



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

**ALESSANDRO CASSIANO VARGAS DO NASCIMENTO**

**SISTEMA DE *ENERGY HARVESTING* EMPREGADO A ESTRUTURAS BIO-  
INSPIRADAS USANDO DISPOSITIVO PIEZOELÉTRICO PVDF**

**CERRO LARGO**

**2019**

**ALESSANDRO CASSIANO VARGAS DO NASCIMENTO**

**SISTEMA DE *ENERGY HARVESTING* EMPREGADO A ESTRUTURAS BIO-  
INSPIRADAS USANDO DISPOSITIVO PIEZOELÉTRICO PVDF**

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

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

**CERRO LARGO**

**2019**

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

Nascimento, Alessandro Cassiano Vargas do  
Sistema de Energy Harvesting Empregado a Estruturas  
Bio-inspiradas Usando Dispositivo Piezoelétrico PVDF /  
Alessandro Cassiano Vargas do Nascimento. -- 2019.  
59 f.:il.

Orientador: Ph.D. Jorge Luis Palacios Felix.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de  
Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS ,  
2019.

1. Energy Harvesting. 2. Piezoelectricidade. 3.  
Vibrações. 4. Vento. 5. Energia Sustentável. I. Felix,  
Jorge Luis Palacios, orient. II. Universidade Federal da  
Fronteira Sul. III. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**ALESSANDRO CASSIANO VARGAS DO NASCIMENTO**

**SISTEMA DE *ENERGY HARVESTING* EMPREGADO A ESTRUTURAS BIO-  
INSPIRADAS USANDO DISPOSITIVO PIEZOELÉTRICO PVDF**

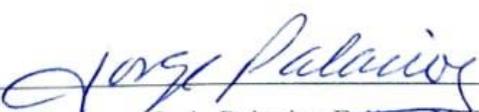
Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira sul.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

06/12/19

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix – UFFS

  
Prof. Dr. Marcio Antonio Vendruscolo – UFFS

  
Prof. Dr. Thiago de Cacio Luchese – UFFS

## AGRADECIMENTO

Aos meus queridos pais, Ademar e Neidi, e também minha querida avó, Dona Ana, que sempre acreditaram em mim, independentemente da condição ou adversidade, sendo figuras importantíssimas e fundamentais em minha vida, onde sempre me motivaram a dar um passo adiante e chegar onde cheguei, ao final desta graduação. Pela dedicação que sempre tiveram para que tudo que eu fizesse fosse possível, além de abdicar de algumas (muitas) coisas para o conforto de vocês em função de mim. São as pessoas mais incríveis e importantes da minha vida.

A minha irmã de coração Tauane, por ter me guiado até a UFFS, por toda atenção e amparo. Ao meu também irmão de coração e colega de quarto Eduardo, pela parceria e vários incentivos, principalmente nos últimos dois anos. Aos demais irmãos Nicolas, Maurício, Eric e Leonardo por sempre me apoiarem e se preocuparem comigo. Amo vocês!

Agradeço ao Prof<sup>o</sup>. Dr. Jorge Luis Palacios Felix por confiar em mim e em meu trabalho, pela oportunidade de desenvolvimento de meu trabalho, além de me auxiliar nos estudos para seleção de mestrado em direção a um futuro que, até pouco tempo atrás, nunca havia imaginado.

Agradeço muito aos professores do curso de Física Marcio Pinheiro, Tiago Ricci e Aline Rauber pelo apoio nos momentos em que surgiram dúvidas e vocês, sempre que possível, se colocaram à disposição para atendê-las.

Aos professores da Banca, Dr. Marcio Antonio Vendruscolo e Dr. Thiago de Cacio Luchese, por aceitarem o convite como avaliadores da apresentação do meu trabalho de conclusão.

E aos amigos(as) que fiz durante a graduação, principalmente aqueles(as) que estiveram comigo ao longo desses últimos cinco anos. Sempre trabalhando juntos para que chegássemos a um objetivo em comum: o de obter aprovação. Meus amigos da república Casart, os quais marcaram a minha vida com diversos momentos de alegrias.

À minha namorada Julia, que por mais que tenha entrado a pouco tempo em minha vida, já fez (faz) muito. Sempre me incentivando, mesmo que nos únicos dias que tínhamos para estarmos juntos, eu não pude lhe dar a devida atenção.

Esvazie sua mente de modelos, formas, seja amorfo como a água. Você coloca a água em um copo, ela se torna o copo. Você coloca a água em uma garrafa, ela se torna a garrafa.

Bruce Lee.

## RESUMO

Recentemente uma crescente tendência no ramo tecnológico voltado ao desenvolvimento de dispositivos eletrônicos autônomos e de baixo consumo de energia levou ao surgimento de um conceito relativamente novo de pesquisa, chamando *Energy Harvesting*. É do interesse de tal segmento de estudo buscar novas alternativas de se derivar fontes de energia ambiente, preferencialmente não convencionais, tais como vibrações, cargas mecânicas, solar, térmica, eólica, hidráulica, entre outras pouco usuais, por assim dizer, em pequenas quantidades de energia elétrica útil para alimentar dispositivos e circuitos eletrônicos de baixo consumo de energia elétrica. Dessa forma, o presente estudo apresenta uma abordagem alternativa de produção de energia renovável em microescala explorando o potencial eólico por meio de vibrações mecânicas induzidas e impostas pelo fluxo de vento, sobre pequenas estruturas arquitetônicas artificiais com formato de folha árvore real, empregando o polímero piezoelétrico Polifluoreto de Vinilideno (PVDF) como caule vertical e horizontal. Assim, três modelos de folhas artificiais foram desenvolvidos e investigados na conversão de energia mecanoelétrica, os quais foram denominados Folha Triangular em I (FTI) e Folha Artificial em I (FAI), ambos com o material piezoelétrico orientado verticalmente (I); e Folha Triangular em L (FTL), com o elemento piezoelétrico orientado horizontalmente (L). Os resultados obtidos no estudo demonstraram um desempenho razoavelmente bom na conversão de oscilações mecânicas em eletricidade, especialmente nos modelos FAI e FTI. Enquanto para o modelo FTL, observou-se que o emprego do transdutor PVDF não é o mais adequado na configuração horizontal proposta, havendo assim a necessidade de experimentos futuros com materiais um pouco mais rígidos, como é o caso das cerâmicas piezoelétricas. Ademais, as máximas potências de saída registradas nos experimentos foram de  $3,96 \mu\text{W}$  para o modelo FAI e  $2,22 \mu\text{W}$  para o modelo FTI com velocidades do vento em  $5,66 \text{ m/s}$ , superando alguns resultados encontrados na literatura.

Palavras-chave: Energy Harvesting. Piezoeletricidade. Vibrações. Vento. Energia Sustentável.

## ABSTRACT

Recently a growing trend in the technology industry towards the development of autonomous and low-power electronic devices led to the emergence of a relatively new research concept called Energy Harvesting. It is in the interest of such a segment of study to look for new alternatives to derive sources of ambient energy, preferably unconventional, such as vibration, mechanical, solar, thermal, wind, hydraulic, among others unusual, as it were, in small amounts of electrical energy useful for powering low-power electronic devices and circuits. Thus, the present study presents an alternative approach to microscale renewable energy production by exploiting wind potential through wind-induced and mechanical vibrations imposed on small artificial real tree-shaped structures using the piezoelectric polymer Vinylidene Polyfluoride (PVDF) as vertical and horizontal stem. Thus, three models of artificial leaves were developed and investigated in the conversion of mechanoelectric energy, which were called Triangular Leaf I (FTI) and Artificial Leaf I (FAI), both with vertically oriented piezoelectric material (I); and Triangular L-shaped Sheet (FTL), with the horizontally oriented piezoelectric element (L). The results obtained in the study demonstrated a reasonably good performance in converting mechanical oscillations into electricity, especially in the FAI and FTI models. While for the FTL model, it was observed that the use of the PVDF transducer is not the most appropriate in the proposed horizontal configuration, thus requiring future experiments with slightly more rigid materials, such as piezoelectric ceramics. In addition, the maximum output power recorded in the experiments was  $3.96 \mu\text{W}$  for the FAI model and  $2.22 \mu\text{W}$  for the FTI model with wind speeds of  $5.66 \text{ m/s}$ , surpassing some results found in the literature.

Keywords: Energy harvesting. Piezoelectricity. Vibrations. Wind. Sustainable energy.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Sistemática experimental ilustrativa simplificada.....	16
<b>Figura 2</b> – Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS).....	19
<b>Figura 3</b> – Espectro de demanda energética de acordo com as diferentes aplicações.....	25
<b>Figura 4</b> – Matriz energética Energy Harvesting. ....	26
<b>Figura 5</b> – Esquema de representação do feito piezoelétrico (a) inverso, onde a aplicação de uma tensão elétrica (V) causa a deformação material; e (b) efeito direto, no qual a deformação do material, causada por uma força externa qualquer (F), gera uma tensão de saída. ....	28
<b>Figura 6</b> – (a) Eixos de referência. (b) Modos de operação de um transdutor piezoelétrico. A grandeza F é a força aplicada e V é a tensão elétrica de resposta. ....	31
<b>Figura 7</b> – (a) Primeiro conceito de árvore a partir de materiais piezoelétricos. (b) (c) e (d) Primeiras folhas artificiais tipo caule piezoelétrico.....	33
<b>Figura 8</b> – Diagrama esquemático do coletor de energia piezoelétrico oscilante. De maneira análoga ao pêndulo físico, a folha está livre para oscilar sobre o plano da seção de estudo, da esquerda para a direita em relação ao pelo plano de fase em repouso representado em (a) e (b).....	37
<b>Figura 9</b> – Imagens em escala real dos modelos desenvolvidos, onde estão apresentados (a) FAI, (b) FTI e (c) FTL, respectivamente, acoplados ao transdutor piezoelétrico PVDF LDT1-028K. ....	38
<b>Figura 10</b> – Configuração experimental e equipamentos utilizados, tais como: (a) pórtico de metal, (b) anemômetro, (c) ventilador eletrodoméstico, (d) multímetro em modo TEMP e (e) osciloscópio digital. ....	40
<b>Figura 11</b> – Vista superior da bancada experimental juntamente com às demarcações das seções de estudo a partir da distância (cm) do ventilador eletrodoméstico.....	43
<b>Figura 12</b> – Circuito elétrico utilizado para a determinação da potência alcançada pelos modelos.....	45

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> – Participação de energias renováveis na matriz energética (a) no Brasil e no mundo e (b) na OIE. ....	22
<b>Gráfico 2</b> – Distribuição das velocidades em função da distância entre o ventilador eletrodoméstico e a seção experimental. ....	44
<b>Gráfico 3</b> – Padrões de tensão observados quando o vento sopra em velocidades de 3,22, 4,99 e 5,66 m/s, respectivamente, de acordo com os modelos (a) FAI, (b) FTI e (c) FTL. ....	47
<b>Gráfico 4</b> – Sinais de FFT observados para faixa de velocidades de 3,22, 4,99 e 5,66 m/s, respectivamente, para o modelo FTI. ....	48
<b>Gráfico 5</b> – (a) Tensão eficaz em função da velocidade do vento e (b) potência de saída em função da velocidade do vento. ....	49

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Propriedades típicas do material PVDF.....	36
<b>Tabela 2</b> – Informações gerais dos modelos FTI, FTL e FAI. ....	39
<b>Tabela 3</b> – Resumo dos resultados obtidos pelos principais autores, comparando-os com os resultados da literatura.....	50
<b>Tabela 4</b> – Lista de informações fornecidas a respeito da construção do polígono circunscrito sobre a imagem da folha.....	59

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
2. OBJETIVO.....	17
2.1. OBJETIVO GERAL.....	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	18
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	18
3.2. ENERGIA & SUSTENTABILIDADE .....	18
3.3. CONSUMO ENERGÉTICO & FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA LIMPA.....	21
3.4. O CONCEITO DE <i>ENERGY HARVESTING</i> , INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SEUS DESDOBRAMENTOS .....	23
3.5. POLÍMEROS PIEZOELÉTRICOS .....	27
3.5.1. PIEZOELETRICIDADE & MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS .....	27
3.5.3. ENERGIA DO VENTO APARTIR DE COLETORES DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS INDUZIDAS .....	32
4. METODOLOGIA .....	36
4.1. DESCRIÇÃO DOS MODELOS: FTI, FTL & FAI .....	36
4.2. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL .....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	42
5.1. AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES OBTIDAS PELO VENTILADOR ELETRODOMÉSTICO .....	42
5.2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E POTÊNCIA OBTIDA .....	44
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	51
7. REFERÊNCIAS .....	52
8. APÊNDICE .....	59

APÊNDICE A – Coordenadas obtidas através do software AutoCAD para determinação da área aproximada.....	59
APÊNDICE B – Distribuição dos pontos do polígono circunscrito sobre a folha utilizando o software Autodesk AutoCAD versão 2019. ....	60

## 1. INTRODUÇÃO

É notável e também muito fácil, perceber que alguns fatores de ordem cultural, social, econômica, energética e tecnológica do meio moderno sejam tão diferentes se comparados, por exemplo, com a realidade vivida em tempos passados, principalmente ao considerarmos os aspectos e avanços alcançados nas áreas da ciência, saúde e tecnologia. Juntamente com estes progressos vieram também algumas mudanças. A forma como passamos a utilizar energia mudou, especialmente com o advento da eletricidade, impactando positivamente o meio social com aumento na capacidade produtiva, maior qualidade de vida, mais saúde, conforto e acesso a bens de consumo (FARIAS et al., 2011; HARARI, 2015).

O consumo intensivo por parte das indústrias junto ao aumento dos padrões de qualidade de vida e crescimento populacional têm contribuído progressivamente na demanda por mais energia (VIDADILI et al., 2017; MANYALA, 2018). Conseqüentemente, há também uma certa preocupação e um natural aumento nos investimentos em novas tecnologias voltadas à produção de energia por fontes alternativas, preferencialmente renováveis, que passaram a ser o foco de muitas pesquisas (GSR, 2019). A exemplo disso, podemos citar que, o Brasil, no ano de 2016, foi considerado o maior produtor de energia elétrica por conversão eólica da América Latina (OLIVEIRA et al., 2018).

Em meio a este cenário, o conceito de “*Energy Harvesting*” apresenta-se como uma alternativa modestamente simples e, ao mesmo tempo, inovadora em atender uma parcela dessa demanda energética a partir de fontes renováveis (RYU et al. 2018). De acordo com MHETRE et al. (2017), o conceito só ganhou proporção devido ao recente e progressivo avanço no ramo tecnológico para o desenvolvimento de sensores e aparelhos eletrônicos de baixo consumo de energia. Derivar energia ambiente, tais como luz solar, calor, pressão, vibrações mecânicas e energia eólica são alguns exemplos das aplicações mais relatadas (RUBIO, 2018). Uma solução promissora, é converter a energia cinética do vento em vibração mecânica a partir da qual a energia elétrica pode ser extraída com emprego de dispositivos transdutores eletromecânicos (MCCARTHY et al., 2015; HAMLEDAR et al., 2019; SHEPELIN et al., 2019; SAFAEI et al., 2019).

Em particular, as vibrações mecânicas apresentam-se como uma fonte de energia vantajosa por serem consideradas limpas e renováveis (MHETRE et al., 2017), podendo manifestar-se de diferentes formas, quer seja em ambientes urbanos ou naturais como, por exemplo, em vibrações induzidas pelo fluxo de vento ou água (um exemplo típico desse

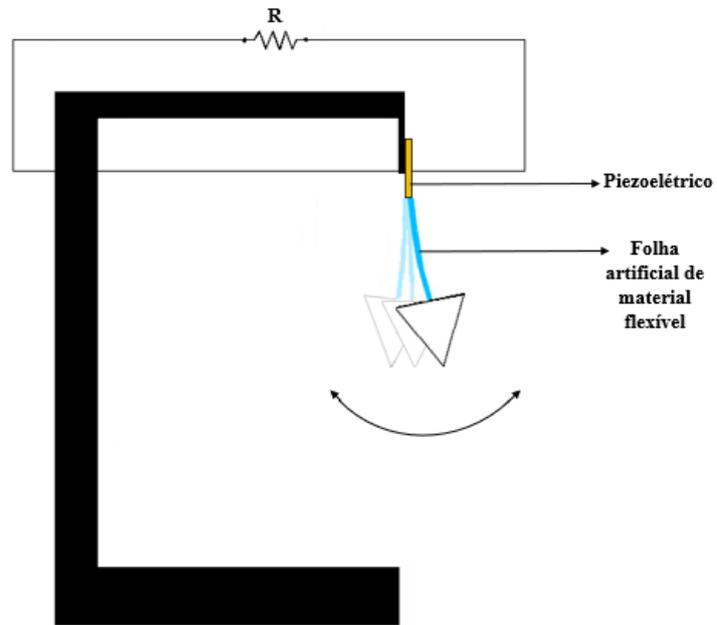
fenômeno pode ser identificado naturalmente pelo simples tremular de uma bandeira ou então pelo efeito de balanço das próprias árvores e de suas folhas), ou ainda, devido à natureza de forças externas como condições operacionais de máquinas industriais, amortecedores de automóveis, entre outros (SHEPELIN et al., 2019; SAFAEI et al., 2019).

Dentre os diferentes meios de conversão de vibrações mecânicas em energia elétrica a utilização de dispositivos transdutores piezoelétricos apresenta grande vantagem por ser uma estrutura simples e, sobretudo, de fácil aplicação (ANTUNES et al., 2014; MHETRE et al., 2017; SONG et al., 2017). Estes materiais possuem a habilidade de responder a diferentes estímulos físicos externos de duas maneiras. A primeira consiste na geração direta de um sinal elétrico em resposta a uma força mecânica externa empregada sobre o material. Enquanto que, de maneira inversa, a resposta é dada pela deformação do material se nele aplicado uma carga elétrica (LOPES et al., 2014; DEIVASIGAMANI et al., 2014).

Inúmeras obras propõem diferentes formas de converter vibrações mecânicas causadas pela ação do vento, dentre as quais, cabe destacar a concepção arquitetônica de folha de árvore artificial feita a partir de materiais flexíveis (LI et al., 2009 e 2011; THORNTON, 2011; DEIVASIGAMANI, 2014; SONG et al., 2017; MCCCLOSKEY et al., 2017). Boa parte dos autores utilizam o polímero piezoelétrico de Polifluoreto de Vinilideno (PVDF), associando aos modelos de folhas artificiais o material piezoelétrico como caule de uma folha real, devido a sua flexibilidade (LI et al., 2011; DEIVASIGAMANI, 2014).

Nesse sentido, deseja-se explorar o modelo desenvolvido pelo autor MCCCLOSKEY et al. (2017) aproveitando o fluxo de vento atuante sobre a face da membrana foliar da estrutura gerando oscilações, semelhante ao comportamento de um pêndulo físico (Figura 1). Para tanto foi utilizado um filme PVDF como caule para três modelos de folhas artificiais, os quais foram denominados Folha Triangular em I (FTI) e Folha Artificial em I (FAI), ambas com o piezoelétrico orientado verticalmente, e Folha Triangular em L (FTL) com o dispositivo transdutor orientado horizontalmente. Os resultados de desempenho entre os modelos foram feitos com base na avaliação dos sinais de tensão obtidos e, posteriormente, o cálculo de potência frente à aplicação de diferentes faixas de velocidades.

**Figura 1** – Sistemática experimental ilustrativa simplificada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

## 2. OBJETIVO

### 2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é investigar experimentalmente a proposta de produção de energia sustentável baseada no conceito de “*Energy Harvesting*” a partir de vibrações mecânicas promovidas pela ação do vento utilizando dispositivo eletromecânico piezoelétrico.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho do polímero piezoelétrico Difluoreto de Polivinilideno (PVDF) LDT1-028K PIEZO SENSOR (MEAS TE *connectivity*) como “*Harvester*”;
- Investigar duas propostas estruturais empregadas como membrana foliar das folhas artificiais: triangular e bio-inspirada;
- Utilizar o dispositivo PVDF como estrutura flexível, simulando o caule e o comportamento de folhas biológicas;
- Avaliar o desempenho das folhas artificiais com o ajuste da haste piezoelétrica vertical e horizontalmente em relação à corrente de ar;
- Analisar os efeitos da magnitude de velocidade do vento sobre as estruturas propostas através da obtenção das saídas de tensão elétrica.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é apresentada uma breve contextualização teórica que sustenta o desenvolvimento do presente estudo, contendo as relações entre Energia & Sustentabilidade, Consumo Energético & Fontes Alternativas de Energia, o conceito de “*Energy Harvesting*”, Tecnologias e seus Desdobramentos, Piezoelectricidade e, por fim, alguns dos principais sistemas bio-inspirados de *harvesters* de vibrações mecânicas relatados até o momento desta monografia.

#### 3.2. ENERGIA & SUSTENTABILIDADE

Sem energia a vida por si só não existiria, já que, por exemplo, até mesmo os microrganismos através da respiração celular (síntese de energia química) utilizam energia (ATP) em atividades vitais. Sob um ponto de vista evolutivo, energia é também um elemento chave e fundamental em diversos aspectos, beneficiando sempre aqueles(as) que, de certo modo, buscaram explorar, otimizar e diversificar mais e mais a utilidade fim da energia. Um típico exemplo neste caso é a própria raça humana que, apesar de sua suposta evolução, curiosamente vive um grande dilema entre a utilização de combustíveis não-renováveis e energias sustentáveis alternativas.

A potencialização do trabalho, a utilização de combustíveis fósseis em escala e o domínio da eletricidade foram eventos/marcos que desencadearam uma série de avanços e, também, de muitas mudanças, principalmente em relação aos padrões produtivos e comportamentais (consumo) da sociedade humana, com amplo incremento na capacidade produtiva (produção em massa), maior qualidade de vida e saúde (longevidade), conforto e acesso a bens de consumo (acesso à tecnologia) muito além até do que se poderia imaginar a 100 ou 200 anos atrás (FARIAS et al., 2011; HARARI, 2015). Por outro lado, na mesma proporção, aumentou-se também a capacidade de impactar e alterar o planeta, especialmente pela forma como a humanidade passou a produzir, consumir e utilizar energia a partir de combustíveis fósseis como carvão mineral, gás e petróleo e seus derivados, grandes responsáveis pelas alterações climáticas (OWD, 2019; MEEHL et al., 2009; LI et al., 2014; LEWIS et al., 2015).

Nesse sentido, umas das primeiras medidas tomadas com o objetivo de melhorar as relações entre homem e meio ambiente foi promovida pela Organização das Nações Unidas (ONU) através da realização da Conferência de Estocolmo, em 1972, a qual levou a uma conclusão óbvia: era necessário reavaliar a concepção de desenvolvimento econômico adotado até então, por um modelo nutriente e construtor (em um horizonte futuro), buscando assim um equilíbrio entre as necessidades humanas e do ambiente, o que viria a ser definido mais tarde (no Relatório Brundtland, 1987) como um modelo de desenvolvimento sustentável (NASCIMENTO, 2012; VEIGA, 2014; FEIL et al., 2017). Até pouco tempo atrás, as questões relacionadas ao meio ambiente eram muito mais restritas a aspectos voltados ao saneamento básico, redução das emissões dos gases de efeito estufa e qualidade de vida (o que, de fato, faz muito sentido se considerarmos o contexto da época), pelo menos até a Declaração dos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), em 2000.

Com a publicação da “Agenda de 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”, em 2015, as metas de desenvolvimento foram ampliadas, tornando-se assim mais abrangente e explícitas em relação à energia limpa como um de seus objetivos (Figura 2), indo de apenas oito para dezessete Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), dos quais um deles (7º objetivo) é assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia elétrica para todos(as), aumentando substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global, com intuito de diminuir o lançamento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera.

**Figura 2** – Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS).



Fonte: ONU, 2015.

Frente a tais mudanças na concepção de mundo, muito se tem pesquisado em sistemas de energias renováveis, tornando-as parte integrante de muitas agendas de planejamento nacional fomentadas através de maiores tributações sobre a gasolina e o diesel, por exemplo, principalmente nos países constituintes da União Europeia (UE), como é o caso da Alemanha (WANG et al., 2016; BALETA et al., 2019). Cada vez mais competitiva em termos de custo e eficiência (BALETA et al., 2019; GSR, 2019), estas são prerrogativas que corroboram cada vez mais com investimentos em energias renováveis.

Inegavelmente o mundo de hoje encontra-se em condições especialmente favoráveis para levar adiante uma transição energética indispensável em relação a energias renováveis, a qual não limita-se apenas a um novo modelo energético de alta eficiência, mas que, sobretudo, também representa um grande desafio em termos de gestão e garantia de que os custos, riscos e benefícios ambientais e sociais dessa mudança sejam, de fato, sustentáveis (CHEN et al., 2019). Assim, pressupostamente, a energia sustentável dever fazer face aos seus princípios:

Como energia que fornece serviços de energia de baixo custo, acessíveis e confiáveis, que atendem às necessidades econômicas, sociais e ambientais dentro do contexto geral do desenvolvimento da sociedade para a qual os serviços são destinados, reconhecendo a distribuição equitativa para atender a essas necessidades. (VIDADILI et al., 2017, p. 1154)

A grosso modo, a sustentabilidade das energias renováveis concentra-se, principalmente, na avaliação da sustentabilidade no sistema energético, economia, sociedade, meio ambiente e tecnologia, podendo trazer benefícios como a melhoria da saúde pública com a redução dos níveis de poluição do ar, maior confiabilidade e resiliência, levando a geração de emprego, capacitação técnica (mão de obra especializada) e melhorias tecnológicas com mais pesquisas, atendimento a demanda de energia, benefícios fiscais através de políticas de fomento, entre outros (NASSAR et al., 2019; GSR, 2019; WANG et al., 2019; KUROCHKIN et al., 2019).

Sendo assim, enquanto profissionais de meio ambiente frente aos ODS, especialmente em relação a fontes de energia limpa, resta a atuação desses indivíduos como veículos intermediários de informação e formação entre pessoas e demais grupos, fazendo uma leitura dos ODS através de uma linguagem mais acessível, ajudando a entender o valor das ações, dos

recursos, dos diferentes capitais, especialmente dos capitais naturais, para proporcionar a sustentabilidade pretendida, ou seja, a partir do princípio de educação ambiental.

### 3.3. CONSUMO ENERGÉTICO & FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA LIMPA

As várias fontes energéticas renováveis amplamente disponíveis no ambiente, seja energia eólica, hidráulica, solar, biomassa ou térmica, em qualquer uma das situações, direta ou indiretamente, estamos diante dos efeitos da energia sustentável do Sol, responsável pela dinâmica natural do planeta Terra (ASSIREU et al. 2015). Embora a motivação pelo uso de fontes alternativas de energia possa parecer atual, elas já eram aproveitadas muito antes disso. É o caso, por exemplo, das primeiras embarcações a vela (3000 a.C.), os moinhos de vento (604 a.C.) e a roda d'água, invenções que transcendem o tempo (FARIAS et al., 2011). Por outro lado, a realidade passou a ser um pouco diferente quando o uso da energia sustentável foi deixada em segundo plano, sendo substituídos pela energia química de origem fóssil: carvão e petróleo.

Segundo o relatório publicado pela empresa multinacional de óleo e gás do Reino Unido, British Petroleum (BP), o consumo global de energia aumentou 2,9% em 2018. No total, foram consumidos 580,49 EJ (13.864,9 Mtep), dos quais cerca de 85% são provenientes de recursos fósseis (petróleo, gás natural e carvão), 4% de usinas nucleares e outros 11% são obtidos de fontes renováveis (hidráulica, eólica, solar, biomassa, entre outras). Estes dados refletem sobre uma desigual e avassaladora utilização preferencial dado às energias não renováveis. Contudo há indícios de mudanças nesse cenário para os próximos anos. De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC (2011), é tecnicamente possível que até 2050 pouco mais de 80% da energia consumida passe a ser suprida por fontes renováveis (PBMC, 2014).

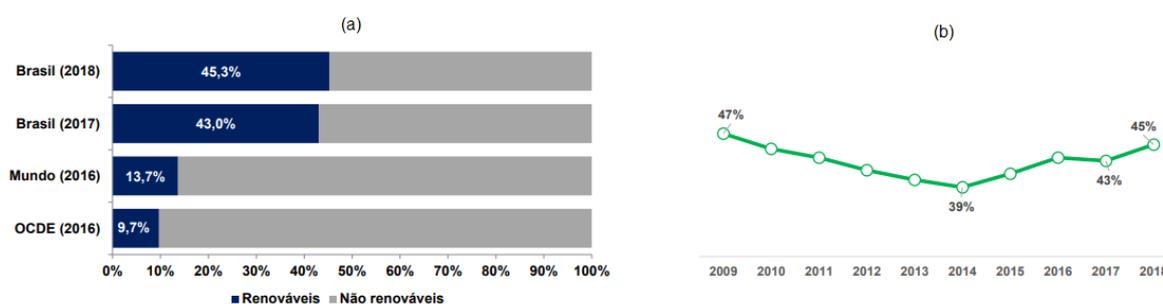
Assim, a busca sinérgica pela emancipação energética dos combustíveis fósseis por meio da implantação de tecnologias alternativas vem sendo intensificadas devido a ganhos econômicos em função da diminuição dos custos de produção de energia a partir de fonte renovável, como é o caso nos EUA e em países do Oriente Médio, Ásia Central e América Latina (KUROCHKIN et al., 2019). A tendência da energia “verde” vem fomentando o mercado, em virtude do vislumbre às muitas fontes de energia renováveis, como a energia eólica e solar (GSR, 2019). Um dos reflexos imediatos disso, é evidenciado pelo acréscimo de 17%,

em 2018, na participação por parte das fontes de energia limpa, acima da média dos últimos 10 anos (BP, 2019).

As hidrelétricas não representam mais metade da capacidade acumulada de energia renovável em operação (GSR, 2019). Enquanto isso, a energia eólica proporcionou mais da metade do crescimento das renováveis, ao passo em que a energia solar contribuiu com mais de um terço (IEA, 2018). Uma estimativa feita pelo grupo REN21, divulgada em um de seus mais recentes relatórios “*Renewable 2019: Global Status Report*”, estima que 181GW foram instalados em 2018. A energia solar, através dos painéis fotovoltaicos, representou um acréscimo de 55% da nova capacidade renovável, seguidas pela energia eólica (28%) e energia hidrelétrica (11%).

O Brasil possui uma condição especialmente privilegiada nesse sentido, exercendo um importante e significativo protagonismo quando se trata de energia limpa, já que quase a metade dos seus recursos energéticos advém de fontes de energia sustentável (Gráfico 1.a), fundamentalmente pela participação da hidroeletricidade. A Oferta Interna de Energia (OIE) elevou-se de 43%, em 2017, para 45,3%, muito mais do que em outros países, como pode ser visto no Gráfico 1 abaixo.

**Gráfico 1** – Participação de energias renováveis na matriz energética (a) no Brasil e no mundo e (b) na OIE.



Fonte: EPE, 2019.

Além disso, o país também possui grande potencial de geração através de outras fontes alternativas como energia eólica, solar e biocombustíveis (PEREIRA et al., 2012), porém muito aquém do que poderiam ser exploradas se comparadas a hidroeletricidade.

Particularmente a energia hidráulica apresenta algumas limitações físicas de expansão, além de outros fatores como é o caso, por exemplo, de movimentos sociais que se opõe ou restringem ampliação desta modalidade, fazendo com que o Brasil também busque a diversificação de sua matriz energética complementando às hidrelétricas existentes.

Isso porquê as tecnologias da informação (eletrônica), assim como de energia renovável estão diante de um momento de grandes revoluções, com áreas de exploração e aplicações pouco triviais. Novos métodos e técnicas que permitem a captação de energia mecânica, magnética, térmica, solar ou através de outros meios para diferentes fins e aplicações foram e tem sido amplamente desenvolvidos (PROBST et al., 2017).

#### 3.4. O CONCEITO DE *ENERGY HARVESTING*, INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SEUS DESDOBRAMENTOS

Diferentemente do que se possa imaginar, a ideia de “*Energy Harvesting*” é um tanto antiga, já que os primeiros registros deste conceito são datados a partir do ano de 1826. Na ocasião, o físico alemão Thomas Johann Steinbeck, percebeu a manifestação de uma corrente elétrica entre dois metais distintos ao serem mantidos sob temperaturas distintas, fenômeno este chamado de efeito termoelétrico. Nas décadas seguintes, os estudiosos Joseph Henry e Michael Faraday descobriram, independentemente, o princípio da indução eletromagnética (1831) capaz de produzir uma corrente elétrica a partir do magnetismo. Posteriormente, o físico francês Edmund Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico (1839) quando experimentava uma célula eletrolítica composta por dois eletrodos de metal. Por fim, os irmãos Pierre e Jacques Curie descobriram o fenômeno da piezoelectricidade (1880) em alguns cristais de quartzo quando submetidos a estresse mecânico (HARB, 2011; RUBIO, 2018).

Entretanto, o conceito só ganhou proporção, de fato, com o advento de materiais inteligentes, cujas propriedades podem ser significativamente alteradas de maneira controlada por estímulos físicos externos (IN et al., 2018). Desde então, até o presente momento da publicação desta monografia, já são mais de 250 periódicos registrados pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) em que constam mutuamente os termos “*Energy Harvesting*” e “*Renewable Energy*”. A correlação entre ambos os termos se deve em grande parte ao surgimento de novas tecnologias utilizando semicondutores que exigem baixa corrente nos meios de comunicação, informação, monitoramento e exploração de energia renovável, frutos estes de uma série de revoluções tecnológicas nas áreas da ciência e tecnologia de materiais, resultando assim em novas abordagens de produção de energia (MANYALA, 2018).

A terminologia “*Energy Harvesting*” tem sua origem do inglês, o qual significa simplesmente “colheita” (SAFAEI et al., 2019) ou “captura” (GUSAROV, 2015) de energia.

De acordo com o autor SOIN (2018), “*Energy Harvesting* pode ser definido como um processo em que fontes como carga mecânica, vibrações, gradientes de temperatura, luz, rádio frequência (RF), entre outros, são eliminadas e convertidas para obter níveis relativamente pequenos de energia na faixa de  $nW - mW$ ” (p. 295). Ou seja, trata-se de uma proposta alternativa ao aproveitamento da energia renovável de baixa amplitude antes desperdiçada, em pequenas quantidades de energia elétrica útil.

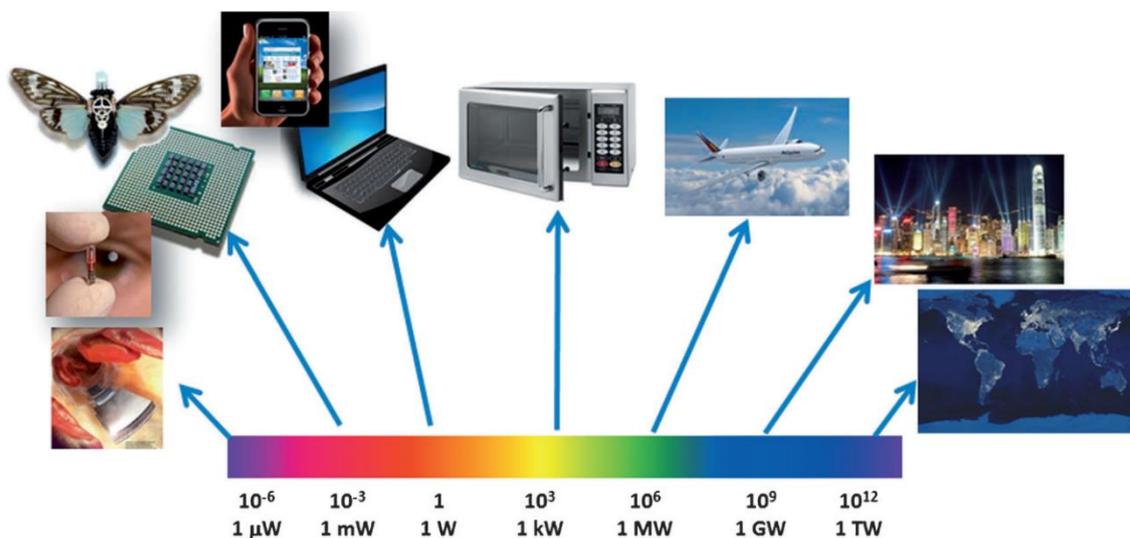
Tal como os biocombustíveis, esta alternativa tornou-se também uma área de interesse crescente no meio acadêmico, industrial e militar (ROCHA, 2014), principalmente nas últimas duas décadas, impulsionada por progressos no ramo da eletrônica, como a redução do consumo de energia dos circuitos eletrônicos integrados, o surgimento de dispositivos portáteis e pelas inovações alcançadas nos sistemas de comunicação sem fio (DEPEX, 2014).

Naturalmente, esses avanços também levaram ao desenvolvimento de novos dispositivos eletrônicos baseados em silício, permitindo a disponibilidade de uma ampla variedade de aparelhos portáteis pessoais de pequeno porte (VULLERS et al., 2009; HARB, 2010), figurando assim, uma série de elementos incorporados no meio social que, por sua vez, acabaram levando a uma ampla pluralização tecnológica desses aparelhos.

Nesse sentido, a tendência de uma agenda progressista em direção a um futuro marcado pela interconexão digital (LI et al., 2014; PROBST et al., 2017), conhecida como “Internet das coisas” (termo de origem do inglês “*Internet of Things*” - IoT), vêm fazendo com que produtos como aparelhos eletrônicos, eletrodomésticos e carros recebam paulatinamente a função *smart*, conectando-os permanentemente à internet (SOIN, 2018; SOBRINHO, 2019). Segundo DEPEX (2014), esta função aumentou não só o número de funções e complexidade de *softwares* destes produtos, mas também a capacidade de *hardware*, processamento e armazenamento de dados, ao custo de mais energia.

Trata-se, assim, de um pequeno aspecto sob uma questão muito maior, pois para autores como WANG et al. (2012) e MANYALA, (2018), por exemplo, considera-se que a demanda mundial por energia continue naturalmente não só devido ao aumento da população e atividades econômicas associadas, mas também ao desenvolvimento e avanços tecnológicos (Figura 3). No entanto, a razão por trás de tal aumento não estaria relacionada propriamente ao consumo individual de energia desses dispositivos, já que o consumo unitário destes aparelhos pode ser considerado de baixo consumo (“*low power*”), mas sim, a totalidade de tais dispositivos em circulação.

**Figura 3** – Espectro de demanda energética de acordo com as diferentes aplicações.



Fonte: WANG et al. (2012).

Via de regra, boa parte desses eletrônicos e de seus circuitos integrados utilizam energia armazenada em baterias recarregáveis ou substituíveis (HARB, 2011; WANG et al., 2012; HAMLEHDAR et al., 2019; SAFAEI et al., 2019). Entretanto, conforme DEPEX (2014), a capacidade de armazenamento de energia por parte das baterias não aumentou na mesma medida em que houve acréscimo no consumo destes aparelhos por conta de algumas limitações físicas, como peso e tamanho. Aliás, a presença deste componente traz consigo pontos negativos, como o risco ambiental em potencial relacionado ao manejo inadequado dos resíduos de baterias inutilizáveis (o descarte das baterias é problemático, pois contém produtos químicos e metais nocivos, colocando em risco a saúde humana e do meio ambiente) e os custos operacionais envolvidos na substituição e/ou manutenção das mesmas (VULLERS et al., 2009; WANG et al., 2012; BOWEN et al. 2013).

Assim, a busca por soluções alternativas em energia baseadas no conceito *Energy Harvesting* apresenta-se como um possível caminho para contornar a demanda energética de circuitos e dispositivos eletrônicos de baixa potência, com a promessa de prestar uma maior autonomia e propiciar aplicações de monitoramento em locais de difícil acesso ou muito remotos (DEPEX, 2014; GUSAROV, 2015; SOIN, 2018). Um grande desafio para o avanço dessas tecnologias pode estar intimamente relacionado à quantidade de energia elétrica gerada, a qual é considerada muito baixa. Por outro lado, para o autor ROCHA (2012), enquanto as

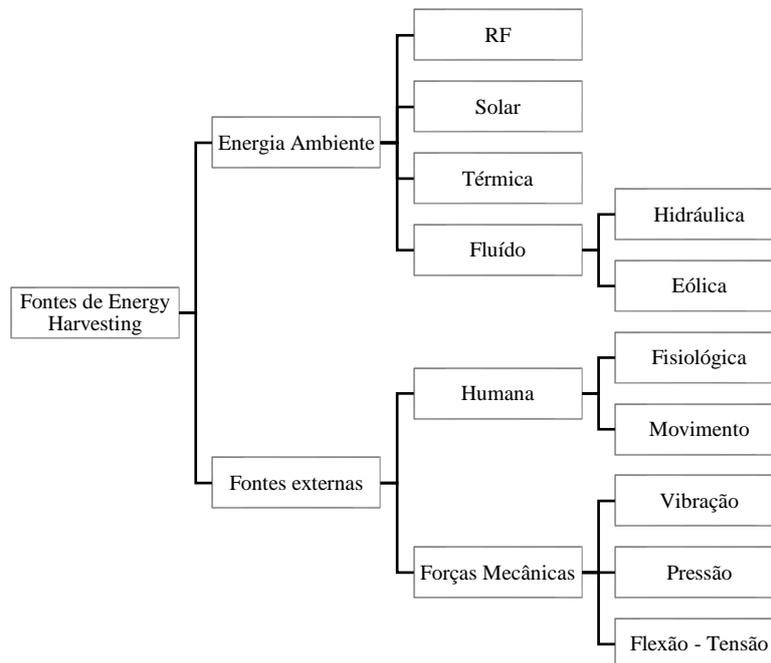
fontes de energia para geração em larga escala custam dinheiro (custo de óleo, carvão, entre outras), a fonte de energia para os sistemas *energy harvesting* está amplamente disponível e sem custo algum.

Segundo DANG et al (2012), as fontes de captura de energia podem ser classificadas de duas formas:

- Naturais: são aquelas prontamente disponíveis no ambiente;
- Artificiais (externas): são aquelas geradas a partir de atividades humanas ou do sistema operacional, como máquinas industriais.

Na Figura 4, é apresentada a classificação geral das fontes de colheita de energia residual de alguns fenômenos recorrentes no ambiente ou de fontes externas (DEPEX, 2014; RUBIO, 2018).

**Figura 4** – Matriz energética *Energy Harvesting*.



Fonte: Adaptado de RUBIO (2018).

Como é possível observar, as fontes de colheita de energia são muito amplas, em diversas condições. Até o momento, os sistemas de *Energy Harvesting* mais comumente

relatados na literatura incluem a utilização do efeito fotovoltaico, na conversão de energia solar em energia elétrica; o efeito termoelétrico na conversão de gradientes de temperatura em eletricidade; e a transdução eletromecânica (piezoelétricos, geradores eletrostáticos e triboelétricos) na conversão de vibração mecânica em energia elétrica (BEEBY et al., 2013; PROBST et al., 2017; SAFAEI et al., 2019).

Tendo em vista o escopo desta monografia, será considerada apenas a conversão de energia via transdução eletromecânica usando, em especial, dispositivos piezoelétricos. Segundo os autores SAFAEI et al. (2019), a colheita de energia piezoelétrica rende níveis muito mais baixos de energia, algo em torno de  $\mu\text{W}$  à  $\text{mW}$ , frente outros *harvesters* como solar ou térmica. Contudo, isso não deve ser visto como um problema, pois deve-se estar atento ao fato de que fontes como energia solar e eólica, por exemplo, são fontes energéticas intermitentes, fazendo com que haja necessidade de operação desses sistemas de maneira complementar, mútua. Ou seja, em última análise, precisa-se de uma segurança energética renovável redundante.

### 3.5. POLÍMEROS PIEZOELÉTRICOS

Tendo em vista que neste estudo será empregado um dispositivo piezoelétrico adotado como “*Harvester*”, este tópico irá apresentar primeiramente a piezoeletricidade e materiais piezoelétricos, as equações constituintes do material e, por fim, o emprego de transdutores piezoelétricos em sistemas de conversão de energia cinética do vento em eletricidade.

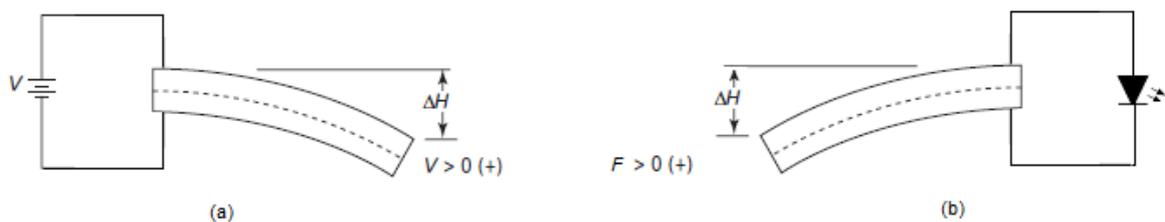
#### 3.5.1. PIEZOELETRICIDADE & MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

De acordo com UCHINO (2017), a origem da palavra “piezo” deriva do grego “*piézin*”, que significa “pressão”. Portanto, como muito bem colocado pelo próprio autor, o sentido propriamente dito da palavra “piezoelétrico”, de maneira implícita, faz menção a uma propriedade estritamente particular destes materiais: a “eletricidade da pressão”, ou como é mais conhecida, piezoeletricidade. Em termos gerais, a piezoeletricidade, ou efeito piezoelétrico, ocorre em materiais dielétricos cristalinos, os quais são formados por moléculas polares com uma estrutura sem um centro simétrico (KAO, 2004; ROCHA, 2014). Por esta razão, estes materiais eletroativos são capazes de tornar-se eletricamente polarizados quando

submetidos a estímulos físicos externos, tais como cargas, flexões e/ou torções (GUSAROV, 2015; ILIUK, 2016; KIEPPER, 2018). A amplitude e a frequência do sinal são diretamente proporcionais à deformação mecânica do material piezoelétrico.

Segundo SHEPELIN et al. (2019), quando um material piezoelétrico é mecanicamente tensionado um campo elétrico é induzido instantaneamente, paralelo à direção do vetor de polarização do material (Figura 5). Esse fenômeno é conhecido como efeito piezoelétrico direto (Figura 5.b) e se deve sua descoberta aos irmãos Curie (Pierre e Jacques Curie). Por outro lado, caso o mesmo material seja submetido a aplicação de um campo elétrico, a polarização induzida causará alterações na distribuição de cargas fazendo com que, por simples diferença de potencial (d.d.p.), a superfície exija uma tendência à migração dos elétrons através da carga para equilibrar a diferença de potencial entre os eletrodos, gerando uma tensão mecânica, expansão ou contração do material (CALLISTER et al., 2012; BEEBY et al., 2013; SOIN, 2018; SHEPELIN et al., 2019). Neste caso, estamos diante do chamado efeito piezoelétrico inverso (Figura 5.a), primeiramente demonstrado matematicamente em 1881, por Gabriel Lippmann e, logo em seguida, confirmado experimentalmente pelos irmãos Curie (ILIUK, 2016).

**Figura 5** – Esquema de representação do feito piezoelétrico (a) inverso, onde a aplicação de uma tensão elétrica ( $V$ ) causa a deformação material; e (b) efeito direto, no qual a deformação do material, causada por uma força externa qualquer ( $F$ ), gera uma tensão de saída.



Fonte: Adaptado do autor KAO (2004).

Em relação aos tipos de materiais piezoelétricos, os quais exibem o fenômeno pouco usual da piezoeletricidade, são materiais encontrados naturalmente (*in natura*) e os sintéticos. Dentre os que podem ser encontrados em sua forma natural, inclusive precursores das primeiras descobertas do fenômeno da piezoeletricidade, são citados minerais como cristais de quartzo, turmalina e sal de Rochelle (LOPES et al., 2014; SHEPELIN et al., 2019). Já a classe de piezo sintéticos são aqueles fabricados em laboratório, artificialmente. O desenvolvimento desses materiais artificiais se deu a partir da criação das cerâmicas piezoelétricas, na época motivado

pela necessidade de um novo sistema de segurança devido um trágico naufrágio envolvendo o famoso caso do navio Titanic, resultando assim, pouco tempo depois, no desenvolvimento do primeiro sonar (RUBIO, 2018). Assim, objetos sob a água podiam enfim ser detectados e sua posição determinada através de um sistema emissor e receptor ultrassônico a partir do efeito piezoelétrico (UCHINO, 2017). Nos eventos seguintes, com a ocorrência da primeira e segunda grandes Guerras, houve a criação de outros materiais piezoelétricos com características distintas, tais como (KAO, 2004; UCHINO, 2017):

- **Cerâmicos:** Transdutores de compressão. Exemplo: Titanato de Bário ( $\text{BaTiO}_3$ , BT) e Titanato Zirconato de Chumbo ( $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ , PZT);
- **Ferroelétricos:** Polarização espontânea que pode ser invertida com a aplicação de um campo elétrico externo. Exemplo: Niobato/Tantalato de Lítio ( $\text{LiNbO}_3/\text{LiTaO}_3$ , LN/LT);
- **Piroelétrico:** Indução de um potencial elétrico quando submetido a uma variação de temperatura;
- **Polímeros:** Transdutores de deformação e/ou flexão. Exemplo: Difluoreto de Polivinilideno ( $(\text{CH}_2\text{-CF}_2)_n$ , PVDF);
- **Compósitos:** Piezo-compósitos são aqueles materiais piezoelétricos adaptados com propriedades físicas desejáveis a partir da união de dois materiais como, por exemplo, cerâmicos e polímeros.

Informações mais detalhadas sobre as propriedades físicas destes materiais, dentre outras particularidades, podem ser acessadas através da leitura das obras dos autores KAO (2004), BOWEN et al. (2013), MARTINS (2014), GUSAROV (2015) e UCHINO (2017).

Mais recentemente, a utilização de dispositivos piezoelétricos cresceu consideravelmente em consequência do grande aumento na automatização e na atração de consumidores por aparelhos modernos e sofisticados (CALLISTER et al., 2012). Geralmente são encontradas aplicações que empregam estes materiais como transdutores, sensores, atuadores e, atualmente, como *harvesters* (HAMLEHDAR et al., 2017).

Para os autores LOPES et al. (2014), dentre todas as opções de materiais piezoelétricos, o que apresenta melhor desempenho na produção de energia são as piezo cerâmicas. No entanto, o seu tamanho e rigidez limitam o seu horizonte de aplicações à compressão, o que nos leva até os polímeros piezoelétricos. Estes, por sua vez, são considerados materiais de grande interesse

devido à alta flexibilidade do material, o que favorece aplicação em sistemas baseados na exploração da energia do movimento de fluídos como água e vento, fornecendo um horizonte muito maior de aplicações (OH et al., 2010; LOPES et al., 2014; SOIN, 2018; SHEPELIN et al., 2019).

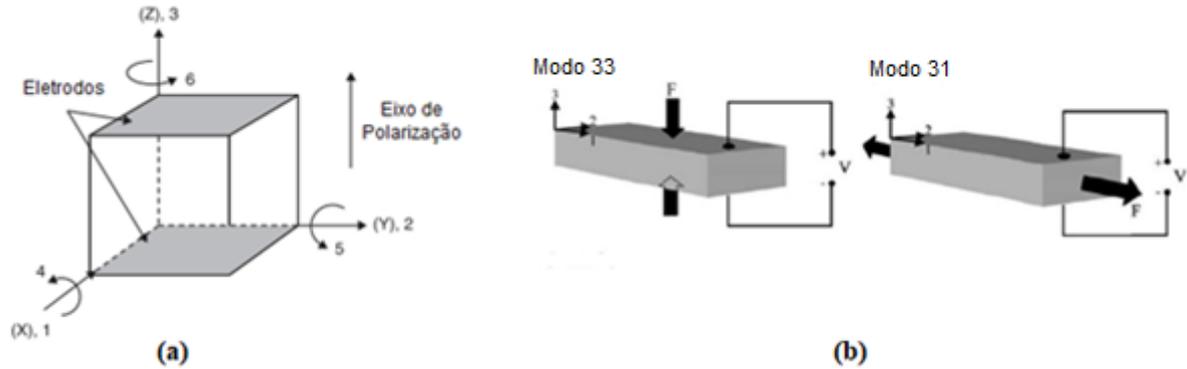
Em sistemas desse tipo, o objetivo primordial é aproveitar a energia mecânica das vibrações provenientes da interação entre fluido e algum tipo de estrutura acoplada junto a viga piezoelétrica como fonte de energia para alimentar um sistema de baixo consumo de energia (SHEPELIN et al., 2019). De acordo com BOWEN et al. (2013), para melhor compreender o funcionamento de um piezo-*harvester*, deve-se observar quatro pontos importantes: as características da fonte de energia; a forma como a energia é transferida da fonte para o *harvester* de energia; a conversão eletromecânica na transdução de energia; e como a energia é transferida do *harvester* de energia para a carga elétrica.

### 3.5.2. EQUAÇÕES CONSTRUTIVAS

Os materiais piezoelétricos são materiais anisotrópicos (ROCHA, 2014), o que significa que as propriedades desses elementos diferem em função da direção das forças, orientação da polarização e dos eletrodos, os quais são definidas por um sistema de símbolos e notações (BEEBY et al., 2013).

De um modo geral, para descrever os fenômenos piezoelétricos através das equações constituintes, muitos autores costumam considerar um sistema de coordenadas composto por três eixos (GUSAROV, 2015; SOIN, 2018; SHEPELIN et al., 2019). A ilustração deste sistema com a disposição dos eixos (tensores) é demonstrada na Figura 6.a. Observe que os eixos cartesianos "*x*", "*y*" e "*z*" são respectivamente representados por 1, 2 e 3, cujo os quais se referem ao eixo elétrico, enquanto que as torções e/ou rotações (eixo mecânico) em torno desses eixos são representados por 4, 5 e 6.

**Figura 6** – (a) Eixos de referência. (b) Modos de operação de um transdutor piezoelétrico. A grandeza  $F$  é a força aplicada e  $V$  é a tensão elétrica de resposta.



Fonte: Adaptado de (a) BEEBY et al. (2013) e (b) GUSAROV (2015).

O fenômeno do efeito piezoelétrico desses materiais acima descritos são transcritos por coeficientes direcionais que constituem um sistema de duas equações matemáticas. Sendo assim, o comportamento desses dispositivos é descrito através de parâmetros mecânicos e elétricos, os quais são componentes de tensores de diferentes ordens, como pode ser identificado abaixo (SHEPELIN et al., 2019):

$$S_p = s_{pq}^E T_q + d'_{ip} E_i \quad (1)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (2)$$

A Eq. 1 expressa a tensão mecânica ( $S$ ) como sendo proporcional ao produto da soma entre o estresse mecânico ( $T$ ) aplicado e o coeficiente de conformidade elástico ( $s^E$ ), acrescido do produto entre o campo elétrico ( $E$ ) e coeficiente de carga do efeito piezoelétrico inverso ( $d'$ ). Já a Eq. 2 denota o deslocamento elétrico ( $D$ ) como sendo proporcional ao produto da soma entre o estresse mecânico ( $T$ ) aplicado e o coeficiente de carga do efeito piezoelétrico direto ( $d$ ), somado ao produto entre o campo elétrico ( $E$ ) e a permissividade elétrica ( $\varepsilon^T$ ).

De acordo com SHEPELIN et al. (2019), nas expressões 1 e 2 os índices subscritos " $k$ " e " $i$ ", estão relacionados aos eixos 1, 2 ou 3, enquanto que " $p$ " e " $q$ " indicam os eixos e as rotações 1,2,3,4,5 ou 6.

Nesse sentido, é interessante ressaltar que para os coeficientes de carga do efeito piezoelétrico são comumente utilizados dois modos de operação na colheita de energia piezoelétrica,  $d_{33}$  e  $d_{31}$ , representado na Figura 6.b. Enquanto o modo  $d_{33}$  é mais apropriado para aplicações desses materiais como atuador, o modo  $d_{31}$  é usualmente empregado na

concepção de dispositivos baseados em vigas em balanço, ideal para sistemas de *energy harvesting* dado que a maior potência de saída pode ser alcançada determinando a frequência natural da estrutura (ROCHA, 2014), ou seja, quando o sistema entra em ressonância com a vibração devido a forças de excitação externa, como o próprio vento, por exemplo.

### 3.5.3. ENERGIA DO VENTO APARTIR DE COLETORES DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS INDUZIDAS

Quando se fala em energia eólica, é muito comum e perfeitamente normal que sejamos inclinados a nos remeter primeiramente aos modos de produção de energia tradicionalmente utilizadas como, por exemplo, as turbinas eólicas. Estas grandes obras da engenharia compõem um dos principais e mais antigos meios de produção de energia elétrica a partir de fontes sustentáveis de energia no mundo inteiro (FARIAS et al. 2011). No entanto, este tipo de sistema apresenta algumas limitações que, por vezes, acabam comprometendo a introdução dessas tecnologias em ambientes urbanos, principalmente por não haver a disponibilidade mínima necessária de grandes áreas e vento, além de gerar ruídos (DEIVASIGAMANI et al., 2014; MCCARTHY et al., 2016; MCCLOSKEY et al., 2017).

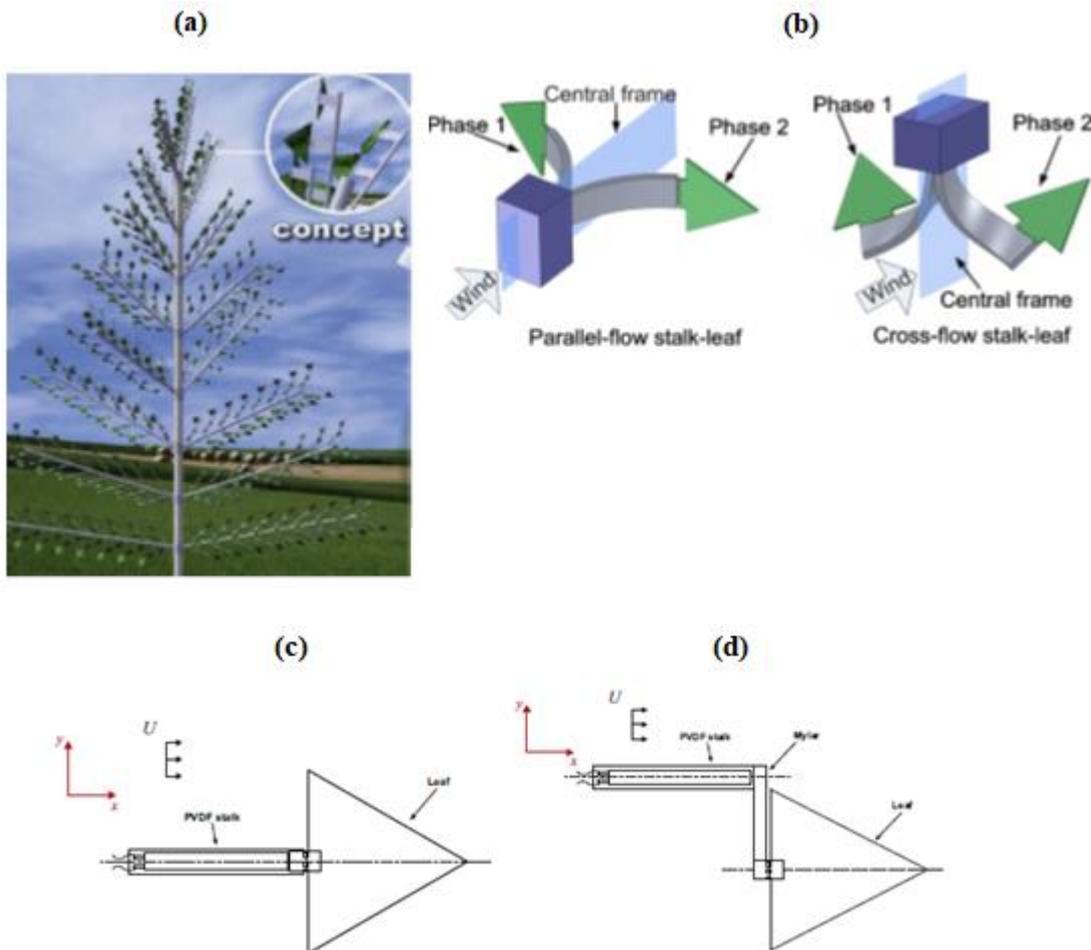
Para contornar este problema a utilização de materiais piezoelétricos surgiu como proposta alternativa em muitos projetos, passando a ser amplamente investigada em diversas publicações (MCCARTHY et al., 2015; HAMLEDAR et al., 2019; SHEPELIN et al., 2019; SAFAEI et al., 2019). Para DETANICO et al. (2010), a inspiração de muitos projetos parte da analogia direta com a natureza, seja nas áreas de engenharia, arquitetura, design, bem como em muitas outras áreas do conhecimento humano. À inspiração de projetos em analogia direta com a natureza, dá-se o nome de “Biomimética”.

Nesse sentido, a capacidade de inventar e inovar trouxe, também, uma nova possibilidade de se produzir energia de maneira harmoniosa com as formas e paisagens naturais do ambiente. De acordo com os autores MCCARTHY et al. (2016), um dos primeiros conceitos de vibrações a partir de folhas artificiais foi relatado por Richard Dickson em seu livro “*New Renewable Energy*”, onde propôs a construção de harvester em forma de árvore constituído em centenas de colheitadeiras piezoelétricas do tipo “caule da folha” (Figura 7).

Conforme os autores STAMATELLOU et al. 2018, ao tirar proveito do vento como fonte de energia em sistemas piezoelétricos baseados em vibrações induzidos por vórtices

(VIV) é desejável que se tenha um regime de fluxo turbulento, tendo em vista que nessas condições o vento carrega maior energia distribuída ao longo do fluxo. Além disso, segundo os autores, a interação do escoamento com a lâmina piezoelétrica acoplada a um corpo propicia a geração de um campo de deformação aleatório que, por sua vez, resulta em um estado de excitação/agitação do piezo, fazendo com que o material vibre e movimente-se aero elasticamente, resultando em uma corrente elétrica (MCCARTHY et al., 2016; HAMLEDAR et al.; 2019).

**Figura 7** – (a) Primeiro conceito de árvore a partir de materiais piezoelétricos. (b) (c) e (d) Primeiras folhas artificiais tipo caule piezoelétrico.



Fonte: Adaptado de (a) e (b) LI et al. (2009 e 2011), (c) e (d) DEIVASIGAMANI (2014).

Os autores LI et al. (2009) propuseram um gerador piezoelétrico semelhante a uma folha de árvore como *harvester* de energia eólica. O trabalho investigou os efeitos no posicionamento da haste piezoelétrica em relação à direção do fluxo de ar, ajustando um dispositivo de

escoamento paralelo e outro de escoamento cruzado, respectivamente (Figuras 7.b e 7.c). Além disso, os autores também testaram a influência de diferentes figuras geométricas, tais como triangular, quadrada, trapezoidal, entre outras feitas a partir de material flexível, anexando-as junto ao elemento transdutor piezoelétrico e verificando a capacidade de geração de energia. O estudo demonstrou melhores potência de saída com ventos de 6,5 m/s e uma resistência à carga de 1 M $\Omega$  no dispositivo de fluxo cruzado, chegando a valores máximos de 14  $\mu$ W, enquanto que o dispositivo de fluxo paralelo atingiu 3,5  $\mu$ W de potência máxima. Aumentando a resistência da carga para 10 M $\Omega$ , a potência máxima de saída obtida pelo dispositivo de fluxo cruzado foi otimizada, aumentando-a para 296  $\mu$ W na faixa de 8 m/s. Mais tarde, LI et al. (2011) investigaram os efeitos que geram melhores resultados na folha de escoamento cruzado e concluíram que esta configuração amplia a excitação do dispositivo essencialmente por causar deformações por flexão no material piezoelétrico, otimizando as saídas de potência.

Em um estudo similar, proposto por DEIVASIGAMANI (2014), foram também analisadas duas configurações (Figuras 7.a e 7.d), dentre as quais uma nova alternativa de fluxo cruzado, posicionando a haste piezoelétrica paralelamente ao fluxo e inserindo na extremidade livre do dispositivo, um filme de material plástico flexível verticalmente (cruzado) em relação à direção do escoamento (Figura 7.d), gerando assim modos de torção e flexão no dispositivo transdutor. Para uma faixa de velocidade do vento de 8 m/s, a máxima potência observada no estudo foi de 88,3  $\mu$ W, utilizando uma resistência à carga de 5,6 M $\Omega$ . O autor atribuiu aos efeitos combinados de torções e flexões o bom desempenho da folha artificial.

Um estudo experimental de um sistema de colheita de energia eólica inspirado na estrutura arquitetônica de árvore completa feita a partir de piezoelétricos foi feito por OH et al. (2010). O material PVDF foi empregado no elemento foliar, enquanto que o dispositivo PZT foi aplicado na base do tronco da árvore artificial, gerando modestas tensões de pico de 47 mV.

Recentemente, os autores MCCCLOSKEY et al (2017), propuseram um modelo de folhas piezoelétricas inspiradas em espécies de árvores nativas da América do Norte, chegando mais próximo ainda do formato de uma folha real. Uma tira laminada de PVDF servindo como caule foi anexada a uma lâmina plástica em forma de folha, simulando oscilações verificado no balanço das folhas de um lado para o outro. Os autores também construíram um projeto piloto de árvore artificial. A potência de saída de dez folhas artificiais com hastes de PVDF no vento natural varia de 0,15 a 165 $\mu$ W.

WANG et al. (2018) investigaram o efeito de contribuição por parte da adição de nervuras (veias) as folhas artificiais triangulares usando materiais piezoelétricos PVDF. Os resultados do estudo demonstraram que a potência de saída em folhas com veias são de 4 a 6 vezes mais altas do que em folhas sem veias. A máxima tensão de saída observada em circuito aberto chegou a 1,094 V para velocidade de 11 m/s.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. DESCRIÇÃO DOS MODELOS: FTI, FTL & FAI

O transdutor eletromecânico empregado nos *harvesters* bio-inspirados foi o sensor multiúso de detecção de impacto ou vibração mecânica PVDF LDT1-028K PIEZO SENSOR (MEAS TE connectivity) com 41,1 mm de comprimento, 16,26 mm de largura e 1,57 mm de espessura, laminado em uma folha de poliéster (*Mylar*). Na Tabela 1 estão disponibilizadas algumas informações gerais a respeito de propriedades típicas desse material, tais como densidade, constantes piezoelétricas, permissividade, entre outras.

**Tabela 1** – Propriedades típicas do material PVDF.

Propriedade	Unidade	Piezo PVDF
Densidade	$(10^3)$ kg/m <sup>3</sup>	1,78
Permissividade relativa	$\epsilon/\epsilon_0$	12
Constante $d_{31}$ e $d_{33}$	$(10^{-12})$ C/N	23 e -33
Constante $g_{31}$ e $g_{33}$	$(10^{-3})$ Vm/N	216 e -330
Constante $k_{31}$	% at 1 KHz	12
Impedância Acústica	$(10^6)$ kg/m <sup>2</sup> . s	2,7

Fonte: Adaptado de TE SENSOR SOLUTIONS.

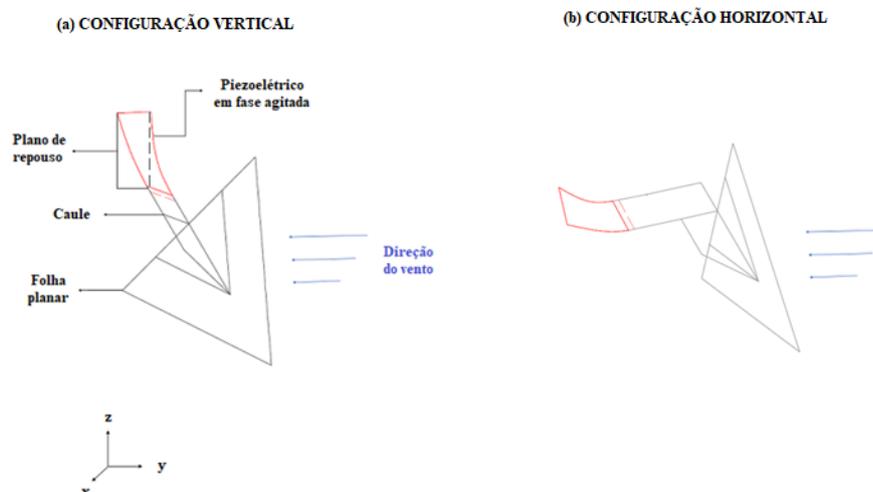
Os coeficientes piezoelétricos  $d_{n,m}$  e  $g_{n,m}$ , coeficientes de carga e voltagem, respectivamente, possuem dois subscritos. Como o filme piezo é fino, os eletrodos são aplicados apenas nas superfícies superior e inferior do filme. Já a constante  $k_{n,m}$ , é um número adimensional chamado de fator de acoplamento eletromecânico que relaciona a energia convertida de saída com a energia total de entrada, ou seja, é uma indicação direta da intensidade do efeito eletromecânico (ROCHA, 2012).

Para a confecção estrutural das folhas artificiais optou-se, por disponibilidade, pelo uso de um material plástico (acetato) flexível transparente com 0,25 mm de espessura. Embora nenhuma informação sobre as propriedades físicas e mecânicas desse material tenham sido obtidas, com alguns ensaios antecipadamente realizados em laboratório é possível afirmar que o mesmo apresenta características favoráveis para a abordagem de estudo, tais como flexibilidade e resistência a esforços mecânicos de baixa magnitude, os quais serão impostos às folhas artificiais em decorrência do movimento induzido pelo escoamento de ar.

A configuração tridimensional das folhas artificiais foi projetada com base no modelo desenvolvido pelo autor MCCLOSKEY et al. (2017), de maneira com que a membrana planar da folha artificial permanecesse perpendicular em relação ao caule folha e também em relação à direção do vento (Figura 8), com a premissa de impor movimentos combinados de torção e flexão a estrutura do elemento transdutor, uma vez que tal comportamento pode aumentar o potencial total de captação de energia (DEIVASIGAMANI, 2014). Para efeitos de comparação, três diferentes propostas de folhas artificiais foram avaliadas, ajustando a viga piezoelétrica paralelamente e perpendicularmente em relação à linha de fluxo do vento. Como o material PVDF é um elemento planar, dependendo do modo de vibração ou até mesmo o acoplamento entre os modos, pode causar haver redução ou aumento de eficiência, o que será investigado experimentalmente.

Em linhas gerais, a concepção final das folhas bio-inspiradas pode ser entendida através de dois elementos básicos que compõe os modelos: o primeiro consiste em uma determinada estrutura geométrica que simula a superfície foliar plana de uma folha real (triangular ou de folha real) de massa  $m$ , a qual está suspensa por uma das extremidades de maneira com que a área da folha permaneça disposta perpendicularmente à linha de ação do fluxo de vento, cuja extremidade oposta está fixa junto à haste do dispositivo, de comprimento  $5,5\text{ cm}$  (comprimento do piezoelétrico somado à extremidade do caule da folha), responsável por efetuar, de fato, a transferência direta dos esforços mecânicos ao transdutor eletromecânico, conforme ilustrado na Figura 8.

**Figura 8** – Diagrama esquemático do coletor de energia piezoelétrico oscilante. De maneira análoga ao pêndulo físico, a folha está livre para oscilar sobre o plano da seção de estudo, da esquerda para a direita em relação ao pelo plano de fase em repouso representado em (a) e (b).

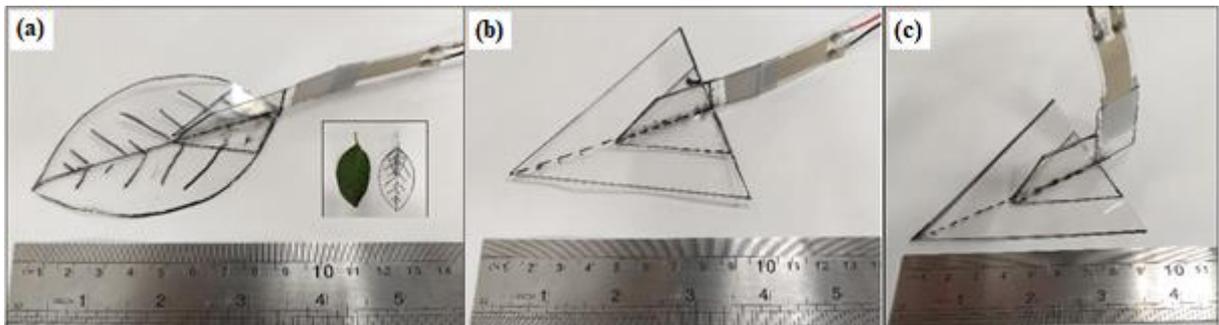


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Assim como outros autores também propõem, a geometria da membrana foliar artificial adotada para o estudo nos modelos FTI e FTL é triangular (LI et al., 2009, 2011; THORTON, 2011; DEIVASIGAMANI, 2014), com dimensões 8×8 cm, tendo em vista que esta arquitetura oferece maior vantagem no desempenho da captura de energia (LI et al., 2009; WANG et al., 2019). Por outro lado, o modelo FAI também traz um design um pouco mais interessante, rebuscado a partir da arquitetura de folhas reais (OH et al., 2010; MCCCLOSKEY et al., 2017), de aproximação mais sustentável, em harmonia com o ambiente.

Para obtenção desse resultado, o modelo FAI foi circunscrito a partir de uma folha real (Figura 9.a) selecionada e extraída de uma árvore comumente utilizada no paisagismo de muitas cidades brasileiras, denominada *Ligustrum japonicum* (ou Alfeneiro japonês). As dimensões do modelo são de 8 cm de comprimento para o raio maior e 4 cm de raio menor. Na Figura 9 é possível visualizar as folhas e, assim, ter uma ideia de proporção entre os modelos, bem como o efeito sobre a proposta alternativa de ajuste horizontal e vertical do PVDF.

**Figura 9** – Imagens em escala real dos modelos desenvolvidos, onde estão apresentados (a) FAI, (b) FTI e (c) FTL, respectivamente, acoplados ao transdutor piezoelétrico PVDF LDT1-028K.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Alguns autores utilizam uma dobradiça de articulação independente entre a membrana foliar e o elemento piezoelétrico, o que gera a possibilidade de múltiplos elementos vibratórios, como é o caso dos autores LI et al. (2009, 2011) e DEIVASIGAMANI (2014). Apesar disso, no presente estudo, optou-se por não fazer o uso deste artifício. Esta decisão teve como intuito principal preservar a integridade física do elemento piezoelétrico, já que em altas velocidades o uso desse mecanismo pode gerar um comportamento prejudicial ao material piezoelétrico, levando ao rompimento do transdutor (DEIVASIGAMANI, 2014).

Com objetivo de estabelecer informações um pouco mais particulares de cada uma das folhas artificiais, foi considerada a determinação da massa das estruturas. Nesse sentido, utilizou-se uma balança analítica (AD 500-R) com precisão de  $\pm 0,001\text{g}$ . Além disso, também considerou-se a estimativa da área foliar de cada modelo. Assim sendo, uma simples relação matemática foi usada para o cálculo da área da folha triangular dos modelos FTI e FTL, ao passo que para o modelo FAI, optou-se pela construção de um polígono circunscrito a partir de uma fotografia da superfície foliar, em escala 1:1, importando-a para o software AutoCAD (2017) para estimativa da área<sup>1</sup>.

Na Tabela 2 estão disponíveis as informações obtidas a respeito de cada um dos três modelos, tais como peso, a orientação do material PVDF e área foliar para cada um dos modelos.

**Tabela 2** – Informações gerais dos modelos FTI, FTL e FAI.

Identificação	Orientação do Piezo	Massa (g)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )
Folha Triangular em I (FTI)	Vertical	1,485	32,0
Folha Triangular em L (FTL)	Horizontal	1,567	32,0
Folha Artificial em I (FAI)	Vertical	1,342	32,0

Elaborado pelo autor, 2019.

Note que ambas as folhas FTL e FTI apresentam maior peso em relação ao modelo FTA. Enquanto a área foliar superficial dentre os modelos são exatamente as mesmas.

#### 4.2. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

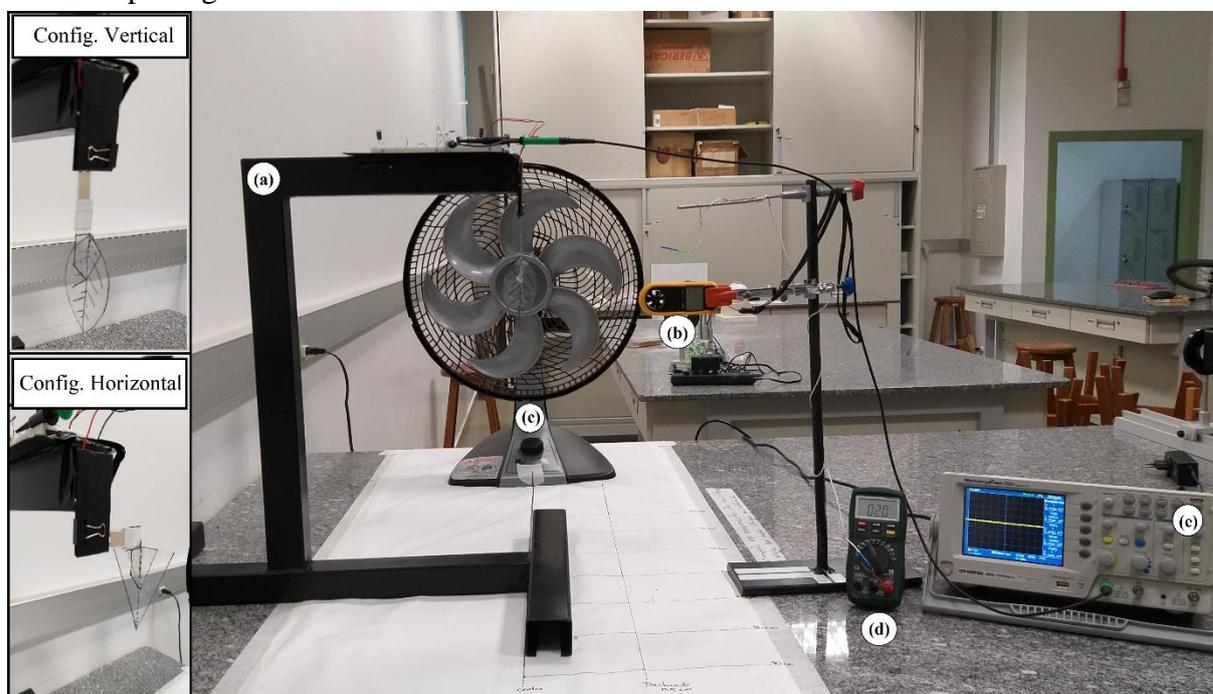
Os experimentos foram inteiramente conduzidos em bancada, no Laboratório de Eletromagnetismo da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Cerro Largo - RS. Devido às condições limitadas do estudo como, por exemplo, não dispor de um túnel de vento, fez-se necessária a adaptação do experimento com o emprego de um ventilador eletrodoméstico (OH et al., 2010) de 40 cm de diâmetro, seis hélices e modos de operações opcionais com três velocidades. Esta medida, além de atender à necessidade do estudo proposto, pode ser assumida como uma abordagem alternativa de estudo.

<sup>1</sup> No apêndice estão disponibilizados os pontos para construção e cálculo da área do modelo FAI no Excel.

Com o intuito de agregar maior credibilidade à metodologia de estudo, as velocidades obtidas pelo ventilador foram varridas e antecipadamente caracterizadas em sete pontos distintos ao longo da seção experimental em função da distância do ventilador através de uma análise de regressão linear. Dessa forma, sete seções experimentais foram devidamente demarcadas sobre a bancada (Figura 10), deslocando um pórtico móvel de metal sobre um segmento de reta traçado em relação ao centro de eixo do ventilador.

A velocidade do vento foi monitorada instantaneamente durante todo experimento utilizando um anemômetro digital de mão (NTC-10) apoiado em um suporte universal. Da mesma forma, a temperatura do ar foi mantida constante à 20°C e acompanhada com um multímetro digital (MD-6160) configurado em modo TEMP. As folhas foram montadas em uma base sólida, localizada na parte superior do pórtico utilizando uma chapa de alumínio devidamente isolada usando fita isolante cor preta (Enerbras, PVC), presa por um acessório “prendedor” com saídas para os dois fios do sensor, como pode ser visto na Figura 10.

**Figura 10** – Configuração experimental e equipamentos utilizados, tais como: (a) pórtico de metal, (b) anemômetro, (c) ventilador eletrodoméstico, (d) multímetro em modo TEMP e (e) osciloscópio digital.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os sinais de tensão foram registrados por um osciloscópio digital (GDS 1000 A) com os terminais de prova conectados a uma resistência de  $5,6 \text{ M}\Omega$  em série com o PVDF montados em uma protoboard (BB-2T1D Bread board) mantida fixa junto à parte superior do pórtico.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES OBTIDAS PELO VENTILADOR ELETRODOMÉSTICO

Afim de ampliar as faixas de velocidades do presente estudo para além dos três ajustes operacionais disponibilizados pelo ventilador eletrodoméstico, algumas condições pré-experimentais foram devidamente adaptadas e antecipadamente determinadas para efeito de validação da metodologia. Por esta razão, considerou-se uma análise de correlação linear das velocidades obtidas pelo equipamento em diferentes distâncias, com as seguintes ponderações:

- Durante o procedimento experimental de validação e estudo o ventilador eletrodoméstico foi mantido fixo, de modo que o fluxo de ar produzido pelo equipamento atuasse como um soprador sobre a seção experimental estudada;
- Um eixo em relação ao centro de diâmetro do ventilador foi tomado como referência para o deslocamento longitudinal do pórtico de metal ao longo das seções experimentais, devidamente demarcadas;
- Sete pontos (seções experimentais) foram definidos ao longo do eixo de referência, considerados a partir de 30 cm de distância do ventilador, com intervalos subsequentes de espaçamento de 10 cm entre si até completar a distância de 90 cm, varrendo diferentes faixas de velocidade ao longo da bancada.

Sendo assim, é possível identificar na captura de imagem da Figura 11 a perspectiva com vista superior da bancada experimental, onde fica mais fácil de compreender o resultado final das seções experimentais estabelecidas, bem como as condições estabelecidas acima.

**Figura 11** – Vista superior da bancada experimental juntamente com as demarcações das seções de estudo a partir da distância (cm) do ventilador eletrodoméstico.

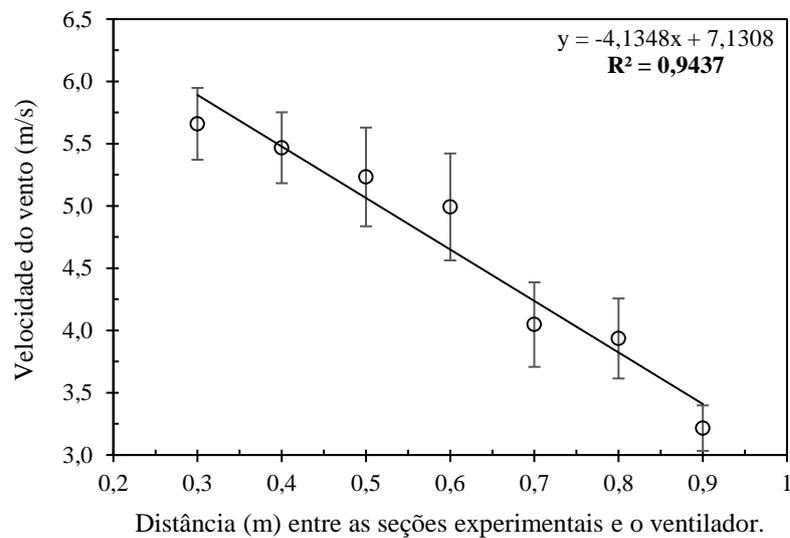


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

As velocidades foram avaliadas ao longo dos sete pontos utilizando um anemômetro digital (MDA-20), com ambiente de laboratório mantido nas mesmas condições experimentais de temperatura à 20°C. O uso do anemômetro digital permite a importação da leitura de dados em um arquivo *csv*. Desse modo, foram registradas 4.000 medidas durante um regime de 1.000 s (16 min. e 40 s) para então posterior cálculo das respectivas velocidades médias em cada ponto.

Sendo assim, as velocidades médias calculadas foram plotadas em função da distância do ventilador, conforme pode-se ver no Gráfico 2. Pode-se observar que as velocidades apresentaram comportamento muito próximo ao linear para distâncias entre 0,3 a 0,6 m, enquanto que nas seções experimentais mais distantes, entre 0,7 a 0,9 m, verificou-se algumas flutuações nas velocidades médias registradas, o que já era de se esperar, uma vez que não se têm, de fato, um túnel para o controle do escoamento de ar e não haja dispersão do vento.

**Gráfico 2** – Distribuição das velocidades em função da distância entre o ventilador eletrodoméstico e a seção experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

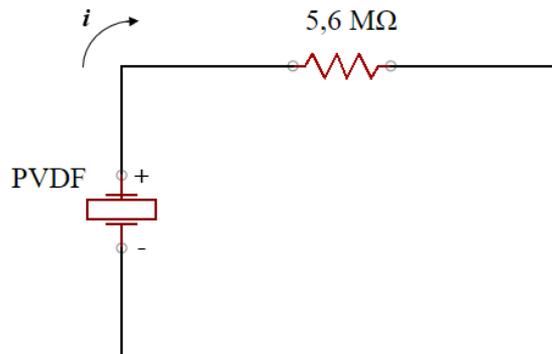
Apesar de tudo, assumiu-se que tais flutuações observadas nas seções experimentais mais distantes não comprometem significativamente a metodologia alternativa adotada, pois percebe-se uma correlação linear ( $R^2$ ) suficientemente boa, com 94% de confiança, a ponto de validar a proposta do estudo em diferentes distâncias para ampliação da faixa de velocidades.

Portanto, com a caracterização das velocidades do vento, o intervalo de velocidade investigado no presente estudo compreende uma velocidade mínima de 3,22 m/s e máxima de 5,66 m/s, estando dentro da faixa investigada pela literatura (LI et al., 2009, 2011; THORTON, 2011; DEIVASIGAMANI, 2014).

## 5.2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E POTÊNCIA OBTIDA

Afim de investigar o desempenho das folhas anexadas ao dispositivo PVDF, os terminais de tensão do transdutor foram conectados em série junto a um resistor de 5,6 M $\Omega$  montado em uma protoboard fixa junto ao pórtico metálico móvel. Na Figura 12 é apresentado o diagrama esquemático do circuito utilizado.

**Figura 12** – Circuito elétrico utilizado para a determinação da potência alcançada pelos modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os picos de tensão foram registrados por um osciloscópio de armazenamento digital (GDS 1000 A). Em cada seção experimental foi considerado um tempo mínimo de aproximadamente um minuto visando garantir o atingimento de saídas de tensão mais regulares, ou seja, para o registro de medidas que fossem de fato representativas em cada situação. Os experimentos foram realizados em triplicata para cada um dos modelos, presando pela confiabilidade nos resultados obtidos.

A tensão eficaz ( $V_{RMS}$ ), de CA foi mensurada instantaneamente com a sonda do osciloscópio conectada a uma resistência à carga ( $R$ ) de  $5,6\text{ M}\Omega$ . Para a determinação da potência média de saída obtida foi considerada a seguinte equação (LI et al., 2009, 2011; THORTON, 2011; DEIVASIGAMANI, 2014; ORREGO et al., 2017):

$$P_{ot} = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (3)$$

As formas de onda de tensão obtidas pelo transdutor piezoelétrico estão apresentadas no Gráfico 3, para as três folhas e em diferentes faixas de velocidade. Tanto a frequência quanto a tensão de pico aumentaram com a velocidade do vento. Nas configurações FAI e FTI, a manifestação sobre o comportamento dos modelos está relacionada, principalmente, ao padrão oscilatório do elemento transdutor piezoelétrico, caracterizado pela variação da amplitude do movimento lado a lado de flexões no material em função do aumento da velocidade do vento tanto em baixas (3,22 m/s), como também em médias e altas velocidades (4,99 – 5,66 m/s), refletindo assim num gradual aumento nas saídas de tensão, veja os Gráficos (3.a) e (3.b). É

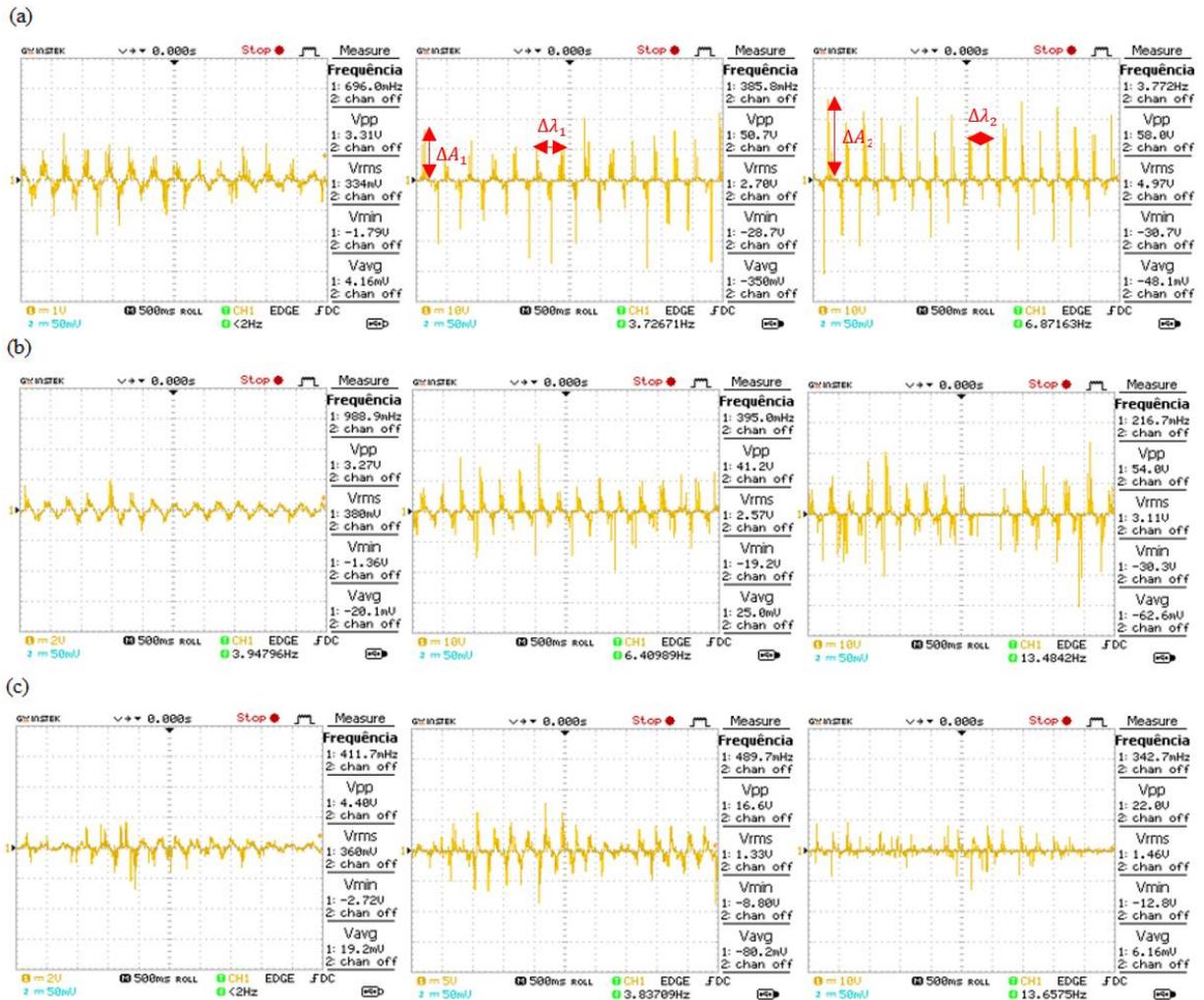
importante salientar a observação de um comportamento de ordem um pouco mais caótica em altas velocidades. Uma provável razão disso, pode estar relacionado à interação da estrutura tridimensional com o fluxo do ar, a qual pode ter sido responsável por gerar vórtices induzidos (LI et al., 2011; DEIVASIGAMANI, 2014), refletindo na flexão do material.

As tensões máximas de pico ( $V_{pp}$ ) observadas foram na ordem de 58,0 V para o modelo FAI e 54,0 V para o modelo FTI. Muito embora no modelo FTL também tenha sido observado um modesto comportamento oscilatório, evidentemente os resultados foram mais baixos (Gráfico 3.c). Não apenas por consequência de oscilações de baixa amplitude, mas principalmente em decorrência de uma ligeira tendência identificada de movimentos preferenciais a partir de médias e altas velocidades que levaram à flexão do elemento piezoelétrico, comprometendo assim o comportamento oscilatório. Tal fato pode ser atribuído ao arrasto provocado pela ação do vento sobre a folha, já que neste caso o posicionamento do material PVDF está ajustado tal como um aríete, por assim dizer, contra a corrente de ar. Nesse caso, a tensão máxima de  $V_{pp}$  registrada para o modelo FTL foi de apenas 22,0 V.

De maneira geral, o experimento indicou que ambos os modelos FAI e FTI são muito mais suscetíveis a oscilações mecânicas induzidas pela ação do vento, o que não significa dizer que eles sejam também mais sensível a interação com o fluxo de ar, levando em consideração que a folha FTL flexionou-se muito facilmente com magnitudes de vento um pouco mais baixas.

O Gráfico 3, por sua vez, reflete muito bem o comportamento identificado nos modelos em resposta aos estímulos físicos impostos pela energia cinética do vento. Em geral, com o aumento da magnitude do fluxo de vento o comportamento oscilatório nas folhas aumentou proporcionalmente, garantindo picos de tensão mais estridentes e acentuados para as folhas FAI e FTI, com boas saídas de  $V_{RMS}$  de 4,97 e 3,11 V, respectivamente. Note que a medida em que a velocidade do vento aumenta, verifica-se uma variação tanto amplitude do sinal ( $\Delta A$ ) quanto na comprimento do sinal ( $\Delta \lambda$ ), gerando maior densidade nos picos de tensão. Enquanto que, nas mesmas condições, o modelo FTL apresentou pouca afinidade a movimentos oscilatórios, o que levou a resultados pouco expressivos de 1,46 V.

**Gráfico 3** – Padrões de tensão observados quando o vento sopra em velocidades de 3,22, 4,99 e 5,66 m/s, respectivamente, de acordo com os modelos (a) FAI, (b) FTI e (c) FTL.



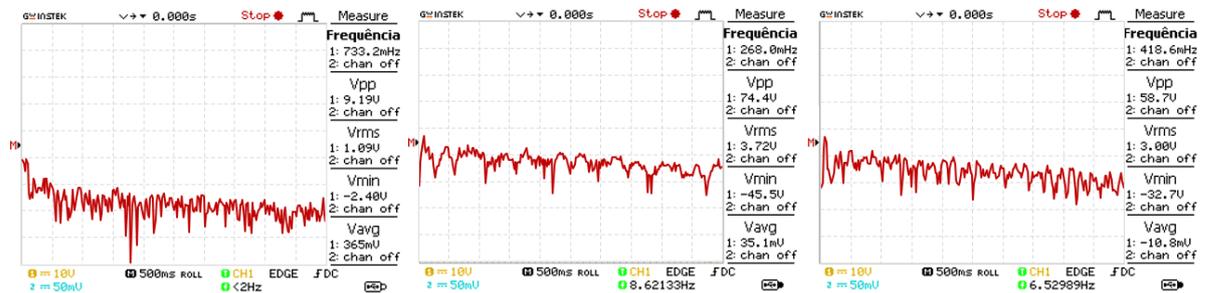
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Visualmente, pode-se dizer que o gráfico acima traz também um espectro dos sinais de tensão que apresenta instantes de turbulência, principalmente na medida em que a velocidade aumenta, gerando assim uma distribuição com padrão irregular, aleatório, podendo relacionar esse comportamento com o movimento caótico do sistema, caracterizado pela distribuição não constante das amplitudes de tensão elétrica.

Como pode ser visto, existem diferenças quanto ao período de vibração e amplitude dos sinais de tensão. A amplitude de oscilação de tensão é relativamente constante em baixa velocidade. Por outro lado, as oscilações tornam-se um pouco mais caóticas e, por vezes, instáveis em velocidades mais altas, mas sem comprometer as saídas de  $V_{RMS}$ .

Em um sistema periódico puro, por exemplo, além da amplitude do sinal ser periódico, o mesmo apresentaria apenas um pico na transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*). Nesse sentido, as formas de onda de tensão obtidas pelo modelo FTI foram analisadas, a título de exemplo, através da função matemática FFT disponível no osciloscópio digital, como pode ser observado no gráfico abaixo.

**Gráfico 4** – Sinais de FFT observados para faixa de velocidades de 3,22, 4,99 e 5,66 m/s, respectivamente, para o modelo FTI.

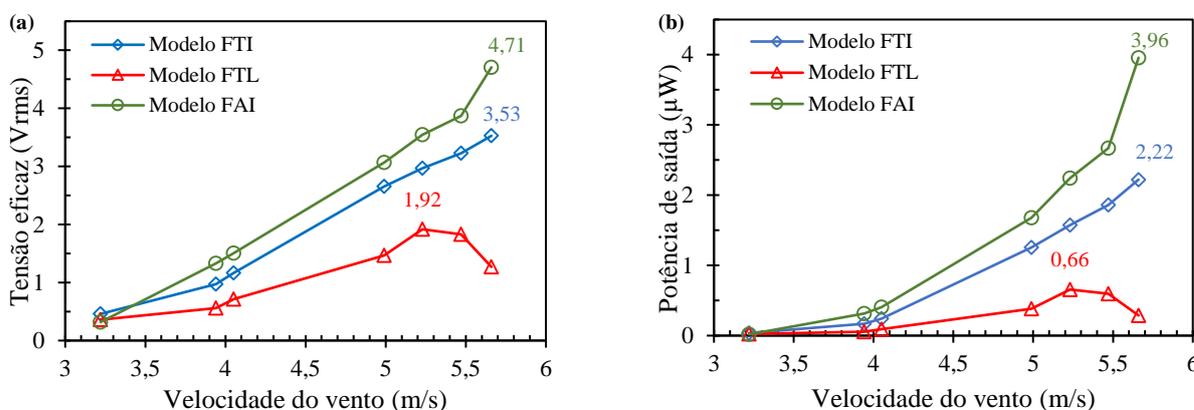


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

De acordo com LI et al. (2009), as frequências de vibração induzidas pelo vento em coletores piezoelétricos estão em torno de 3 a 10Hz, algo entre 2 a 8 m/s. Visualmente, no Gráfico 4, o espectro de Fourier também demonstra um comportamento caótico do modelo, confirmando a hipótese feita anteriormente. Na fase inicial, em velocidades mais baixas, a energia ficou concentrada em uma banda de frequências menores do que 2 Hz. Quando a velocidade aumentou, a frequência alterou-se para faixas maiores, atingindo entre 6 a 8 Hz.

Na sequência, conforme mostrado nos Gráficos 5 (a) e (b), são apresentados os dados das tensões  $V_{RMS}$  médias de saída, bem como as respectivas potências calculadas em função da velocidade do vento.

**Gráfico 5** – (a) Tensão eficaz em função da velocidade do vento e (b) potência de saída em função da velocidade do vento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os resultados apresentados acima mostram a capacidade dos modelos na conversão de energia ao serem submetidos perpendicularmente às forças atuantes do vento, caracterizando a habilidade do sistema na colheita de energia. Os modelos FAI e FTI mostraram um aumento constante e substancial em resposta ao aumento de velocidade, os quais foram responsáveis por impor maiores níveis de excitação ao transdutor piezoelétrico, devido à grande agitação gerada. A máxima tensão observada foi de 4,70 e 3,52V para os modelos FAI e FTI, o que corresponde à 3,96 e 2,23 µW, respectivamente. De maneira análoga, o modelo FTL apresentou um aumento menos expressivo no seu poder de conversão de energia com o aumento da velocidade do vento. Além disso, quando a velocidade atingiu uma faixa de 5,47 m/s, um limite máximo de desempenho foi identificado onde as respostas dos sinais de tensão e potência foram atenuadas. No seu melhor desempenho, foram observadas uma tensão de 1,92 V e 0,66 µW no modelo FTL.

Assim como constatado em outros estudos, a proposta de folha com haste vertical mostrou-se mais suscetível ao escoamento e, por consequência disso, gerou resultados mais satisfatórios frente ao ajuste horizontal do dispositivo. Os modelos FAI e FTI foram ajustados intencionalmente de maneira com que o padrão comportamental sobre as folhas fosse semelhante ao percebido em um pêndulo físico, o que garantiu bons resultados, sugerindo que folhas com caule piezoelétrico vertical são mais adequadas na conversão de energia eólica. Outro fator, como menor peso, também deve ser considerado, já que o modelo FAI obteve os melhores resultados e possui o menor peso dentre os modelos.

Na Tabela 3 estão reunidos os melhores resultados alcançados por alguns autores de acordo com o dispositivo piezoelétrico adotado, configuração proposta e faixa de velocidade

avaliada, para que possamos fazer um comparativo entre resultados no presente estudo e demais autores.

**Tabela 3** – Resumo dos resultados obtidos pelos principais autores, comparando-os com os resultados da literatura.

Autor	Dispositivo	Transdutor	Dimensão (mm)	Velocidade (m/s)	Tensão (V <sub>RMS</sub> )	Potência máxima
OH et al (2009)	Piezo viga incorporada ao troco	PZT	57,2×31,8×0,0018	-	2,04	2,24 μW
	Piezo viga incorporada à folha	PVDF	170×21,0×0,205			4 μW
LI et al. (2009)	Caule – Folha	PVDF	41×16,0×0,205	0 a 8	-	296 μW
			72×16×0,205		-	76 μW
DEIVASIGAMANI (2014)	Caule - Folha	PVDF	72×16×0,205	3 a 8	-	88,3 μW
GAO et al. (2011)	Piezo viga c/ extensão cilíndrica	PZT	31×10×0,075	2 a 10	4,3	3,5 μW
SUNDARARAJAN et al. (2012)	Piezo viga c/ extensão retangular	MFC	25,4×12,7×0,180	3 a 8	2,5	-
ORREGO et al. (2017)	Bandeira invertida	PVDF	60×120×0,2	2 a 9	-	5 mW
MCCLOSKEY et al. (2017)	Caule – Folha	PVDF	61,5×12,2×0,205	2 a 15	-	165 μW
WANG et al. (2018)	Veias incorporadas à folha	PVDF	0,028 – 0,11 (espessura)	6 a 10	-	0,457μW
NASCIMENTO (2019)	Caule – Folha	PVDF	41×16,0×0,157	3,22 a 5,66	4,71	3,96 μW

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A Tabela 3 nos revela que os resultados alcançados no presente estudo ficaram muito próximos aos alcançados por alguns autores, chegando a superá-los, como é o caso de OH et al (2009), GAO et al. (2011), SUNDARARAJAN et al. (2012) e WANG et al (2018). Por outro lado, ainda muito distante dos resultados obtidos por LI et al. (2009), DEIVASIGAMANI (2011), MCCLOSKEY et al. (2017). É evidente que alguns fatores inerentes das condições limitadas de estudo podem ter levado a resultados um pouco mais modestos, levando em conta a faixa de velocidades de estudo relativamente limitada e a não determinação da resistência à carga ótima para o circuito empregado, fatores esses que podem vir a ser considerados em estudos futuros.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, o estudo apresentou três propostas de folhas *harvesters* de energia piezoelétrica a partir de vibrações mecânicas induzidas pela energia cinética do vento. A disposição do elemento planar das folhas artificiais foi ajustada de forma cruzada em relação a esteira de vento, fazendo com que o dispositivo transdutor eletromecânico anexado ao caule dos modelos oscilasse de um lado para outro, tal qual um pêndulo físico. Uma investigação de correlação entre magnitude do vento e potência de saída foi conduzida para avaliar a capacidade de conversão de energia e o desempenho entre os três modelos. Curiosamente, o modelo artificial com características morfológicas de uma folha real se saiu melhor do que as folhas com geometria triangular, o que pode conduzir futuros estudos a investigar quais estruturas de folhas reais se saem melhor na captura de energia. De modo geral, os modelos mostraram habilidade na conversão de energia eólica, sobretudo os modelos FAI e FTI.

A máxima tensão efetiva observada no estudo foi registrada pelo modelo FAI, com 4,71 V de tensão e uma potência de saída de  $3,96 \mu\text{W}$  em uma faixa de velocidade do vento de 5,66 m/s. Por outro lado, o modelo FTL apresentou resultados pouco expressivos, na ordem de 1,92 V e  $0,66 \mu\text{W}$  de tensão e potência, respectivamente, além de diminuir a potência de saída a partir de 5,23 m/s à medida que a velocidade do vento aumentou. Para melhorar o desempenho do modelo acredita-se que, neste caso, a opção por cerâmicas piezoelétricas seja o mais adequado, já que este é um material mais rígido e resistente a esforços mecânicos.

Estudos futuros podem ser conduzidos com o intuito de avaliar o desempenho das folhas em uma faixa de velocidades mais abrangente e investigar a existência, ou não, de um limite máximo de velocidade a partir da qual as folhas podem perder boa desenvoltura, assim como outros autores relataram (LI et al., 2009 e 2011). Nesse sentido, a utilização de um túnel de vento torna-se uma opção indispensável em experimentos futuros. Além disso, uma investigação analítica da frequência natural do sistema seria interessante, o que abriria caminhos para otimização da coleta de energia com o dispositivo piezoelétrico. Como o transdutor PVDF é um material planar, dependendo do modo de vibração ou até o acoplamento entre os modos, pode haver ineficiência ou ganho de energia.

## 7. REFERÊNCIAS

ANTUNES, E. de G.; SOUSA, M. N.; SCHERTEL, M. N. da C. **Piso que transforma energia mecânica em eletricidade**. 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/projenergia3/projetos/trabalhos-2014/trabalhos-2014-2/GRUPOH.pdf>> Acesso em: 27 de abril de 2019.

ASSIREU, A. T.; PIMENTA, F.; FILHO, G. L. T.; JÚNIOR, R. M.; NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S. **Capítulo 9 - Fontes Alternativas de Energia**. 2015, Ciências Ambientais para Engenharia. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978853527739500009X>>. Acesso em: 09 de ago. de 2019.

BALETA, J.; MIKUL, H.; KLEME\_S, J. J.; URBANIEC, K.; DUI\_C, N. **Integration of energy, water and environmental systems for a sustainable development**. Journal of Cleaner Production 215, p.: 1424-1436, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619300411>>. Acesso em: 22 de ago. De 2019.

BEEBY, S. P.; CAO, Z.; ALMUSSALLAM, A. **Kinetic, thermoelectric and solar energy harvesting technologies for smart textiles**. 2013, Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers, p.: 306–328. Disponível em: <10.1533/9780857093530.2.306>. Acesso em: 06 de out. de 2019.

BOWEN, C. R.; KIM, H. A.; WEAVER, P. M.; DUNN, S. **Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications**. 2013, Energy & Environmental Science. Disponível em:< 10.1039/c3ee42454e >. Acesso em: 13 de ago. de 2019.

BP, British Petroleum. **Statistical Review of World Energy**. 2019, ed. 68. Disponível em:<<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>>. Acesso em: 25 de ago. de 2019.

CHEN, B.; XIONG, R.; LI, H.; SUN, Q.; YANG, J. **Pathways for sustainable energy transition**. Journal of Cleaner Production 228, p.: 1564-1571, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619314738>>. Acesso em: 22 de ago. de 2019.

DANG, N.; BOZORGZADEH, E.; VENKATASUBRAMANIAN, N. **Energy Harvesting for Sustainable Smart Spaces**. 2012, Advances in Computers Volume 87, 203–251. Disponível em: <doi:10.1016/b978-0-12-396528-8.00006-7>. Acesso em: 11 de out. de 2019.

DANTANICO, F.B.; TEIXEIRA, F.G.; SILVA, T.K. **A Biomimética como Método Criativo para o Projeto de Produto**. Design & Tecnologia, 2010. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/52/33>>. Acesso em: 04 de set. de 2019.

DEIVASIGAMANI, Arvind. **Piezoelectric energy harvesting from wind-induced flutter**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering College of Science, Engineering and Health RMIT University Melbourne, Australia.

DEIVASIGAMANI, Arvind; MCCARTHY, Jesse M.; JOHN, Sabu; WATKINS, Simon; TRIVAILO Pavel; COMAN, Floreana. **Piezoelectric Energy Harvesting from Wind Using Coupled Bending-Torsional Vibrations**. Modern Applied Science; Vol. 8, 2014. Disponível em: <10.5539/mas.v8n4p106>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. 2019, Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>>. Acesso em: 25 de ago. de 2019.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção de demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026)**. Estudos da Demanda, Rio de Janeiro 2017. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao245/topico261/DEA%200001\\_2017%20%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026\\_VF\[1\].pdf](http://epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao245/topico261/DEA%200001_2017%20%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf)>. Acesso em: 14 de out. de 2019.

FARIAS, Leonel M.; SELLITTO, Miguel A. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras**, Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011. Disponível em: <[http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista\\_SIER/v.%2012,%20n.%2017%20\(2011\)/1.%20Uso%20da%20energia%20ao%20longo%20da%20hist%F3ria.pdf](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2012,%20n.%2017%20(2011)/1.%20Uso%20da%20energia%20ao%20longo%20da%20hist%F3ria.pdf)>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

FEIL, A. A.; SCHREIBER, D. **Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados**. Cadernos EBAPE.BR, v. 14, n° 3, p.: 667 – 681, 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cebape/v15n3/1679-3951-cebape-15-03-00667.pdf>>. Acesso em: 25 de set. de 2019.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Livros Técnicos e Científicos Ltda. – LTC, ed. 7ª 2011, p.: 395-396.

GAO, X.; SHIH, W.; SHIH, W. Y. **Flow Energy Harvesting Using Piezoelectric Cantilevers with Cylindrical Extension**. 2011, IEEE Xplore Digital Library, v. 60. Disponível em: <10.1109/TIE.2012.2187413>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

GSR, Global Status Report. **Renewables 2019 Global Status Report**. Disponível em: <[https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2019\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf)>. Acesso em: 11 de out. de 2019.

GUSAROV, B. **PVDF polymères piézoélectriques: caractérisation et application pour la récupération d'énergie thermique**. 2015. Tese (Doutorado) – Université Grenoble Alpes.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da física: Gravitação, ondas e termodinâmica**. Vol. 2, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda – LTC, 2012, pág.: 95 – 99.

HAMLEHDAR, M.; KASAEIAN, A.; SAFAEI, M. **Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: A critical review**. 2019, Renewable Energy. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.078>>. Acesso em: 12 de ago. de 2019.

HARARI, Yuval N. **Sapiens: A Brief History of Humankind**. New York :Harper, 2015.

ILIUK, Itamar. **Análise de um sistema de captura de energia piezoelétrico não linear e não ideal utilizando-se uma estrutura aporticada**. 2016. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

IN, V.; PALACIOS, A. **Symmetry in Complex Network Systems**. Understanding Complex Systems, 2018. Disponível em: <[doi:10.1007/978-3-662-55545-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55545-3)>. Acesso em: 15 de out. de 2019.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Desafios da Nação**. 2018, vol. 1. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/180327\\_desafios\\_da\\_nacao.pdf](http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/180327_desafios_da_nacao.pdf)>. Acesso em: 26 de ago. de 2019.

KAO, Kwan C. **Ferroelectrics, Piezoelectrics, and Pyroelectrics**. 2004, Dielectric Phenomena in Solids With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes, Pages 213-282. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123965615500141>>. Acesso em 14 de ago. de 2019.

KIEPPER, H. P. **Análise de um sistema piezoelétrico de colheita energética de vibrações de estruturas aeronáuticas geradas por rajadas de vento**. Tese (TCC) - UFRJ/ Escola Politécnica/Curso de Engenharia Mecânica, 2018.

KU, M.; LI, W.; Chen, Y.; MEMBER, S.; LIU, K. J. R. **Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges**. 2016, Communications Surveys & Tutorials, p.: 1384–1412. Disponível em: <[10.1109/COMST.2015.2497324](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2497324)>. Acesso em: 05 de out. de 2019.

KUROCHKIN, D.; SHABLIY, E. V.; SHITTU, E. **Renewable Energy: International Perspectives on Sustainability**. Palgrave Macmillan, 2019. Disponível em: <[doi:10.1007/978-3-030-14207-0](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14207-0)>. Acesso em: 15 de out. de 2019.

LI, Dong J.; HONG, Seungbum; GU, Shiyuan; CHOI, YoonY.; NAKHMANSON, Serge; HEINONEN, Oille; KARPEEV, Dmitry; NO, Kwangsoo. **Polymer piezoelectric energy harvesters for low wind speed**. Applied Physics Letters, 2014. Disponível em: <[10.1063/1.4861187](https://doi.org/10.1063/1.4861187)>. Acesso em: 01 de jun. de 2019.

LI, Jinhui; ZENG, Xianlai; STEVELS, Ab. **Ecodesign in Consumer Electronics: Past, Present, and Future**. 2014, Journal Critical Reviews in Environmental Science and

Technology, v. 45. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.900245>>. Acesso em 23 de set. de 2019.

LI, S.; LIPSON, H. **Vertical-stalk flapping-leaf generator for wind energy harvesting.** In: ASME Conference on Smart Materials. Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS, September 21-September 23, Vol. 2, American Society of Mechanical Engineers, 2009. Disponível em: <10.1115/smasis2009-1276>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

LI, S.; YUAN, J.; LIPSON, H. **Ambient wind energy harvesting using cross flow fluttering.** *Journal of Applied Physics*, 109(2), 2011 Disponível em: < <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3525045>> Acesso em: 06 de abr. de 2019.

LOPES, A.C.; MARTINS, P.; MENDEZ, S. L. **Polímeros piezoelétricos: caraterísticas, aplicações, perspctivas.** Publicado e gazeta de física, 2014. Disponível em: <<https://www.spf.pt/magazines/GFIS/115/article/937/pdf>> Acesso em 06 de abr. de 2019.

MANYALA, R. O. **Energy Harvesting.** Intech Open, 2018. Disponível em: < <https://www.intechopen.com/>>. Acesso em: 22 de nov. de 2019.

MARQUES, A. C.; FUINHAS, J. A.; TOMÁS, C. **Energy Efficiency and Sustainable Growth in Industrial Sectors in European Union Countries: A nonlinear ARDL Approach.** 2019, Journal of Clear Production. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118045>> Acesso em: 21 de ago. de 2019.

MARTINS, P.; LOPES, A.C.; LANCEROS-MENDEZ, S. **Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): Determination, processing and applications.** Progress in Polymer Science p.:683–706, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.07.006>>. Acesso em 14 de ago. de 2019.

MCCLOSKEY, M. A.; MOSHER, C. L.; HENDERSON, E. R. **Wind Energy Conversion by Plant-Inspired Designs.** PLoS ONE 12(1): e0170022, 2017. Disponível em: <10.1371/journal.pone.0170022>. Acesso em: 25 de jun. de 2019.

MHETRE, M. R.; ABHYANKAR, H. K. **Human exhaled air energy harvesting with specific reference to PVDF film.** *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.06.012>>. Acesso em: 08 de abr. de 2019.

NAN, W.; QUAN, W.; XIANGDONG, X. **Wind energy harvesting with a piezoelectric Harvester.** Smart Mater. Struct, 2013. Disponível em:< [https://www.researchgate.net/publication/258298525\\_Wind\\_energy\\_harvesting\\_with\\_a\\_piezoelectric\\_harvester](https://www.researchgate.net/publication/258298525_Wind_energy_harvesting_with_a_piezoelectric_harvester)>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

NASCIMENTO, E. P. **Trajatória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico.** Estudos Avançados 26 (74), 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142012000100005&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142012000100005&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em: 24 de ago. de 2019.

NASSAR, I. A.; HOSSAM, K.; ABDELLA, M. M. **Economic and environmental benefits of increasing the renewable energy sources in the power system.** 2019, Energy

Reports Volume 5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.006>>. Acesso em: 27 de ago. de 2019.

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 Int. J. Energy Res. 2010; p. 431– 437. Disponível em:< <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/er.1644>>. Acesso em: 05 de jun. de 2019.

OLIVEIRA, A. P.; FUGANHOLI, N. S.; CUNHA, P. H. S., BARELLI, V. A., BUNEL, M. P.M.; NOVAZZI, L.F. **Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis**. The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC, Vol. 04 N. 01 (2018). Disponível em: <<https://doi.org/10.18540/jcecv14sslpp0163-0169>>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

ONU, Organização das Nações Unidas. **17 Objetivos Para Transformar Nosso Mundo**. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em 23 de set. de 2019.

ONU, Organização das Nações Unidas. **World Population Prospects 2019: Highlights**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019. Disponível em: < [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_Highlights.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf)>. Acesso em: 14 de out. de 2019.

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, 15 May 2017, Pag.: 212-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.016>. Disponível em: < [http://e2shi.jhu.edu/images/2017\\_Applied\\_Energy.pdf](http://e2shi.jhu.edu/images/2017_Applied_Energy.pdf) >. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

OWD, Our World in Data. **CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions**. Disponível em: < <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> >. Acesso em: 18 de nov. de 2019.

PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Mitigação das mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 3 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Bustamante, M. M. C., Rovere E.L.L, (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014. Disponível em: < [http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/RAN1\\_completo\\_vol3.pdf](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/RAN1_completo_vol3.pdf)>. Acesso em: 23 de nov. de 2019.

PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. da. **The renewable energy market in Brazil: Current status and potential**. 2012, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Disponível em: <10.1016/j.rser.2012.03.024>. Acesso em 27 de ago. de 2019.

PROBST, L.; PEDERSEN, B.; DAKKAK-ARNOUX, L. **Digital Transformation Monitor Energy harvesting to power the rise of the Internet of Things**. European Commission, Directorate-General Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, 2017. Disponível em: < [https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM\\_Energy%20harvesting%20v1\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM_Energy%20harvesting%20v1_0.pdf) >; Acesso em: 17 de nov. de 2019.

ROCHA, Rodrigo T. **Colheita de energia usando dispositivos baseados em materiais piezoelétrico**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Curso de Graduação em Física, Rio Claro (SP), 2012.

ROCHA, Rodrigo T. **Comportamento dinâmico não-linear em fenômenos de colheita de energia usando dispositivos baseados em materiais piezoelétricos em estruturas aporticadas**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2014.

RUBIO, Fredy A. J. **Análisis del estado actual de la tecnología Energy Harvesting (Recolectores de energía) basados en piezoelectricidad**. Trabalho de conclusão de curso, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica - Tecnología en Electricidad Bogotá D.C., Colombia 2018. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/1900/ecd4b8aa758ea0dcf77819baa6504cc3e3c2.pdf>>. Acesso em: 30 de set. de 2019.

RYU, H.; YOON, H.-J.; KIM, S.-W. **Hybrid Energy Harvesters: Toward Sustainable Energy Harvesting**. 2019, Advanced Materials. Disponível em: <10.1002/adma.2018028981>. Acesso em: 25 de set. de 2019.

SAFAEI, M.; SODANO, H. A.; ANTON, S. R. **A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (2008-2018)**. 2019, Smart Materials and Structures. Disponível em: <10.1088/1361-665x/ab36e4>. Acesso em: 14 de ago. de 2019.

SHEPELIN N. A.; GLUSHENKOV, A. M.; LUSSINI, V. C.; FOX, P. J.; DICINOSKI, G. W.; SHAPTER, J. G.; ELLIS, A. V. **New developments in composites, copolymer technologies and processing techniques for flexible fluoropolymer piezoelectric generators for efficient energy Harvesting**. 2019, Energy Environmental Science. Disponível em: <10.1039/C8EE03006E>. Acesso em 07 de mai. de 2019.

SOIN, N. **Magnetic Nanoparticles—Piezoelectric Polymer Nanocomposites for Energy Harvesting**. Magnetic Nanostructured Materials, Capítulo 10, p.: 295–322, (2018). Disponível em: <doi:10.1016/b978-0-12-813904-2.00010-3>.

SONG, Jundong; ZHAO, Guanxing; LI, Bo; WANG, Jin. **Design optimization of PVDF-based piezoelectric energy harvesters**, Heliyon 3 (2017) e00377. Disponível em: <10.1016/j.heliyon.2017. e00377>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

STAMATELLOU, A.-M.; KALFAS, A. I. **Experimental investigation of energy harvesting from swirling flows using a piezoelectric film transducer**. 2018, Energy Conversion and Management. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.081>>. Acesso em: 07 de out. de 2019.

SUNDARARAJAN, V.; ROMERO, E.; BONILLA, N.; MARTÍNES, C. **Energy Harvesting from Fluttering Membranes**. 10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Júlio de 2012. Disponível em: <

<http://prec.pr/sites/prec.pr/files/uploads/pdf/V-Symposium/1486-Sunda2.pdf>>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

TE SENSOR SOLUTIONS. **Datasheet LDT1-028K PIEZO SENSOR w/ Lead Attachment**. Disponível em: < [www.meas-spec.com](http://www.meas-spec.com) >. Acesso em: 14 de abr. de 2019.

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

UCHINO, K. **Chapter 1 - The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective**. Advanced Piezoelectric Materials (Second Edition), Science and Technology, Woodhead Publishing in Materials, p. 1 – 92, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102135-4.00001-1>>. Acesso em: 13 de ago. de 2019.

VEIGA, J. E. **O âmago da sustentabilidade**. Estudos Avançados 28 (82), 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142014000300002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142014000300002)>. Acesso em: 21 de ago. de 2019.

VIDADILI, N.; SULEYMANOV, E.; BULUT, C.; MAHMUDLU, C. **Transition to renewable energy and sustainable energy development in Azerbaijan**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 80, p.: 1153–1161, 2017. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117308043> >. Acesso em: 22 de ago. de 2019.

WANG, J.; WEN, S.; ZHAO, X.; ZHANG, M.; RAN, J. **Piezoelectric Wind Energy Harvesting from Self-Excited Vibration of Square Cylinder**. 2016, Journal of Sensors, v. 6. Disponível em:<>. Acesso em: 06 de abr. de 2019.

WANG, Q.; ZHAN, L. **Assessing the sustainability of renewable energy: Anempirical analysis of selected 18 European countries**. Science of the Total Environment 692, p.: 529–545, 2019. Disponível em:< <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971933284X> >; Acesso em: 21 de ago. de 2019.

WANG, W.; HE, X.; WANG, X.; WANG, M.; XUE, K. **A bioinspired structure modification of Piezoelectric wind energy harvester based On the prototype of leaf veins**. 2018, Sensors and Actuators A. Disponível em:< <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.059>>. Acesso em: 23 de abr. de 2019.

WANG, Z. L.; WU, W. **Nanotechnology-Enabled Energy Harvesting for SelfPowered Micro-/Nanosystems**. Angew. Chem. Int. Ed. 2012. Disponível em:< <https://engineering.case.edu/centers/afosrcasemuri/sites/engineering.case.edu.centers.afosrcasemuri/files/Wang-2012-Nanotechnology-enable%20energy.pdf>>. Acesso em: 19 de ago. de 2019.

## 8. APÊNDICE

APÊNDICE A – Coordenadas obtidas através do software AutoCAD para determinação da área aproximada.

**Tabela 4** – Lista de informações fornecidas a respeito da construção do polígono circunscrito sobre a imagem da folha.

Nº de pontos de ajuste	Nº de pontos de controle				Área (mm <sup>2</sup> )		Propriedades			
93	95				3195.4217		Plana, não racional, não periódico			
Coordinates (mm)										
Pts.	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	30075329	21147244	29465586	21288507	29424146	20833440	29424146	20833440	30017264	21049398
2	30072064	21150637	29420705	21272040	29444780	20827965	29444780	20827965	30041638	21072753
3	30064913	21158068	29382474	21252220	29469200	20824784	29469200	20824784	30056398	21095700
4	30051821	21168572	29358553	21235154	29490583	20818384	29490583	20818384	30063491	21113395
5	30034717	21173350	29339115	21220351	29509729	20815814	29509729	20815814	30072025	21123718
6	30020862	21182040	29318809	21204588	29526206	20813159	29526206	20813159	30075855	21130688
7	30009536	21191524	29299446	21184990	29545518	20813975	29545518	20813975	30079996	21135216
8	29999138	21201523	29283557	21164631	29563405	20813666	29563405	20813666	30079219	21139474
9	29986509	21209932	29270557	21145008	29579068	20813868	29579068	20813868	30080172	21144089
10	29971672	21221019	29260146	21124826	29596243	20813250	29596243	20813250	30077170	21146045
11	29956581	21230031	29247079	21105253	29618708	20819172	29618708	20819172	30075329	21147244
12	29941980	21238851	29235348	21087530	29647474	20821944	29647474	20821944		
13	29930099	21245539	29228158	21064877	29674874	20827213	29674874	20827213		
14	29917926	21254705	29219015	21043619	29698146	20832302	29698146	20832302		
15	29903661	21259518	29209989	21015319	29719218	20838169	29719218	20838169		
16	29889855	21270205	29203480	20994986	29742478	20846261	29742478	20846261		
17	29872123	21278930	29185293	20976310	29768309	20855907	29768309	20855907		
18	29854049	21289678	29208579	20965900	29796267	20864651	29796267	20864651		
19	29832111	21298941	29222312	20955467	29820442	20873803	29820442	20873803		
20	29801349	21306747	29241084	20940610	29842547	20885415	29842547	20885415		
21	29764302	21309616	29251740	20924910	29862612	20899627	29862612	20899627		
22	29725685	21319512	29271616	20914486	29885170	20913908	29885170	20913908		
23	29688606	21321583	29287508	20896223	29904885	20931280	29904885	20931280		
24	29653256	21325911	29308443	20883508	29920742	20950473	29920742	20950473		
25	29618774	21324741	29329099	20868908	29940415	20962907	29940415	20962907		
26	29583332	21326450	29350610	20861149	29958974	20978576	29958974	20978576		
27	29545573	21319765	29376551	20848176	29979400	20994911	29979400	20994911		
28	29507438	21306962	29401020	20842433	29998079	21020805	29998079	21020805		

APÊNDICE B – Distribuição dos pontos do polígono circunscrito sobre a folha utilizando o software Autodesk AutoCAD versão 2019.

### Morfologia estrutural foliar artificial construída a partir da folha real

