica desejada e na suspensão dos fios de eletricidade.

Um ventilador comercial de mesa, composto por seis pás, da marca ARNO, com marcação de fita isolante referente ao centro, foi utilizado como escoamento de ar, causando vibrações no material piezoelétrico, apresentado na Figura 16.



Figura 16 – Ventilador marca ARNO.

Neste caso, foram feitas medições com três intensidades do vento, medidas com um anemômetro digital (MDA - 20, Ininipa), na altura referente ao centro do ventilador, a uma distância de 30, 45 e 60 cm, entre o piezoelétrico e o gerador de escoamento de ar. O anemômetro era conectado diretamente ao computador, onde os resultados eram salvos no excel, esses resultados obtidos eram a cada segundo até completar 1000 resultados e a partir deste fez-se a média e o desvio padrão. Em uma folha de papelão branca foram delimitadas as distâncias desejadas, apresentado na Figura 17.



Figura 17 – Plataforma de estudo, medidas com o anemômetro.

Essas medidas da velocidade média do vento foram realizadas fixando-se o anemômetro com uma garra, na mesma altura que o material piezoelétrico foi fixado para os demais experimentos. Com isso, tornou-se possível gravar as velocidades nas distâncias desejadas e seu respectivo erro, apresentada na tabela 3.

Tabela 3 – Velocidade média do vento.

Distância (cm)	Vel 1(m/s)	Vel 2 (m/s)	Vel 3 (m/s)
30	$4,6 \pm 0,2$	$5,4 \pm 0,3$	$6,8 \pm 0,2$
45	$4,5 \pm 0,2$	$5,2 \pm 0,2$	$6,7 \pm 0,2$
60	$4,4 \pm 0,2$	$5,1 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,3$

As medidas da tensão de saída em função de tempo foram visualizadas através de um osciloscópio digital (GW INSTRON, GDS – 1072 A – U, MemoryPrime), apresentado na Figura 18.



Figura 18 - Modelo do osciloscópio digital.

Os materiais de plásticos flexíveis PVC de diferentes dimensões foram utilizados para reforçar a deformação do piezoelétrico, com a finalidade de produzir os efeitos sobre o piezoelétrico e melhorar a eficiência de tensão de saída. (SUNDARARAJAN et al., 2012).

As dimensões definidas aos experimentos, a fim de determinar as melhores configurações geométricas, foram configurações de diferentes formatos, entre os formatos em T, flecha, em L e bandeira.

- CGF 1: Configuração Geométrica Flecha pequena.
- CGF 2: Configuração Geométrica Flecha média.
- CGF 3: Configuração Geométrica Flecha grande.
- CGB 1: Configuração Geométrica Bandeira 4x4 cm.
- CGB 2: Configuração Geométrica Bandeira 4x5 cm.
- CGB 3: Configuração Geométrica Bandeira 6x6 cm.
- CGL 1: Configuração Geométrica formato L pequena.
- CGL 2: Configuração Geométrica formato L média.
- CGL 3: Configuração Geométrica formato L grande.
- CGT 1: Configuração Geométrica formato T pequena.
- CGT 2: Configuração Geométrica formato T média.
- CGT 3: Configuração Geométrica formato T grande.

A partir das diferentes configurações geométricas foi possível determinar, dentre elas, qual demonstrou melhor desempenho e, com isso, calcular a potência dos melhores resultados. Porém, antes de definir as dimensões das configurações geométricas foram feitos experimentos, com vistas a determinar, aproximadamente,

quais seriam as dimensões, devido a geometrias maiores e menores das propostas não apresentarem um bom resultado. A seguir são apresentadas as dimensões de cada configuração geométrica utilizada no estudo.

A Figura 19 apresenta o formato flecha e suas dimensões.

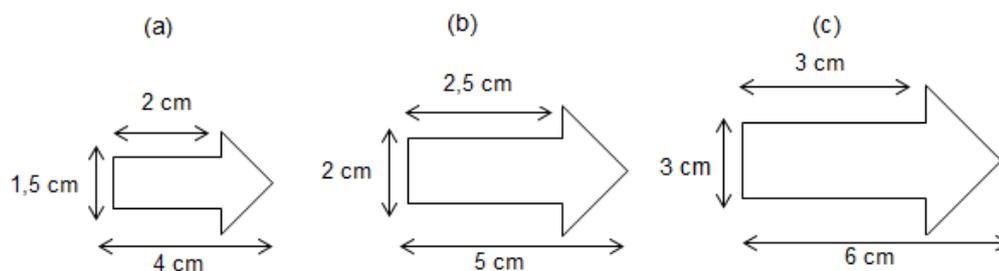


Figura 19 – Formato Flecha, CGF1 (a), CGF2 (b) e CGF3 (c).

A Figura 20 apresenta o formato bandeira e suas dimensões.

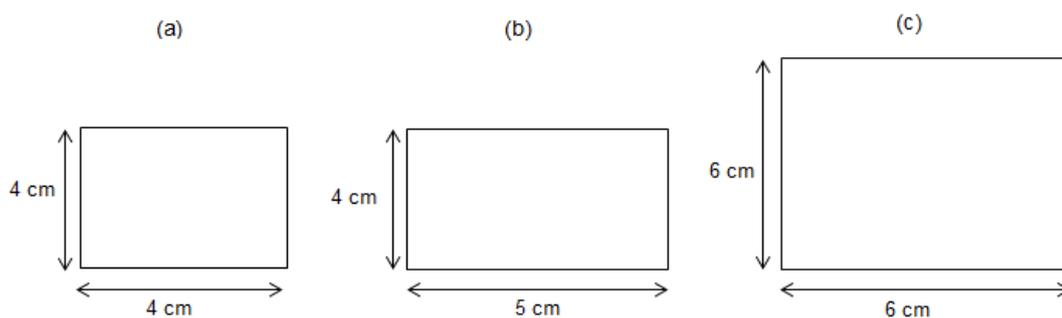


Figura 20 – Formato Bandeira CGB1 (a), CGB2 (b) e CGB3 (c).

A Figura 21 apresenta o formato L e suas dimensões.

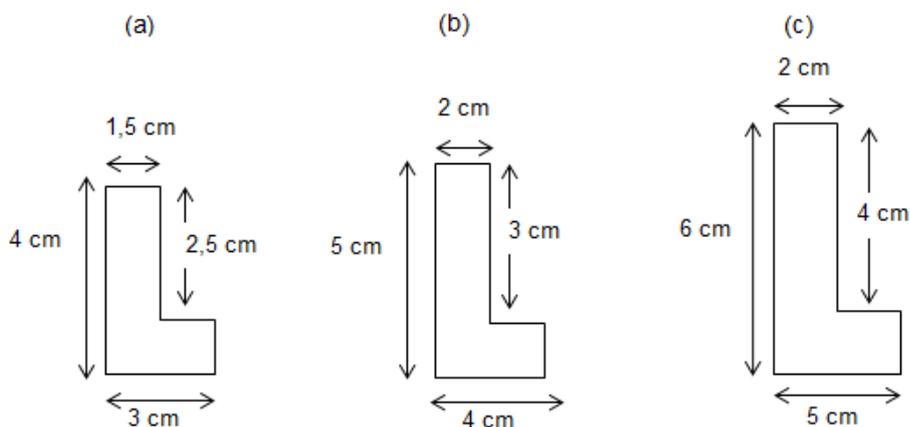


Figura 21 – Formato L, CGL1 (a), CGL2 (b) e CGL3 (c).

A Figura 22 apresenta o formato T e suas dimensões.

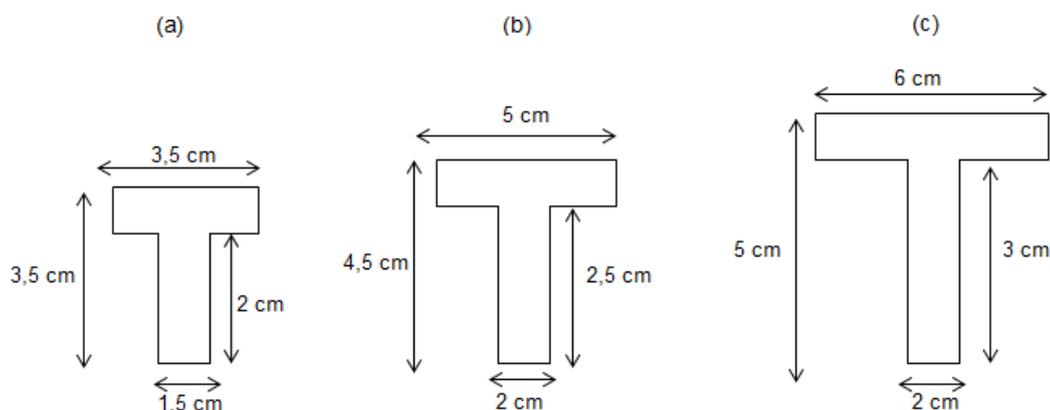


Figura 22 – Formato T, CGT 1 (a), CGT 2 (b) e CGT 3 (c).

O material flexível de plástico PVC foi fixado no extremo livre do piezoelétrico, localizado no centro do material, conforme mostra a Figura 23. Essa posição foi escolhida de acordo com o bom desempenho da tensão de saída e melhores deformações do piezoelétrico. (SUNDARARAJAN et al., 2012). Porém tanto a garra e o papel utilizados para fixar o piezoelétrico interferem nos resultados com isso aumentando o erro nas medidas.



Figura 23 – Posição do material piezoelétrico no plástico PVC.

Foi adicionado um resistor de 100 OHMS (R1) em série ao Piezoelétrico ( $\Delta V$ ) para obter tensões relacionadas com a resistência do circuito e, assim, poder calcular a Potência gerada de energia. O circuito elétrico também foi ligado em série, com as pontas de prova do osciloscópio para coleta de dados. Pode-se observar essa configuração na Figura 24.

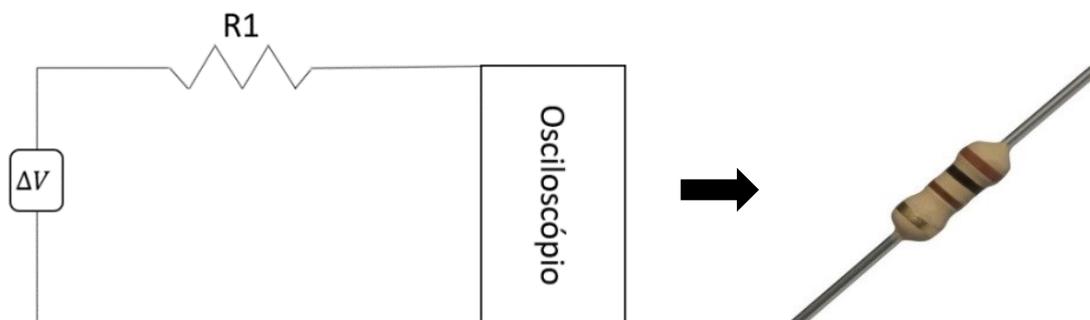


Figura 24 – Componentes do circuito elétrico para captura de tensões instantâneas e resistor de 1000 OHMS.

Os dados de tensão foram coletados no osciloscópio apresentado na figura 25:

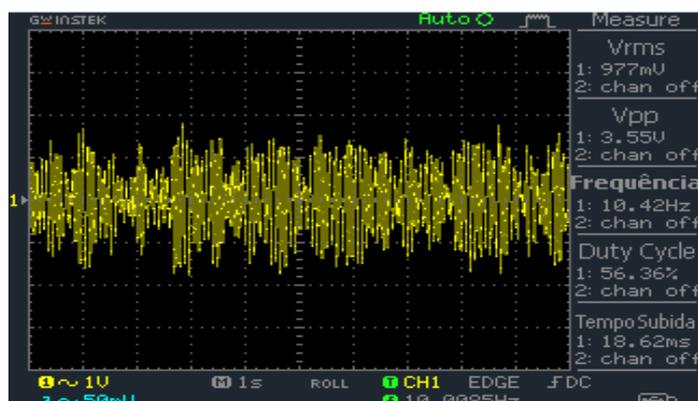


Figura 25 – Imagem gravada do osciloscópio.

O Root Mean Square (RMS) da tensão  $V_{rms}$  foi medido a cada 10 segundos durante 120 segundos, na resistência de carga  $R$ . Devido ao fato de o escoamento de ar não ser determinístico, pode-se conseguir uma média simples instantânea dos dados com valores mais próximos dos reais.

A potência de saída média  $P_o$  é calculada usando a seguinte Equação (DEIVASIGAMANI et al., 2014b):

$$P_i = \frac{V_{RMS}^2}{R1} \quad (9)$$

Onde,  $P_i$  é geração de energia elétrica por segundo,  $R1$  é a resistência do circuito e  $V_{RMS}^2$  consiste no valor eficaz de tensão gerado pelo piezoelétrico.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados diversos experimentos com o material piezoelétrico PVDF, com diferentes dimensões, a fim de verificar o melhor desempenho, aplicabilidade e a eficiência em relação à potência gerada. Os resultados foram obtidos para as diferentes geometrias, com o material piezoelétrico sempre posicionado no centro da configuração geométrica da folha laminada de PVC e com diferentes velocidades do vento.

Dentro das quatro diferentes geometrias com três medidas para cada, pode-se verificar qual dessas teve um melhor desempenho. Os resultados das medidas realizadas com a geometria em formato de flecha estão representados na tabela 4:

Tabela 4 – Respostas saídas de tensão para a geometria em formato de Flecha.

	CGF 1	CGF 2	CGF 3
Vel. Média (m.s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )
4,45	148,6±13,9	196,9±34,9	264±67,0
4,49	154,8±7,8	214,6±35,9	272,4±46,2
4,57	171,1±16,8	254,8±57,3	294,2±46,6
5,13	179,6±12,8	286,6±48,3	384,8±67,0
5,24	178,1±16,1	344,1±55,5	387,7±88,8
5,36	188,7±11,5	480±115,3	461,4±150,6
6,39	246,3±24,5	538,7±155,1	311,2±87,8
6,74	334,1±58,4	698,4±100,6	377,4±100,2
6,85	402,5±65,5	881,3±218,9	391,7±113,7

Com os resultados obtidos na tabela 4, pode-se concluir que as melhores respostas obtidas das *Vrms* médio foram para a configuração geométrica da flecha média (CGF 2) obtendo em 6,85 m/s uma média de *Vrms* de 881,3 mVolts s<sup>-1</sup>, sendo a partir desse resultado calculado sua potência por ser a maior saída de tensão. Já

na geometria da flecha grande, os resultados diminuíram a uma velocidade acima de 5,36 m/s devido à inclinação do material para um dos lados, não oscilando normalmente.

Na tabela 5 são apresentados os resultados obtidos para as configurações geométricas em formato de bandeira, com o piezoelétrico posicionado no centro da configuração geométrica de folha laminada de PVC, nas diferentes velocidades do vento.

Tabela 5 – Respostas das saídas de tensão para a geometria em formato de Bandeira.

	CGB 1	CGB 2	CGB 3
Vel. Média (m.s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )
4,45	124,4±45,4	301,6±97,6	208,1±41,7
4,49	148,7±13,6	391,8±89,5	297±52,3
4,57	171,6±30,3	421,6±88,1	305,2±43,2
5,13	232,2±64,8	479,9±115,7	174,7±11,0
5,24	288,3±76,9	506,6±124,9	162±17,6
5,36	297,4±80,9	558±114,1	157,6±11,6
6,39	613,9±115,1	322,5±50,4	154,8±15,5
6,74	780,3±147,1	360,2±38,8	158,7±24,2
6,85	805,1±131,9	380,6±108,8	200,4±31,2

Sendo assim, dentre as diferentes geometrias do tipo de bandeira analisadas, a configuração geométrica com melhores resultado foi a da bandeira pequena (CGB 1), além de ela se comportar de forma crescente. Já na configuração geométrica média (CGB 2), obteve-se melhores resultados inicialmente, porém, ao ter um aumento na velocidade acima de 6,39 m/s, começaram a diminuir as tensões médias *Vrms*.

Os resultados obtidos para as configurações geométricas em formato L com diferentes dimensões e com o piezoelétrico posicionado sempre ao meio da configuração geométrica de folha laminada de PVC, para as diferentes velocidades, são demonstrados na tabela 6.

Tabela 6 – Respostas das saídas de tensão para a geometria em formato de L.

	CGL 1	CGL 2	CGL 3
Vel. Média (m.s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )
4,45	135±17,5	224,9±47,9	190,4±14,9
4,49	158,1±16,0	272,3±38,3	210,7±20,9
4,57	168,7±14,9	199,9±14,9	201,9±31,7
5,13	191,9±27,0	387,5±49,0	294,4±45,4
5,24	218,4±45,8	468,1±123,8	263,6±26,2
5,36	249,2±51,8	279,8±63,5	206,1±23,1
6,39	295,1±49,8	658,9±94,5	304,3±78,4
6,74	383±55,9	663,3±139,5	204,7±19,8
6,85	401±84,8	459,3±92,2	227,3±22,4

Considerando os resultados obtidos pela configuração geométrica em formato L, as melhores respostas de tensão médias  $V_{rms}$  foram encontradas no formato em L média (CGL 2). Porém, os resultados oscilaram, não tendo um comportamento adequado, pois ao ter um aumento na velocidade média do vento, consequentemente, ocorreria um aumento da tensão. Para o formato L pequena (CGL 1) teve um aumento de forma crescente; contudo, com valores de tensão médias  $V_{rms}$  menores que o formato L médio (CGL 2).

Na tabela 7 são apresentados os resultados obtidos para as configurações geométricas em formato T, com o piezoelétrico posicionado sempre ao meio da configuração geométrica de folha laminada de PVC, para as diferentes velocidades do vento.

Tabela 7 – Respostas das saídas de tensão para a geometria em formato de T.

	GBT 1	GBT 2	GBT 3
Vel. Média (m.s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )	Vrms Médio (mVolts s <sup>-1</sup> )
4,45	244,6±41,3	361,1±60,7	314,6±57,5
4,49	269,5±70,6	374,7±35,8	367,9±70,8
4,57	214,5±27,6	235,4±57,5	388±79,7
5,13	385,1±88,3	423,7±66,4	271,5±68,3
5,24	468±72,6	507,1±46,3	281,3±65,6
5,36	347,6±84,4	345,8±105,4	346,2±67,7
6,39	827±202,7	495,1±62,0	245,6±40,9
6,74	969,7±217,9	544,1±190,1	281,3±55,2
6,85	635,5±96,8	451,8±91,0	299,4±56,0

Os resultados obtidos apresentaram um erro bem elevado, isso se deve aos movimentos não harmônicos provocados, possivelmente, por vórtices e turbulências ao longo do escoamento de ar, fato que se deve, provavelmente, à utilização de um ventilador, em vez de um túnel de tempo.

Segundo McCloskey et al. (2017) concluíram que qualquer mudança na direção do vento, e turbulência causada por folhas e galhos próximos, irão comprometer no desempenho da árvore piezoelétrica. No nosso caso o ventilador propaga o vento de forma dispersa para o protótipo experimental, causando uma interferência e oscilando os resultados, causando um erro maior em alguns experimentos. E por consequência de erros experimentais, tanto manuais quanto do equipamento interferiram nos resultados.

As respostas das tensões de saída observadas na tabela 7 com melhores resultados foram para o formato T pequeno (CGT 1), sendo que os resultados oscilaram com frequência, devido ao comportamento da folha flexível de PVC se inclinar para um dos lados e, assim, não gerar um aumento na tensão. Todavia, a

tensão de saída mais alta foi encontrada nessa configuração geométrica a uma velocidade de 6,74 m/s, em que se obteve 969,7 mVolts  $s^{-1}$ . Dentre as diferentes configurações geométricas estudadas, as que apresentaram melhor resultado e com comportamento adequado foram o formato bandeira pequena (CGF 1) e o formato flecha média (CGF 2).

Além disso, para melhor visualização, compreensão e discussão dos resultados, optou-se por elaborar gráficos referentes aos modelos experimentais. Dessa forma, o eixo x representa as diferentes velocidades médias do vento e o eixo y, a tensão de saída, que é retirada a partir da média dos valores de  $V_{rms}$  visualizado no osciloscópio digital.

O gráfico 1 apresenta as respostas de tensão de saída em função da velocidade média do vento, da configuração geométrica no formato flecha.

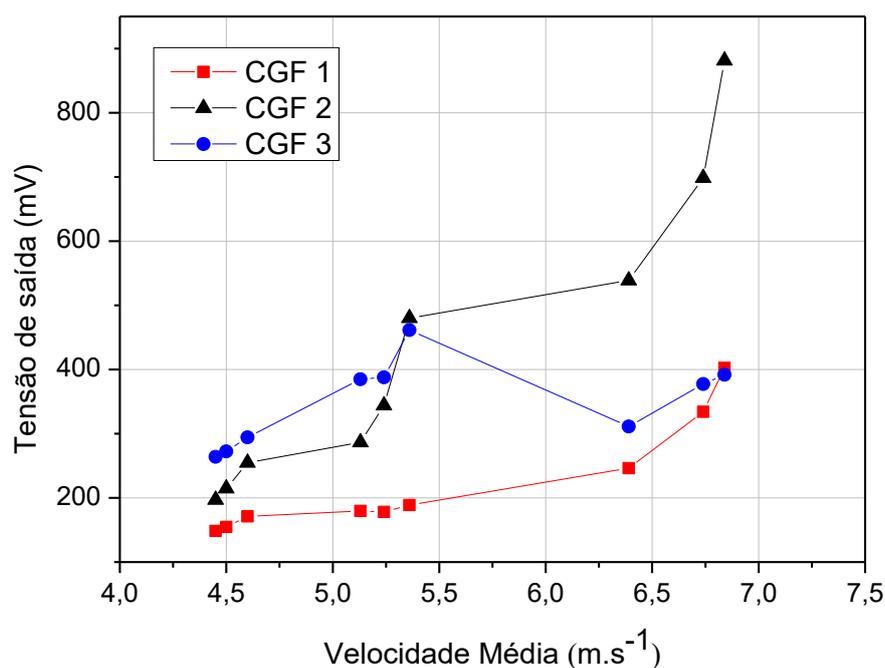


Gráfico 1 – Desempenho da configuração geométrica formato flecha.

A partir do gráfico 1 é possível observar que, ao considerar a velocidade média do vento, quanto maior for a sua velocidade, melhores são os resultados de tensão de saída. Porém, a configuração geométrica flecha grande (CGF 3), quando atingiu a velocidade de 5,36 m/s, em seguida diminuiu os valores de tensão de

saída, devido ao tamanho da flecha não oscilar, adequadamente, a velocidades maiores.

Pode-se considerar que os melhores resultados foram obtidos com 6,85 m/s a uma tensão de saída de 881,3 mV com a configuração geométrica formato flecha média (CGF 2). Os resultados dos demais tamanhos não foram tão satisfatórios, quanto os do formato médio.

O gráfico 2 apresenta as respostas de tensão de saída em função da velocidade média, utilizando a configuração geométrica no formato bandeira. Assim, a partir da tabela 5 fez-se o seguinte gráfico:

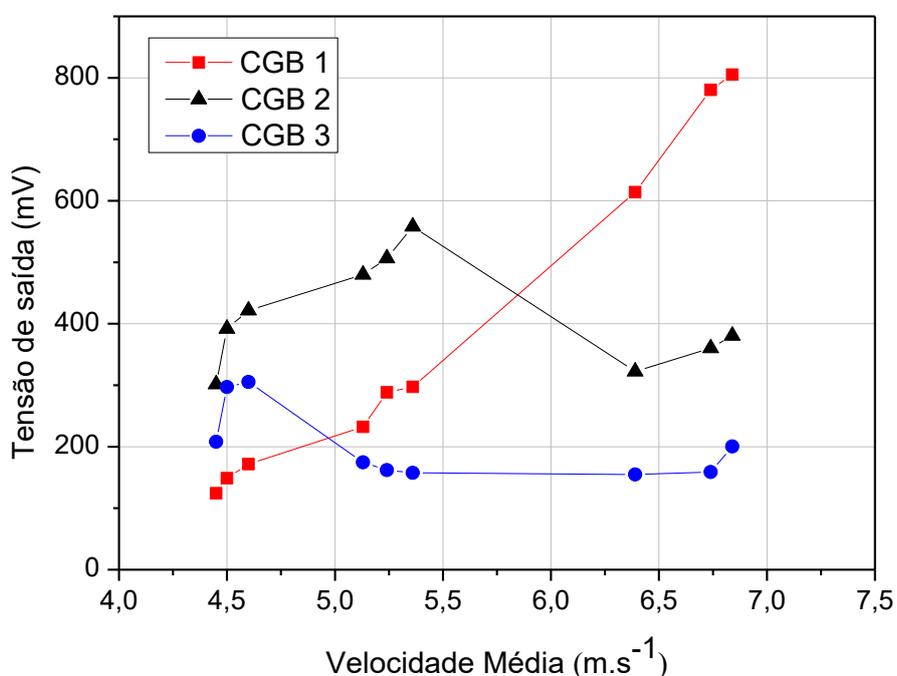


Gráfico 2 – Desempenho da configuração geométrica formato Bandeira.

O gráfico 2 apresenta os resultados experimentais do formato bandeira, onde observa-se que os melhores resultados foram obtidos a uma velocidade média de 6,85 m/s com um resultado de tensão média de 805,1 mV encontrados na configuração geométrica de 4x4 cm (CGB 1), em que se viu um comportamento crescente. Já nas demais configurações, os resultados oscilaram devido à inclinação que o plástico PVC realizava.

Se a velocidade do vento aumenta, a potência também aumenta. Esse fenômeno se dá devido ao fato de que, como a velocidade do vento aumentou a

amplitude e a frequência de vibração, conseqüentemente, aumenta a taxa de variação da pressão sobre o PVDF (DEIVASIGAMANI et al., 2014a).

O gráfico 3 apresenta as respostas de tensão de saída em função da velocidade média da configuração geométrica no formato L. A partir da tabela 6 fez-se o seguinte gráfico:

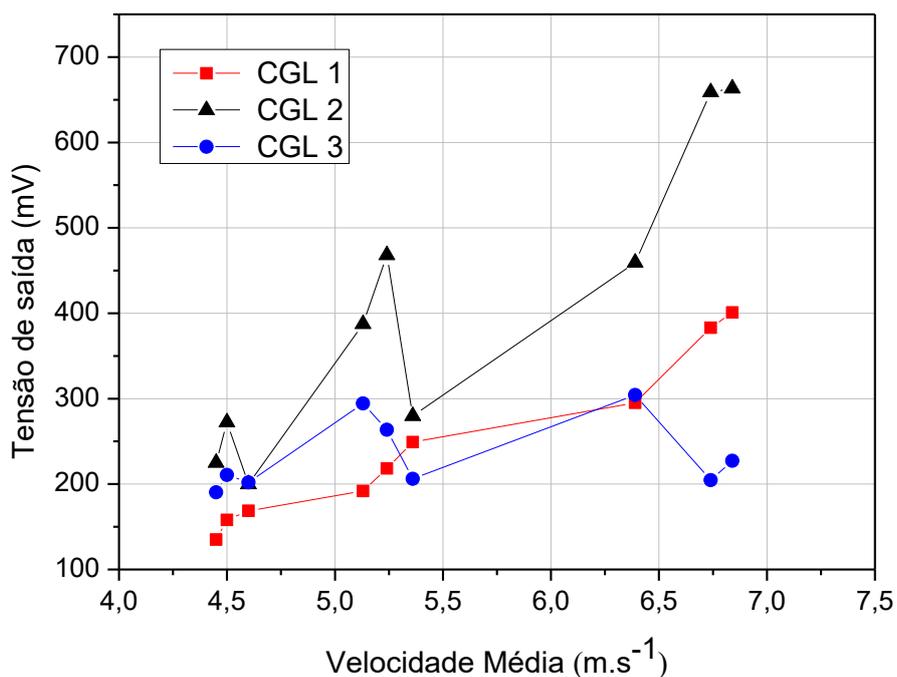


Gráfico 3 – Desempenho da configuração geométrica formato L.

A partir do gráfico 3 pode-se observar que os melhores resultados de tensão de saída foram alcançados pela configuração geométrica formato L médio (CGL 2), os melhores resultados obtidos de 658,9 mV e 663,3 mV a partir de uma velocidade do vento superior a 6,5 m/s, essa geometria possibilitou uma maior deformação do material piezoelétrico em comparação às geometrias do formato L.

Porém, no decorrer das velocidades do vento, observou-se que a tensão de saída não se comportou de forma crescente, devido a irregularidades que ocorreram na configuração geométrica, sendo uma delas, o material que, ao invés de oscilar, permanecia inclinado para um dos lados, não gerando um aumento de tensão de saída.

Na figura 26 mostram-se os resultados extremos de tensão obtidos a uma velocidade de 6,85 m/s, tendo uma média de todas as medidas de 459,35 mV,

podendo-se, assim, confirmar que as irregularidades encontradas são devido às oscilações nas tensões vistas.

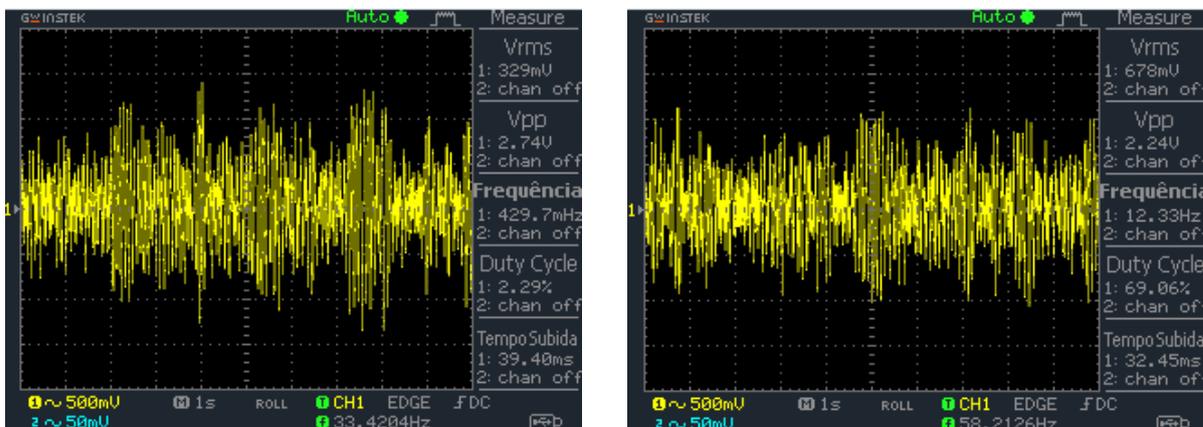


Figura 26 – Imagem capturada do osciloscópio.

O gráfico 4 apresenta as respostas de tensão de saída em função da velocidade média da configuração geométrica no formato T. A partir da tabela 7 fez-se o seguinte gráfico:

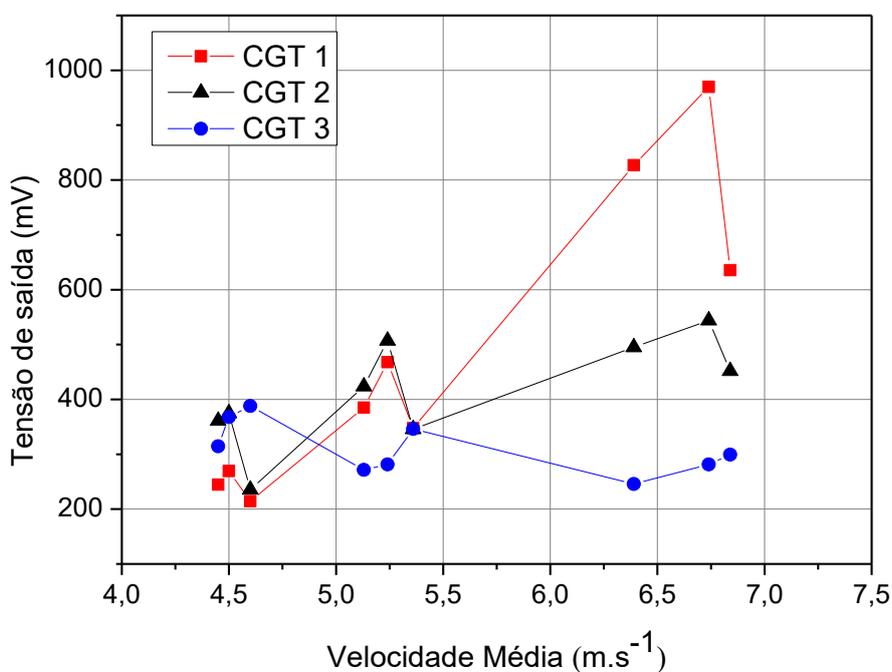


Gráfico 4 – Desempenho da configuração geométrica formato T.

A partir do gráfico 4 pode-se observar que os melhores resultados de tensão de saída foram alcançados pela configuração geométrica formato T pequeno (CGT 1), os melhores resultados obtidos de tensão foram de 827 mV e 969,7 mV para as respectivas velocidades média do vento de 6,39 e 6,74 m/s. Porém, na velocidade média do vento de 6,85 m/s, houve a inclinação da configuração geométrica CGT 1 e CGT 2.

Nesses gráficos mostra-se que existe uma região de resposta, que atinge valores de pico da tensão de saída/velocidade do vento. No entanto, os valores de tensão de saída diminuem à medida que a velocidade do vento aumenta acima do valor de pico da velocidade. Isso pode indicar que as frequências de velocidade que chegam ao material flexível PVC “folha” poderiam aproximar a primeira frequência natural do “caule” PVDF, durante essa faixa baixa na velocidade do vento (LI; LIPSON, 2009). Onde qualquer tipo de interferência nas condições do fluxo do vento, como a turbulência ou até mesmo a mudança na direção do vento, pode influenciar no regime de oscilação e com isso diminuir a saída de tensão (ORREGO et al., 2017).

No decorrer dos resultados experimentais encontrados, foi possível observar que a produção de energia nem sempre aumenta com o aumento da velocidade do vento. Segundo Zhang et al. (2017), quando a velocidade do vento excede um valor limite, o valor de  $V_{rms}$  e a potência de saída dos experimentos realizados começam a diminuir com o aumento da velocidade do vento. A razão para isso é que a frequência de impacto aumenta quando a velocidade do vento aumenta. Quando a frequência de impacto atinge um valor limite, o feixe piezoelétrico não pode recuperar a sua forma inicial antes que ocorra o próximo impacto. Conseqüentemente, o feixe tem uma pequena amplitude de vibração e não pode, eficientemente, coletar energia.

Com os resultados obtidos é possível calcular a potência ( $P$ ) dos modelos experimentais mais eficientes. Dessa forma, foi inserido um resistor de 100  $\Omega$  através de um circuito em série para possibilitar a efetuação dos cálculos. Sendo assim, a figura 27 apresenta a resposta de tensão  $V_{rms}$  em função do tempo, após a introdução do resistor.

Os resultados obtidos de  $V_{rms}$  são visualizados 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 corresponde a tensão em volts (V), enquanto que o eixo horizontal representa o tempo em segundos (s).

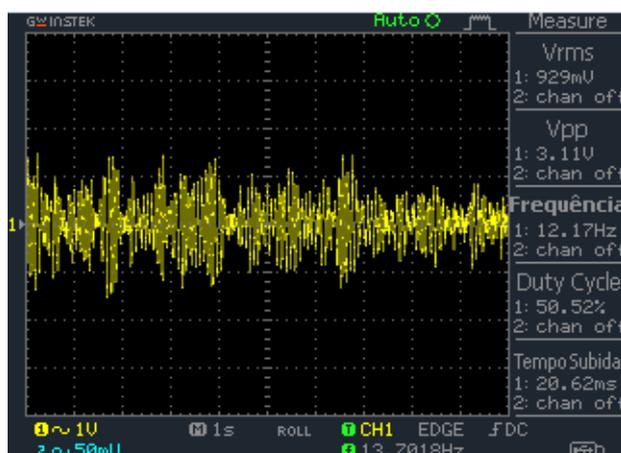


Figura 27 – Respostas de tensão de saída obtidas com o resistor.

A partir da figura 27 utilizou-se a média dos resultados obtidos de  $V_{rms}$  para calcular a potência. O cálculo da potência foi realizado somente para as configurações geométricas que apresentaram melhor desempenho, sendo elas a CGF 2, CGB 1 e, por último, a CGT 1, onde com as velocidades mais altas atingiram uma tensão de saída superior a 800 mV. A partir da tabela 8 pode-se verificar a potência de cada configuração geométrica desejada.

Tabela 8 – Potência das configurações geométricas.

Configurações Geométricas	Velocidade do Vento (m/s)	$V_{rms}$ médio (mVolts $s^{-1}$ )	Potência (mW)
CGF 2	6,85	881,3	7,77
CGB 1	6,85	805,1	6,48
CGT 1	6,39	827	6,84
CGT 1	6,74	969,7	9,40

A partir da tabela 8 é possível observar que os melhores resultados foram obtidos nas menores geometrias propostas, devido a essas configurações geométricas oscilarem de forma crescente. Portanto, a maior potência encontrada foi para a geometria em formato T, que foi de 9,40 mW a uma velocidade de 6,74 m/s.

A partir do resultado da potência pode-se fazer a comparação com outros estudos e, assim, determinar se é possível fornecer energia elétrica a uma bateria recarregável.

Li e Lipson (2009) testaram um gerador tipo planta, em que projetaram e implementaram uma única folha feita de materiais piezoelétricos, capaz de gerar energia elétrica através de vibrações induzidas pelo vento. Utilizaram uma configuração geométrica em forma de um triângulo isóscele (bainha: 8 cm, altura: 8 centímetros área: 32 centímetros<sup>2</sup>) como a folha do gerador, sendo esta fixada em uma camada única vertical e horizontal com uma pequena haste de PVDF/LDT2-028K /L em direção ao escoamento do vento, tendo como formato um L. Foi realizada uma série de experimentos num túnel de vento (2 – 8 m/s), tendo como resultado uma potência de saída máxima de 296  $\mu$ W a uma velocidade do vento de 8 m/s a partir da folha de haste vertical de camada única e com caule curto de PVDF.

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os resultados encontrados por Li e Lipson (2009), pode-se concluir que a potência encontrada para a configuração geométrica em formato de flecha e das demais geometrias foi satisfatória, devido aos resultados serem superiores de potência 0,296 mW a uma velocidade do vento de 8 m/s, em que se obteve, a uma velocidade de 6,85 m/s, uma potência de 7,77 mW, apresentando um desempenho eficiente na geração de energia elétrica.

Segundo Orrego et al. (2017), desenvolveram-se bandeiras invertidas para a captação de energia eólica por oscilações de uma membrana de filme piezoelétrico flexível (PVDF/ LDT4-028), utilizando um total de 10 materiais piezoelétricos. Nos experimentos, o vento foi controlado por um túnel de vento, o valor de máxima potência foi de 5,0 mW/cm<sup>3</sup> e ocorreu a uma velocidade de vento de 9 m/s. Com isso, comparando a configuração geométrica bandeira pequena (CGB 1), pode-se verificar que os resultados foram satisfatórios, obtendo-se uma potência de 6,48 mW a uma velocidade média do vento de 6,85 m/s, porém o que se utilizou foi um ventilador, em vez de um túnel de vento.

Em estudo realizado a fim de construir uma árvore piezoelétrica, utilizando o material piezoelétrico PVDF no formato bandeira (triângulo), sendo induzido a um escoamento do vento de um túnel de vento, com distâncias variadas, o melhor resultado conseguido foi a 8 m/s, obtendo-se uma potência máxima de 18,3  $\mu$ W. (DEIVASIGAMANI et al., 2014a). Em comparação aos resultados obtidos no

experimento desta proposta, utilizando uma bandeira de CGB 1 a uma velocidade de 6,85 m/s foi obtido 6,48 mW e ao comparar a CGF 2 devido ao formato da bandeira ser um triângulo e, este sendo compatível com uma flecha, foi obtido a uma velocidade média de 6,85 m/s uma potência de 7,77 mW. Com isso, independente das configurações geométricas utilizadas no presente estudo, verifica-se que os resultados são satisfatórios sendo superiores a 18,3  $\mu$ W.

Thornton (2011) realizou um estudo com tiras piezoelétricas (LDT0, modelo fabricado por Measurement Specialties) com dimensões de 25 mm x 13 mm, e com combinação em série com 5 piezoelétricos, no formato flecha. Foram adicionados PVC para aumentar a área efetiva da tira, ampliando os desvios de vibração, sendo utilizado um túnel de vento 1m/s a 30 m/s. Considerando os valores resultante de tensão RMS foi possível calcular a potência, onde a uma velocidade de 14,22 m/s obteve-se uma potência de 9,28 nW. Em comparação com o formato flecha (CGF 2) do presente estudo, a uma velocidade de 6,85 m/s foi calculada uma potência de 7,77 mW, sendo mais eficiente que o estudo proposto por Thornton e, com isso, apresentando-se satisfatórios novamente os resultados encontrados.

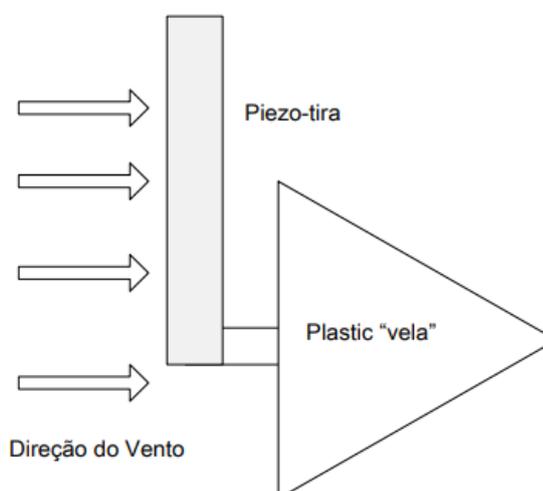


Figura 28 – Imagem experimento Thornton, 2011.

Em outro estudo foi utilizada uma tira de PVDF medindo 6,15 x 1,22 cm, que serviu para fixar uma lâmina de folha falsa de plástico, com vento gerado por um ventilador de velocidade constante, tendo sido adicionadas 10 folhas piezoelétricas. Os melhores resultados de potência foram obtidos com experimentos realizados ao

ar livre, onde em 25 segundo, quando o vento mudou de direção e velocidade, a potência chegou a variar de 0,15 a 165  $\mu\text{W}$  (MCCLOSKEY et al., 2017).

Li et al., 2011 realizaram um estudo experimental referente à arquitetura de uma piezo-folha que converte energia eólica em energia elétrica, sendo realizado em uma pequena seção transversal do túnel de vento 25 x 25  $\text{cm}^2$ , com intervalos de vento de 0 a 8 m/s. Nesse estudo, encontraram uma potência máxima de 615  $\mu\text{W}$  a partir de uma única folha a uma velocidade de 8 m/s.

Tabela 9 - Estudos de geração de energia.

Referências	Velocidade do vento	Tipo de fluido	Conclusão Potência máxima
LI E LIPSON 2009	8 m/s	Túnel de vento	296 $\mu\text{W}$
THORNTON 2011	10,67 m/s	Túnel de vento	3,34 nW
ORREGO et al., 2017	9 m/s	Túnel de vento	5,0 mW / $\text{cm}^3$
DEIVASIGAMANI et al., 2014a	8 m/s	Túnel de vento	18,3 $\mu\text{W}$
MCCLOSKEY et al., 2017		Ar livre	0,15 a 165 $\mu\text{W}$
LI et al., 2011	8m/s	Túnel de vento	615 $\mu\text{W}$

Costa (2010) determinou os valores das grandezas elétricas para diferentes tipos de lâmpadas, sendo que a lâmpada de Leds1 ascende a uma potência de 0,77W, menor quantidade de energia em comparação às demais. Com isso, ao colocar o piezoelétrico em série, uma árvore necessitaria de 82 folhas piezoelétricas em série a uma velocidade média de 6,74 m/s para acender uma Leds1.

Os resultados encontrados no experimento são válidos, em comparação aos demais estudos, mas não são considerados suficientes para fornecer energia elétrica a uma bateria recarregável. Pode haver maneiras de melhorar o desempenho de potência, como por exemplo, o uso de vários elementos PVDF, para se obter mais potência de saída, a partir de um único dispositivo.

## 5 CONSIDERAÇÃO FINAL

De modo a garantir um uso mais controlado e eficiente da energia elétrica, dentro do Campus da UFFS, a proposta foi a de inserir árvores piezoelétricas em parte das instalações do exterior do edifício, para que a energia obtida através de qualquer vento suficiente a deformar o material e gerar energia, fosse facilmente implementada.

Os resultados obtidos nos experimentos realizados em laboratório tiveram como melhor resultado de geração de energia a configuração geométrica em formato T pequena (CGT 1), em velocidade de  $6,74 \text{ m.s}^{-1}$  encontrando um  $V_{rms}$  médio de  $969,7 \text{ (mVolts s}^{-1}\text{)}$  e uma potência de  $9,4 \text{ mW}$ , sendo que os desvios padrões são altos, devido aos movimentos não harmônicos provocados pelo ventilador utilizado em estudo.

Os resultados obtidos não são suficientes para fornecer energia elétrica a uma bateria recarregável. Porém, há maneiras de melhorar o desempenho de potência, usando-se, por exemplo, vários elementos PVDF em série, o que permite a obtenção de mais potência de saída, a partir de um único dispositivo, como no caso de projetar uma árvore piezoelétrica podendo, com isso, utilizar a energia gerada para suprir uma parte da energia consumida no campus.

Através da alteração da configuração do dispositivo, a tendência é a de melhorar a eficiência de coleta de energia e capacidade de geração desta. Pesquisas recentes também se concentraram em modificar o circuito de coleta de energia e meio de armazenamento como uma forma para melhorar (ANTON; SODANO, 2007).

Com isso, é possível concluir que os materiais piezoelétricos geram energia em microescala, devido ao baixo potencial de geração de energia. Mesmo assim se faz necessário o uso diariamente, devido à geração de energia limpa e à necessidade de implementação futura em diversas aplicações no cotidiano, a fim de causar o menor impacto possível no meio ambiente.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALANNE, K.; SAARI, A. Distributed energy generation and sustainable development. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 10, n. 6, p. 539-558, 2006.

ANTON, S. R.; SODANO, H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). **Smart materials and Structures**, v. 16, n. 3, p. R1, 2007.

ASAFU-ADJAYE, J. The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries. **Energy economics**, v. 22, n. 6, p. 615-625, 2000.

BAKER, J.; ROUNDY, S.; WRIGHT, P. Alternative geometries for increasing power density in vibration energy scavenging for wireless sensor networks. In: **3rd international energy conversion engineering conference**. p. 5617. 2005.

BAUDRY, H. Screen printing piezoelectric devices. **Microelectronics International**, v. 4, n. 3, p. 71-74, 1987.

BEEBY, S. P.; TUDOR, M. J.; WHITE, N. M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. **Measurement science and technology**, v. 17, n. 12, 2006.

BERLINCOURT, D.; KRUEGER, H. A.; NEAR, C. Properties of Morgan electro ceramic ceramics. **Technical Publication TP-226, Morgan Electro Ceramics**, 2000.

BRYANT, M.; WOLFF, E.; GARCIA, E. Aeroelastic flutter energy harvester design: the sensitivity of the driving instability to system parameters. **Smart Materials and Structures**, v. 20, n. 12, 2011.

BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANY, E. **Wind energy handbook**. John Wiley & Sons, 2011.

CHOI, W. J.; JEON, Y.; JEONG, J. H.; SOOD, R.; KIM S. G. Energy harvesting MEMS device based on thin film piezoelectric cantilevers. **Journal of Electroceramics**, v. 17, n. 2-4, p. 543-548, 2006.

COSTA, D. O. **Estudo e Determinação das Características de Lâmpadas de Diferentes Tipos**. 2010. Mestrado de Engenharia Electrónica industrial e de Computadores. Universidade do Minho - Escola de Engenharia Departamento de Electrónica Industrial, Guimarães, 2010.

CRAWLEY, E. F.; ANDERSON, E. H. Detailed models of piezoceramic actuation of beams. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 1, n. 1, p. 4-25, 1990.

CROSS, L. E. Ferroelectric materials for electromechanical transducer applications. **Japanese journal of applied physics**, v. 34, n. 5S, p. 2525, 1995.

CUADRAS, A.; GASULLA, M.; FERRARI, V. Thermal energy harvesting through pyroelectricity. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 158, n. 1, p. 132-139, 2010.

DAGDEVIREN, C.; JOE, P.; TUZMAN, O. L.; PARK, K.; LEE, K. J.; SHI, Y.; HUANG, Y.; ROGERS, J. A. Recent progress in flexible and stretchable piezoelectric devices for mechanical energy harvesting, sensing and actuation. **Extreme mechanics letters**, v. 9, p. 269-281, 2016.

DEIVASIGAMANI, A.; MCCARTHY, J. M.; JOHN, S. J.; WATKINS, S.; COMAN, F. Proximity effects of piezoelectric energy harvesters in fluid flow. In: **29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS**. p. 7-12. 2014a.

DEIVASIGAMANI, A.; MCCARTHY, J. M.; JOHN, S.; WATKINS, S.; TRIVAILO, P.; COMAN, F. Piezoelectric energy harvesting from wind using coupled bending-torsional vibrations. **Modern Applied Science**, v. 8, n. 4, p. 106-126, 2014b.

DU TOIT, N. E. **Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester**. 2005. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology.

ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 748-764, 2014.

ELVIN, N. G.; ELVIN, A. A.; SPECTOR, M. A self-powered mechanical strain energy sensor. **Smart Materials and structures**, v. 10, n. 2, p. 293, 2001.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric energy harvesting**. John Wiley & Sons, 2011.

EWERE, F.; WANG, G.; CAIN, B. Experimental investigation of galloping piezoelectric energy harvesters with square bluff bodies. **Smart Materials and Structures**, v. 23, n. 10, 2014.

FEITOSA, E.A.N., PEREIRA, A.L., SILVA, G.R, et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil, Projeto BRA/00/29: Capacitação do Setor Elétrico Brasileiro em Relação à Mudanças Global do Clima, ANEEL, Brasília, Brasil, Dupligráfica. 2002.

GALHARDI, M. A. **Guia de Power Harvesting: História, Evolução e Fundamentos**, 2010. p. 168. Departamento de engenharia mecânica – unesp, Ilha solteira – SP, 2010.

GINLEY, D.; GREEN, M. A.; COLLINS, R. Solar energy conversion toward 1 terawatt. **Mrs Bulletin**, v. 33, n. 4, p. 355-364, 2008.

GLYNNE-JONES, P.; TUDOR, M. J.; BEEBY, S. P.; WHITE, N. M. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 110, n. 1-3, p. 344-349, 2004.

GUO, H.; ZHANG, Y.; XUE, F.; CAI, Z.; SHANG, Y.; LI, J.; CHEN, Y.; WU, Z.; JIANG, S. In-situ synchrotron SAXS and WAXS investigations on deformation and  $\alpha$ - $\beta$

transformation of uniaxial stretched poly (vinylidene fluoride). **CrystEngComm**, v. 15, n. 8, p. 1597-1606, 2013.

HALMANN, M. M.; STEINBERG, M. **Greenhouse gas carbon dioxide mitigation: science and technology**. CRC press, 1998.

HARRISON, J. S.; OUNAIES, Z. Piezoelectric polymers. **Encyclopedia of polymer science and technology**, v. 3, 2002.

HERZOG, A. V.; LIPMAN, T. E.; KAMMEN, D. M. Renewable energy sources. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Forerunner Volume- 'Perspectives and Overview of Life Support Systems and Sustainable Development**, 2001.

JAIN, A.; KUMAR, S. J.; KUMAR, M. R.; GANESH, A. S.; SRIKANTH, S. PVDF-PZT composite films for transducer applications. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, v. 21, n. 3, p. 181-186, 2014.

JAMAL, G. R. A.; RAHMAN, S. M. L.; RANA, M. M.; NAFIS, S. A.S.; HUDA, M. M.; RAHMAN, S. N. An Alternative Approach to Wind Power Generation Using Piezoelectric Material. **American Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 1, n. 2, p. 45-50, 2015.

JONES, G. D.; A.; DARGAVILLE, T. R.; CHAPLYA, P. M.; CLOUGH, R. L.; ELLIOTT, J. M.; MARTIN, J. W.; MOWERY, D. M.; CELINA, M. C. Characterization, performance and optimization of PVDF as a piezoelectric film for advanced space mirror concepts. **Sandia National Laboratories**, 2005.

KIM, S-G.; PRIYA, S.; KANNO, I. Piezoelectric MEMS for energy harvesting. **MRS bulletin**, v. 37, n. 11, p. 1039-1050, 2012.

LEE, H. Y.; CHOI, B. A multilayer PVDF composite cantilever in the Helmholtz resonator for energy harvesting from sound pressure. **Smart Materials and Structures**, v. 22, n. 11, 2013.

LESIEUTRE, G. A.; OTTMAN, G. K.; HOFMANN, H. F. Damping as a result of piezoelectric energy harvesting. **Journal of Sound and Vibration**, v. 269, n. 3-5, p. 991-1001, 2004.

LETCHER, T. M. **Wind energy engineering: a handbook for onshore and offshore wind turbines**. Academic Press, 2017.

LI, D.; WU, Y.; RONCH, AD.; XIANG, J. Energy harvesting by means of flow-induced vibrations on aerospace vehicles. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 86, p. 28-62, 2016.

LI, S.; LIPSON, H. Vertical-stalk flapping-leaf generator for wind energy harvesting. In: **ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems**. American Society of Mechanical Engineers, 2009. p. 611-619.

LI, S.; YUAN, J.; LIPSON, H. Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering. **AIP Publishing**, 2011.

LITTRELL, Robert John. **High performance piezoelectric MEMS microphones**. Tese de Doutorado. *University of Michigan*. 2010.

LU, F.; LEE, H. P.; LIM, S. P. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications. **Smart Materials and Structures**, v. 13, n. 1, p. 57, 2003.

MARTINS, P.; LOPES, A. C.; LANCEROS-MENDEZ, S. Electroactive phases of poly (vinylidene fluoride): determination, processing and applications. **Progress in polymer science**, v. 39, n. 4, p. 683-706, 2014.

MCCLOSKEY, M. A.; MOSHER, C. L.; HENDERSON, E. R. Wind energy conversion by plant-inspired designs. **PloS one**, v. 12, n. 1, 2017.

MITCHESON, P. D.; MIAO, P.; STARK, B. H.; YEATMAN, E. M.; HOLMES, A. S.; GREEN, T. C. MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 115, n. 2-3, p. 523-529, 2004.

MOHEIMANI, S. R. A survey of recent innovations in vibration damping and control using shunted piezoelectric transducers. **IEEE transactions on control systems technology**, v. 11, n. 4, p. 482-494, 2003.

MYERS, R.; VICKERS, M.; KIM, H.; PRIYA, S. Small scale windmill. **Applied Physics Letters**, v. 90, n. 5, 2007.

NAKAJIMA, T.; OKAYA, K.; OHTA, K.; FURUKAWA, T.; OKAMURA S. Performance of piezoelectric power generation of multilayered poly (vinylidene fluoride) under high mechanical strain. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 50, 2011.

OH, S. J.; HAN, H. J.; HAN, S. B.; LEE, J. Y.; CHUN, W. G. Development of a tree-shaped wind power system using piezoelectric materials. **International Journal of Energy Research**, v. 34, n. 5, p. 431-437, 2010.

ONODA, J.; MAKIHARA, K.; MINESUGI, K. Energy-recycling semi-active method for vibration suppression with piezoelectric transducers. **AIAA journal**, v. 41, n. 4, p. 711-719, 2003.

ORREGO, S.; SHOELE, K.; RUAS, A.; DORAN, K.; CAGGIANO, B.; MITTAL, R.; KANG, S. H. Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag. **Applied energy**, v. 194, p. 212-222, 2017.

OVEJAS, V. J.; CUADRAS, A. Multimodal piezoelectric wind energy harvesters. **Smart Materials and Structures**, v. 20, n. 8, 2011.

RAMADAN, K. S.; SAMEOTO, D.; EVOY, S. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. **Smart Materials and Structures**, v. 23, n. 3, 2014.

RAMOS, M. M. D.; CORREIA, H. M. G.; LANCEROS-MENDEZ, S. Atomistic modelling of processes involved in poling of PVDF. **Computational Materials Science**, v. 33, n. 1-3, p. 230-236, 2005.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. In: RAO, Singeruso S. Vibração excitada harmonicamente. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

REILLY, E. K.; MILLER, L. M.; FAIN, R.; WRIGHT, P. A study of ambient vibrations for piezoelectric energy conversion. **Proc. PowerMEMS**, v. 2009, p. 312-315, 2009.

ROCHA, J. G.; GONÇALVES, L. M.; ROCHA, P. F.; SILVA, M. P.; LANCEROS-MÉNDEZ, S. Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 57, n. 3, p. 813-819, 2010.

ROSTAMI, A. B.; ARMANDEI, M. Renewable energy harvesting by vortex-induced motions: Review and benchmarking of technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 193-214, 2017.

ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K.; RABAEY, J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. **Computer communications**, v. 26, n. 11, 2003.

SENCADAS, V.; GREGORIO, F. R.; LANCEROS-MENDEZ, S. Processing and characterization of a novel nonporous poly (vinilidene fluoride) films in the  $\beta$  phase. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 352, n. 21-22, 2006.

SHAFIEE, S.; TOPAL, E. When will fossil fuel reserves be diminished?. **Energy policy**, v. 37, n. 1, p. 181-189, 2009.

SKOOG, D. A.; HOLLER, J. F.; CROUCH, S. R. **Liquid chromatography**. Principles of Instrumental Analysis (6th), 2006.

SODANO, H. A.; INMAN, D. J.; PARK, G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. **Shock and Vibration Digest**, v. 36, n. 3, p. 197-206, 2004.

SODANO, H. A.; INMAN, D. J.; PARK, G. Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries. **Journal of intelligent material systems and structures**, v. 16, n. 10, p. 799-807, 2005.

SPEARING, S. M. Materials issues in microelectromechanical systems (MEMS). **Acta materialia**, v. 48, n. 1, p. 179-196, 2000.

SUNDARARAJAN, V.; ROMERO, E.; BONILLA, N.; MARTÍNEZ, C. Energy Harvesting from Fluttering Membranes. **10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology – LACCEI'2012**, Panama, 2012.

TAYLOR, G. W.; BURNS, J. R.; KAMMANN, S. M.; POWERS, W. B.; WELSH, T. R. The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator. **IEEE journal of oceanic engineering**, v. 26, n. 4, p. 539-547, 2001.

THORNTON, J. J. **Design and Analysis of a Wind Energy Harvesting Circuit Using Piezoelectric Polymers**. 2011. p. 100. Master of Science in Electrical Engineering. Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2011.

TOPRAK, A.; TIGLI, O. Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges. **Applied Physics Reviews**, v. 1, n. 3, 2014.

UEBERSCHLAG, P. PVDF piezoelectric polymer. **Sensor Review**, v. 21, n. 2, p. 118-126, 2001.

VATANSEVER, D.; HADIMANI, R L.; SHAH, T.; SIORES, E. An investigation of energy harvesting from renewable sources with PVDF and PZT. **Smart Materials and Structures**, v. 20, n. 5, 2011.

VINOGRADOV, A.; HOLLOWAY, F. Electro-mechanical properties of the piezoelectric polymer PVDF. **Ferroelectrics**, v. 226, n. 1, p. 169-181, 1999.

VULLERS, R. J. M.; SCHAIJK, R. V.; DOMS, I.; HOOF, C. V.; MERTENS, R. Micropower energy harvesting. **Solid-State Electronics**, v. 53, n. 7, p. 684-693, 2009.

WEAVER JR, W.; TIMOSHENKO, S. P.; YOUNG, D. H. **Vibration problems in engineering**. John Wiley & Sons, 1990.

WHITE, N. M.; TURNER, J. D. Thick-film sensors: past, present and future. **Measurement Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1, 1997.

WILLIAMS, C. B.; YATES, R. B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. **sensors and actuators A: Physical**, v. 52, n. 1-3, p. 8-11, 1996.

YANG, J.; ZHOU, H.; HU, Y.; JIANG, Q. Performance of a piezoelectric harvester in thickness-stretch mode of a plate. **ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**, v. 52, n. 10, p. 1872-1876, 2005.

ZAHEDI, A. Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. **Renewable Energy**, v. 31, n. 5, p. 711-718, 2006.

ZHANG, J.; FANG, Z.; SHU, C.; ZHANG, J.; ZHANG, Q.; LI, C. A rotational piezoelectric energy harvester for efficient wind energy harvesting. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 262, p. 123-129, 2017.

ZELENKA, J. **Piezoelectric Resonators and their Applications (Studies in Electrical and Electronic Engineering)**. Elsevier Science Publishers BV, 1986.

ZENG, W.; TAO, X-M.; CHEN, S.; SHANG, S.; CHAN, H. L. W.; CHOY, S. H. Highly durable all-fiber nanogenerator for mechanical energy harvesting. **Energy & Environmental Science**, v. 6, n. 9, 2013.

ZUO, L.; TANG, X. Large-scale vibration energy harvesting. **Journal of intelligent material systems and structures**, v. 24, n. 11, p. 1405-1430, 2013.