

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

MÔNICA PARREIRA

**GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA COM BASE NO APROVEITAMENTO
DE ÁGUA PLUVIAL**

CERRO LARGO

2023

MÔNICA PARREIRA

**GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA COM BASE NO APROVEITAMENTO
DE ÁGUA PLUVIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

CERRO LARGO

2023

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Parreira, Mônica

Geração de energia piezoelétrica com base no aproveitamento de água pluvial / Mônica Parreira. -- 2023.

64 f.

Orientador: Doutor Jorge Luis Palacios Felix

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS, 2023.

1. Material inteligente. 2. Energia renovável. 3. Piezoeletricidade. 4. Chuva. I. Felix, Jorge Luis Palacios, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

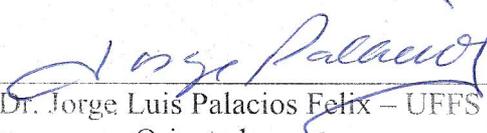
MÔNICA PARREIRA

**GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA COM BASE NO APROVEITAMENTO
DE ÁGUA PLUVIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

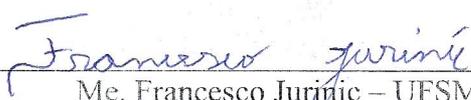
Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 10/02/2023.

BANCA EXAMINADORA



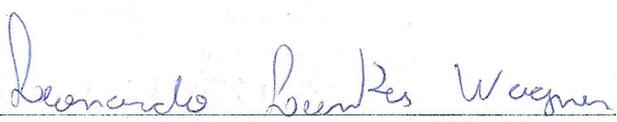
Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix – UFFS

Orientador



Me. Francesco Jurinic – UFSM

Avaliador



Me. Leonardo Lunkes Wagner – UFRGS

Avaliador

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer aos meus pais Adolar e Carine, os quais sou imensamente grata, pois ao longo da graduação e da vida estiveram me instigando ativamente a melhorar e progredir, constituindo-se como figuras essenciais em minha trajetória. Bem como, agradecer a minha avó Dorildes pela estima, cuidados e ensinamentos, os quais nortearam minha caminhada ao longo de meu desenvolvimento pessoal.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix pela oportunidade de desenvolver esse trabalho, assim como, pelo suporte e ensinamentos prestados ao longo da elaboração do mesmo, tornando essa experiência uma descoberta. Como também, é de extrema relevância agradecer todos os docentes e servidores da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Cerro Largo que estiveram presentes ao longo de minha jornada acadêmica.

Por fim, agradeço os laços de amizade e coleguismo formados ao longo da vida, graduação e a todos aqueles que participaram direta ou indiretamente de minha formação, pelo amparo, trocas de experiências e momentos de descontração que tornaram os dias mais leves.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.” (Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

Na atualidade, métodos de conversão de energia de fontes como vento, luz solar, água pluvial, de oceano e de mananciais superficiais em energia elétrica apresentam-se como uma realidade. Há pesquisadores que utilizam materiais piezoelétricos e/ou painéis solares para executar a conversão. Isto posto, levam as propostas de forma a contribuir como um elemento tecnológico de energia renovável ou limpa ampliando o alcance das tecnologias sustentáveis para comunidades locais urbanas e remotas. De tal modo, o presente trabalho de conclusão de curso teve por objetivo analisar a colheita/geração de energia utilizando o material piezoelétrico do tipo PVDF modelo LDT0-028K tendo como fonte ambiental, a água pluvial. O procedimento consistiu no aproveitamento da força resultante do fluxo de água que atravessa um sistema em pequena escala na forma de paralelepípedo produzindo vibrações por vórtices ao dispositivo do tipo de viga engastada que está acoplada ao sensor piezoelétrico resultando na geração de tensão. Os resultados obtidos no estudo demonstraram que o sistema é eficiente para a alimentação de dispositivos de baixo consumo na escala de micro à mili de tensão e potência. As tensões máximas de saída obtidas foram de 67,3763 mV e 61,6720 mV, estando relacionadas de modo respectivo aos volumes de armazenamento de 3 L e 5 L. A aplicação do sistema para o suprimento de tensões em escala residencial torna-se inviável devido ao elevado número de sensores piezoelétricos necessários, encarecendo o mesmo. Ademais, o presente estudo pode vir a complementar e ampliar a disponibilidade energética para suprir pequenas demandas de energia em regiões menos favorecidas por outras fontes. Assim sendo, conclui-se que o sistema de geração de energia piezoelétrica com base no aproveitamento de água pluvial é eficiente para pequenas demandas de tensão, contribuindo assim, às tecnologias de energias renováveis. Por fim, sugere-se estudos e pesquisas futuras de forma a melhorar a eficiência do sistema e configurar uma plausível alternativa de energia limpa para o provisionamento de energia.

Palavras-chave: material inteligente; energia renovável; piezoeletricidade; chuva.

ABSTRACT

Nowadays, methods of converting energy from sources such as wind, sunlight, rainwater, ocean water, and surface water sources into electrical energy are a reality. There are researchers using piezoelectric materials and/or solar panels to perform the conversion. This being said, they take the proposals in order to contribute as a technological element of renewable or clean energy extending the reach of sustainable technologies to local urban and remote communities. In this way, the present end-of-course work aimed to analyze the harvesting/generation of energy using the piezoelectric material of the PVDF type model LDT0-028K having as environmental source, rainwater. The procedure consisted of harnessing the force resulting from the flow of water through a small-scale system in the form of parallelepiped producing vibrations by vortices to the device type of clamped beam that is coupled to the piezoelectric sensor resulting in the generation of tension. The results obtained in the study showed that the system is efficient for powering low-power devices in the micro to milli voltage and power range. The maximum output voltages obtained were 67.3763 mV and 61.6720 mV, and were related respectively to the 3 L and 5 L storage volumes. The application of the system for voltage supply on a residential scale becomes unfeasible due to the large number of piezoelectric sensors required, making it more expensive. Furthermore, this study can complement and expand the availability of energy to supply small demands of energy in regions less favored by other sources. Therefore, it is concluded that the system of piezoelectric power generation based on the use of rainwater is efficient for small voltage demands, thus contributing to the renewable energy technologies. Finally, future studies and research are suggested in order to improve the efficiency of the system and configure a plausible clean energy alternative for energy supply.

Keywords: intelligent material; renewable energy; piezoelectricity; rain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição regional do consumo energético em 2021	19
Figura 2 – Consumo energético por fonte em anos selecionados	20
Figura 3 – Consumo de energia renovável no mundo entre 1990 – 2018.....	21
Figura 4 – Participação das fontes renováveis na oferta interna de energia.....	22
Figura 5 – Precipitação anual ocorrida no ano de 2021	24
Figura 6 – Sistema de captação e armazenamento de água pluvial.....	26
Figura 7 – Sistema de captação e armazenamento de água pluvial.....	27
Figura 8 – Efeito piezoelétrico direito e inverso	30
Figura 9 – Etapas metodológicas.....	35
Figura 10 – Configuração experimental	36
Figura 11 – Representação esquemática do sistema de geração de energia piezoelétrica	37
Figura 12 – Sensor piezoelétrico PVDF – 028K	37
Figura 13 – Corpo cilíndrico do estudo	39
Figura 14 – Corpo cilíndrico da literatura	38
Figura 15 – Ensaio experimental	40
Figura 16 – Aferição dos parâmetros de interesse.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Legislações pertinentes ao aproveitamento de água pluvial no Brasil.....	28
Quadro 2 – Aplicações de materiais piezoelétricos na geração de energia.....	32
Quadro 3 – Estudos de piezoeletricidade com base no aproveitamento de água pluvial.....	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tensões de saída.....	45
Gráfico 2 – Velocidade e tensões de saída	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de energia elétrica no mundo por região (TWh)	18
Tabela 2 – Maiores e menores precipitações anuais no Brasil	25
Tabela 3 – Dados dos ensaios experimentais	42
Tabela 4 – Velocidades para a seção de 25 mm	46
Tabela 5 – Velocidade para a seção de 20 mm.....	46
Tabela 6 – Viabilidade econômica	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AP1MC	Associação Programa Um Milhão de Cisternas
ASA	Articulação do Semiárido Brasileiro
BEN	Balanço Energético Nacional
BNEF	Bloomberg NEF
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	Agência Internacional de Energia
IMERG	<i>Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement</i>
IOT	Internet das Coisas
IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis
NE	Nordeste
NEO	New Energy Outlook
P1MC	Programa Um Milhão de Cisternas
PEHF	Fluxo de Fluido
PPGECAM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
PVDF	Polifluoreto de Vilideno
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
RTRWH	<i>Rooftop Rainwater Harvesting</i>
S	Sul
SE	Sudeste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	DEMANDA ENERGÉTICA NO BRASIL E NO MUNDO	17
2.2	FONTES DE ENERGIA	20
2.3	PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO	23
2.4	APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL	25
2.4.1	Legislações pertinentes ao aproveitamento de água pluvial.....	27
2.5	<i>ENERGY HARVESTING</i>	29
2.6	PIEZOELERICIDADE.....	30
2.6.1	Materiais piezoelétricos e aplicações na geração de energia.....	31
2.6.2	Piezoelétricidade com base no aproveitamento de água pluvial.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	TIPO DE ESTUDO	35
3.2	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	35
3.3	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	39
3.4	TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO ENERGÉTICA	42
4.2	ALIMENTAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE BAIXO CONSUMO	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A energia em conjunto com a segurança energética constitui o escopo estratégico de organizações e países, uma vez que, a energia é essencial aos serviços e atendimentos básicos das necessidades humanas. Deste modo, o meio social está em constante crescimento e evolução, conseqüentemente há ampliação contínua da demanda energética para o suprimento de múltiplas atividades (ALRWASHDEH, 2022).

Segundo o mesmo autor, inerente ao crescimento energético está a problemática das fontes de energia, visto que não estão à disposição de maneira igualitária e nas mesmas condições de acesso para as regiões do mundo e indivíduos. Desde o período da Revolução Industrial, o uso de energia é predominante no cenário social, com ênfase nas energias não renováveis, as quais dominam os setores produtivos (GYIMAH *et al.*, 2022).

Deste modo, atualmente a sociedade está restrita essencialmente a energia proveniente da queima de combustíveis fósseis, visto que proporciona um provimento seguro e economicamente viável. Contudo, o contraponto da utilização de fontes não renováveis é o possível esgotamento futuro (DERUYCK *et al.*, 2022). Com tais características, o desenvolvimento econômico e os impactos ambientais estão intrinsecamente relacionados a esfera energética (ZHANG; SHA; YANG, 2022).

Por conseguinte, verifica-se a necessidade de expansão e diversificação das fontes renováveis de energia, propiciando uma geração energética limpa (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Diante disso, as energias renováveis (hídrica, solar, ondas, biomassa, etc.) são descritas como tecnologias que visam promover além do crescimento econômico a segurança energética, como também, apresentam a capacidade de mitigação dos impactos provenientes das mudanças climáticas antropogênicas (FERREIRA *et al.*, 2022).

Neste panorama, a colheita de energia ou “*Energy Harvesting*” vem atraindo atenção nos últimos anos, pois a colheita de energia do meio ambiente detém o potencial de funcionar como uma alternativa viável a complementação de baterias (LI *et al.*, 2022). Por esse ângulo, a captação de energia renovável ou de recuperação do ambiente baseada em materiais piezoelétricos destaca-se, uma vez que, os materiais piezoelétricos possuem uma característica única de conversão da tensão mecânica em elétrica e assim inversamente (HU; LI; XIE, 2019).

Assim, a colheita de energia piezoelétrica caracteriza-se como uma fonte não convencional de energia limpa, a qual representa um papel significativo no suprimento de energia de numerosos dispositivos e sistemas de engenharia, em que o abastecimento de energia convencional não é passível ou desejável de ser realizado (SHARMA *et al.*, 2022).

No que tange a geração de energia piezoelétrica, muitos estudos estão em desenvolvimento, dentre eles, a baseada no aproveitamento de água pluvial ou no impacto proveniente das gotas de chuva, na qual representa uma grande e renovável fonte de energia que pode ser explorada por meio das colheitadeiras piezoelétricas (PALOMBA *et al.*, 2022).

Neste âmbito, a fim de aprofundar os métodos de conversão de energia, este trabalho de conclusão de curso propõe a montagem da bancada experimental em pequena escala como contribuição acadêmica às tecnologias de energia renovável, seguindo a mesma linha de pesquisa do estudo de Susanti *et al.* (2021) e Wang *et al.* (2012). Assim, projeta-se um modelo de gerador elétrico baseado no fluxo de água da chuva, o qual induz oscilações e vibrações em um sensor piezoelétrico do tipo PVDF modelo LDT0-028K de viga engastada aplicado em residências com recipientes de coleta de água pluvial.

Na área experimental, há poucas informações detalhadas na literatura acerca de bancadas experimentais de geração de energia a partir da captação de água pluvial. Contudo, possibilitaram motivar a autora a aprimorar um modelo físico de colheita/geração de energia utilizando o material piezoelétrico PVDF modelo LDT0-028K.

À vista disso, o presente trabalho de conclusão de curso segue a seguinte estrutura:

A. Introdução;

B. Levantamento bibliográfico sobre estudos de captação e aproveitamento de água pluvial. Perante à perspectiva regional da implantação dos sistemas de captação e armazenamento de água pluvial em residências, constata-se que é uma realidade inicial. Embora especificações de projetos de sistemas de geração de energia a partir da captação de água pluvial e aplicações residenciais são escassas na literatura;

C. Materiais e métodos;

D. Resultados e discussão;

E. Considerações finais.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão elencados o objetivo geral e específicos do estudo.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do estudo é explorar o conceito de *Energy Harvesting* e realizar uma análise experimental da geração de energia piezoelétrica quando aliada ao aproveitamento de

água pluvial, a partir da implementação de materiais inteligentes em sistemas de captação e armazenamento de água pluvial.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar a eficiência de geração energética em sistemas de captação e armazenamento de água pluvial quando empregue o sensor piezoelétrico do tipo PVDF modelo LTD0-028K;
- Avaliar a relação custo benefício da implantação da tecnologia em sistemas de captação e armazenamento de água pluvial para a alimentação de dispositivos de baixo consumo;
- Possibilitar a ampliação da disponibilidade energética para regiões menos favorecidas por outras fontes de energia.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção são apresentadas breves contextualizações acerca da demanda energética, bem como, as fontes de energia, dados de precipitação pluviométrica no Brasil e no mundo, captação e armazenamento, legislações pertinentes ao aproveitamento de água pluvial, *energy harvesting* e piezoelectricidade. Relações essas, que fundamentam a elaboração e desenvolvimento deste estudo.

2.1 DEMANDA ENERGÉTICA NO BRASIL E NO MUNDO

Desde os primórdios, a energia, em virtude da sua capacidade de realizar trabalho ou de transferir calor, sempre foi um fator necessário à sobrevivência do homem (LIMA *et al.*, 2014). À vista disso infere-se que:

Nas sociedades primitivas seu custo era praticamente zero. A energia era obtida da lenha das florestas, para aquecimento e atividades domésticas, como cozinhar. Aos poucos, porém, o consumo de energia foi crescendo tanto que outras fontes se tornaram necessárias. Durante a Idade Média, as energias de cursos d'água e dos ventos foram utilizadas, mas em quantidades insuficientes para suprir as necessidades de populações crescentes, sobretudo nas cidades. Após a Revolução Industrial, foi preciso usar mais carvão, petróleo e gás, que têm um custo elevado para a produção e transporte até os centros consumidores (GOLDEMBERG; LUCON, 2007, p. 7).

De acordo com Riegelhaupt e Pareyn (2010), as sociedades utilizam energia para satisfazer necessidades diversas, como para o cozimento de alimentos, iluminação, refrigeração, combustíveis para os setores de transporte, comercial e industrial. Assim, é inimaginável o funcionamento do meio social moderno na ausência de fontes energéticas, uma vez que há o consumo contínuo dessas fontes.

As mudanças nas formas de utilização da energia são decorrentes tanto da revolução do período neolítico, com a descoberta do fogo e o advento da agricultura, como do desenvolvimento da força produtiva dos combustíveis fósseis (LIMA *et al.*, 2014). O desenvolvimento econômico e social é um dos principais fatores que explicam o aumento do consumo de energia (SALAZAR, 2010).

Por volta da década de 1980 muitas eram as evidências de que a Revolução Industrial movida por combustíveis fósseis estava atingindo um pico e que as mudanças climáticas induzidas pelo homem causariam uma crise planetária de proporções inimagináveis (RIFKIN, 2021).

Os recursos energéticos de maior utilização na modernidade evidenciaram seus grandiosos impactos ao meio ambiente, dentre esses recursos estão contidos os combustíveis fósseis, usinas nucleares e hidrelétricas. Estas últimas representam a maior matriz energética no Brasil e não estão livres de críticas (SILVEIRA, 2018). Deste modo, constata-se que o consumo de energia foi essencial para a melhoria na qualidade de vida, contudo, propiciou a degradação das matrizes ambientais, além de, inferir danos nocivos ao meio ambiente.

O comportamento humano sofre alterações em seus padrões e características decorridas das constantes transformações do meio social, conjuntamente com a visão do meio ambiente como reserva de recursos e energia (ARAÚJO; MENDES, 2018). De tal modo, o consumo de energia é diretamente influenciado pelos estilos de vida e padrões de consumo das populações e dos locais em que residem. Nesta circunstância países mais abastados consomem de maneira mais expressiva energia do que os países pobres (GOLDEMBERG; LUCON, 2012).

Neste panorama, na Tabela 1 estão dispostos dados referentes ao consumo de energia elétrica no mundo por região.

Tabela 1 – Consumo de energia elétrica no mundo por região (TWh)

Regiões	Anos					$\Delta\%$ (2018/2017)	Part.% (2018)
	2014	2015	2016	2017	2018		
Mundo	20.853	21.273	21.867	22.471	23.381	4,0	100,0
América do Sul e Central	1.040	1.078	1.079	1.082	1.099	1,6	4,7
África	614	630	623	657	669	1,9	2,9
América do Norte	4.714	4.709	4.732	4.704	4.863	3,4	20,8
Ásia e Oceania	9.026	9.307	9.792	10.301	10.977	6,6	46,9
Eurásia	1.268	1.261	1.282	1.290	1.314	1,8	5,6
Europa	3.291	3.348	3.391	3.434	3.442	0,2	14,7
Oriente Médio	901	940	969	1.004	1.016	1,2	4,3

Fonte: EPE (2021).

A partir dos dados elencados na Tabela 1 infere-se que as regiões do mundo que possuem o consumo energético mais elevado no ano de 2018 são Ásia e Oceania representando 46,9 % do consumo total de energia, sendo seguido pela América do Norte com participação de 20,8 %. Nesse contexto, de acordo com dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a China detém 27,6 % do consumo total das regiões que compreendem Ásia e Oceania.

Da mesma forma, na região da América do Norte, os Estados Unidos equivalem a 17,2 % da totalidade de consumo. Cabe salientar ainda que, para além dos países citados estão entre os dez maiores consumidores de energia elétrica: Índia (5,5 %), Japão (4,0 %), Rússia (4,0 %), Canadá (2,4 %), Brasil (2,3 %), Coreia do Sul (2,3 %), Alemanha (2,3 %), França (1,9 %) e outros (30,5 %), respectivamente. Assim, os dados corroboram com o que fora explicitado por Goldemberg e Lucon (2012).

Neste panorama, de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022, ano base 2021 elaborado pela EPE, o consumo total de energia elétrica no Brasil foi de 497 TWh, em média 4,6 % maior quando comparado ao ano de 2019. Assim, a distribuição regional do consumo energético no ano de 2021 pode ser identificada na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição regional do consumo energético em 2021



Fonte: EPE (2022).

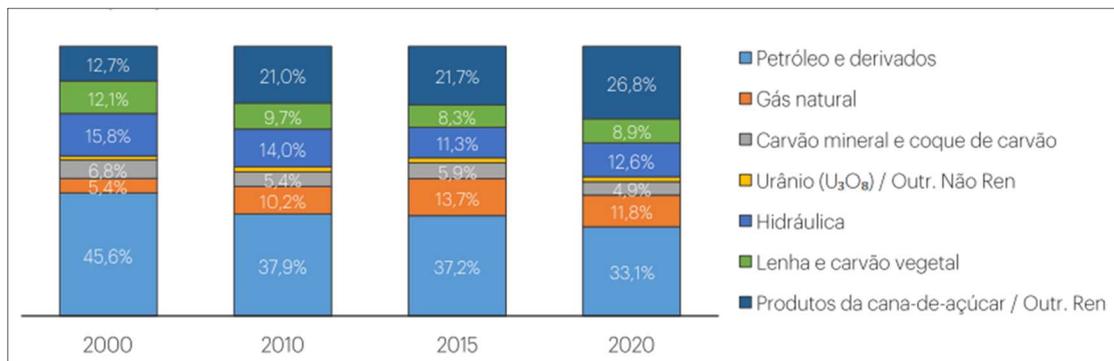
Conforme explicitado pela Figura 1, o consumo energético de maior expressividade está concentrado na Região Sudeste (SE) do país, apresentando 48,5 %, sendo seguidas pelas regiões Sul (S), 18,6 % e Nordeste (NE), 17,5 %.

Tal como, a distribuição do consumo por classe no ano de 2021 no Brasil segundo dados divulgados pela EPE (2022), a classe industrial consome 36,3 % do total de energia elétrica, logo em seguida, o segundo maior consumidor é o residencial com 30,1%, comercial com 17,4 %. Por fim, consumos menos expressivos são verificados nas classes: rural (6,6 %), poder público (2,8 %), iluminação pública (2,8 %), serviços públicos (3,4 %) e consumo próprio (0,7 %).

Do mesmo modo, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) referente ao ano de 2021, os setores que mais fizeram uso de energia foram os setores de transportes (32,5 %), indústrias (32,3 %), seguidos por: residências (10,9 %), setor energético (9,5 %), agropecuária (5,0 %), serviços (4,8 %) e uso não energético (5,1 %).

Acerca da evolução do consumo energético por fonte no Brasil, na Figura 2 estão contidas informações acerca do consumo energético por fonte em anos selecionados, conforme disponibilizados pela Agência Internacional de Energia (IEA) e EPE.

Figura 2 – Consumo energético por fonte em anos selecionados



Fonte: EPE; IEA (2021).

De tal modo, no ano de 2000 o petróleo e seus derivados corresponderam 45,6 % do consumo energético em comparação as demais fontes, entretanto no ano de 2020 representou 33,1 % perdurando como a maior fonte. Ao realizar a análise em 2000, a segunda fonte de maior expressividade é a hidrúlica com 15,8 %, contudo, em 2020 a geração de energia por produtos da cana de açúcar /outr. ren ultrapassa a mesma, totalizando 26,8 %.

2.2 FONTES DE ENERGIA

As fontes utilizadas para a geração de energia elétrica podem ser definidas como não renováveis ou renováveis. As fontes não renováveis são aquelas em que existe a possibilidade de esgotamento. Encontram-se nessa categoria todos os derivados de petróleo, combustíveis radioativos (urânio, tório, plutônio, etc.) e o gás natural (KOVALESKI; COUTINHO, 2020).

Segundo a IEA (2022), a energia renovável é proveniente de fontes que são naturalmente reabastecidas, mas com fluxo limitado. Assim como, os recursos renováveis são teoricamente inesgotáveis quanto sua duração, porém limitados na disponibilidade de energia disponível por unidade de tempo.

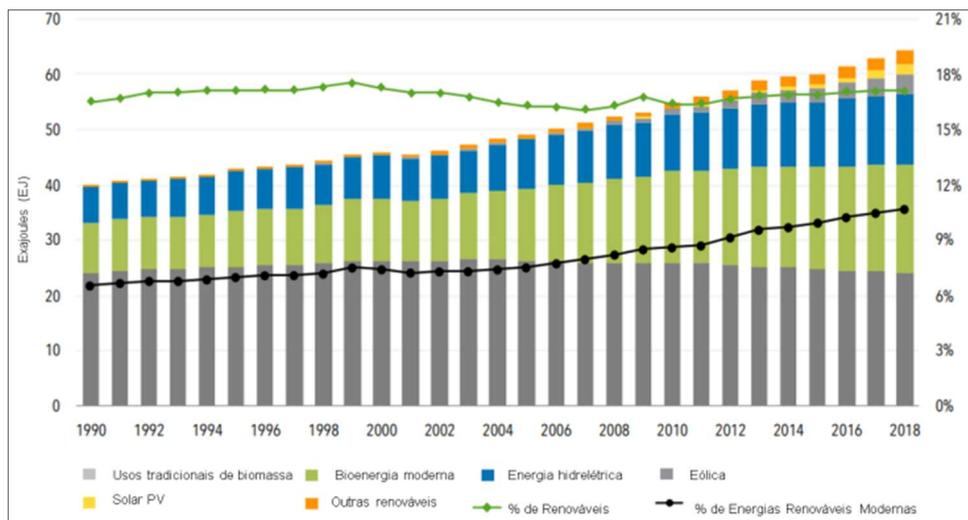
Alguns exemplos de fontes renováveis de energia podem ser citados tais como Energia solar: gerada por meio de painéis fotovoltaicos, os quais transformam luz solar em energia; Energia Hidráulica: que possui sua origem na água, ela gira as turbinas das usinas hidrelétricas, gerando energia; Energia Geotérmica: obtida utilizando o calor do interior da Terra; Energia da Biomassa (agrícola): sua origem é da queima de palha de milho, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, etc., e a Energia do Biogás: que é obtida principalmente nos aterros de lixo orgânico (BRAZ; RODRIGUES; SIQUEIRA, 2017, p. 229).

No que tange as fontes não renováveis de energia, não é de hoje a preocupação com a dependência dos combustíveis derivados de petróleo. Devido às altas de preços dessa matriz energética e à diminuição de suas reservas várias tecnologias têm sido desenvolvidas para a diversificação das fontes de energia (SILVA; DA SILVA, 2019).

Desse modo, as energias renováveis cresceram rapidamente nos últimos anos impulsionadas pelo apoio de políticas e reduções acentuadas de custos para energia solar fotovoltaica e energia eólica em particular (IEA, 2022).

Em conformidade com o *The Energy Progress Report (2021)*, em 2018 o consumo de energia renovável, incluindo usos tradicionais de biomassa cresceu 2,1 %, assim como o consumo total final de energia, deixando as renováveis na mesma quota de 17,1 % do ano de 2017 do consumo total de energia. Acerca desse panorama está apresentado na Figura 3 o consumo de energia renovável no mundo por tecnologia e participação no consumo total de energia nos anos de 1990 a 2018.

Figura 3 – Consumo de energia renovável no mundo entre 1990 – 2018



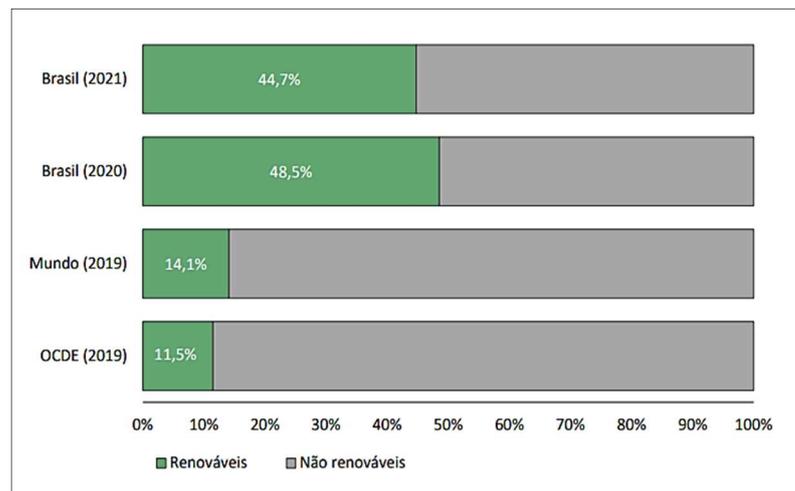
Fonte: IRENA (2021).

Conforme destacado pela Figura 3 e dados publicados pela Agência Internacional para Energias Renováveis (IRENA), a energia hidrelétrica é a maior fonte de eletricidade renovável utilizada globalmente, seguida pela eólica e solar.

De acordo com o *GrowthInsights*, Energia Renovável publicado pela Ace Cortex baseado nos dados do relatório *New Energy Outlook* (NEO) de 2018 da Bloomberg NEF (BNEF) estima-se que em 2050 as energias renováveis representem cerca de 50 % da energia mundial.

No cenário nacional, em conformidade com o BEN referente ao ano de 2022 a participação de fontes renováveis na matriz energética foi marcada pela queda de 3,8 % entre os anos de 2020 e 2021 da oferta de energia hidráulica, a qual está associada à escassez hídrica e ao acionamento das usinas termelétricas, conforme indicado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 – Participação das fontes renováveis na oferta interna de energia



Fonte: IEA; EPE (2022).

Conforme elencado pelo BEN (2022), dentre os 44,7 % que constituem a oferta interna por energias renováveis estão repartidos em biomassa da cana (16,4 %), hidráulica (11 %), lenha e carvão vegetal (8,7 %) e outras renováveis (8,7 %), a exemplo de energia eólica, solar, biodiesel, etc. Assim, os demais 55,3 % que representam a parcela de oferta de energia interna por fontes não renováveis destacam-se o petróleo e seus derivados (34,4 %), gás natural (13,3 %), carvão mineral (5,6 %), urânio (1,3 %) e outras não renováveis (0,6 %).

No panorama brasileiro, de acordo com o *Energy Outlook* de 2019, publicado pela empresa BP Brasil, até o ano de 2040 estima-se que o consumo de energia no Brasil cresça 2,2 % ao ano, crescimento esse mais acelerado quando comparado ao cenário global, o qual será de 1,2 % ao ano. Supõe-se que a matriz energética brasileira no ano de 2040 estará quase igualmente dividida entre petróleo e gás, assumindo 49 % da totalidade, enquanto a energia

proveniente de hidrelétricas e renováveis corresponderão a 46 %. Neste sentido, a demanda crescente de energia elétrica na atualidade é pauta para o progresso socioeconômico e ambiental. Assim, faz-se necessário a elaboração de meios produtivos e técnicas de geração de energia menos nocivas ao meio ambiente e que supram as demandas (MOTA *et al.*, 2021).

O desenvolvimento e utilização de energia verde é uma forma eficaz de resolver o atual problema de escassez de energia (CAO *et al.*, 2022). Contudo, as principais limitações dessas fontes estão relacionadas ao custo e disponibilidade (HOSSAIN *et al.*, 2016). Nesta conjuntura, não são completamente suficientes para suportar a crise energética nas próximas décadas (MISHRA *et al.*, 2018).

Neste contexto, para além das fontes tradicionais de energia renovável, como eólica, solar, geotérmica e hidrelétrica, outras fontes de micro energia verde, como a energia das gotas de chuva, energia das ondas da água, energia eletromagnética, energia termoelétrica, e energia mecânica, têm atraído atenção (WANG *et al.*, 2018; ROBERTSON *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2019; JIANG *et al.*, 2017; BHASKAR *et al.*, 2018, apud CAO *et al.*, 2022).

2.3 PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO

A precipitação consiste na água, seja no estado líquido ou sólido que cai da atmosfera em direção à superfície (SILVA, 2015). Semelhantemente, Bertoni e Tucci (2001) elencaram que a precipitação é a água advinda da atmosfera que incide sobre a superfície terrestre, a exemplo da neblina, neve e chuva. Assim, a diferenciação das formas de precipitação é o estado em que a água se apresenta.

Em conformidade com o *State of the climate in 2020*, a precipitação sobre as áreas terrestres globais em 2020 conforme estimado a partir de três diferentes produtos de monitoramento (terra, oceano e globo) estava próxima ou acima da média de longo prazo de 1981-2000. Neste contexto, todos os três produtos indicaram um aumento da precipitação média global, em que o ano de 2020 foi superior a 2019. Em relação a distribuição geográfica das anomalias de precipitação, no ano de 2020 houve uma substancial variabilidade em todas as regiões do planeta.

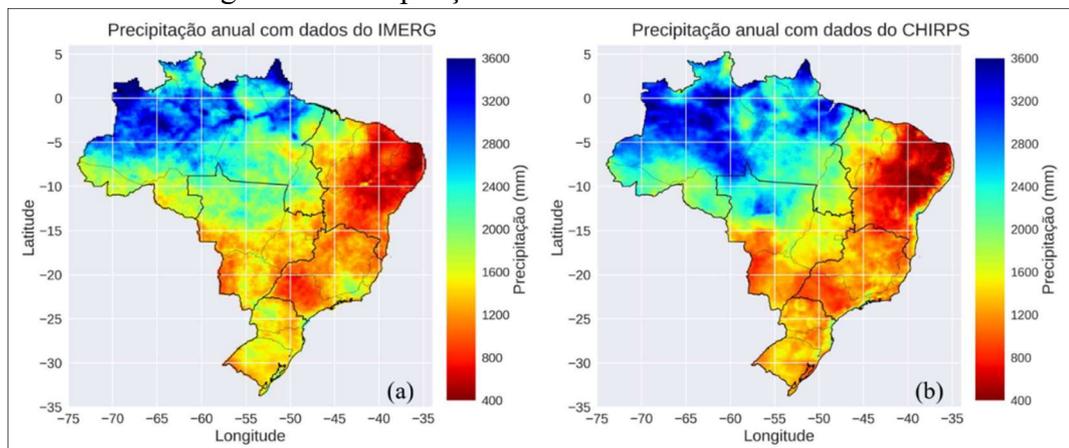
Assim, sobre as áreas terrestres globais, as maiores anomalias positivas estavam no leste da China, com grande parte da Ásia Central e da África Subsaariana, enquanto as anomalias negativas de maior significância estavam sobre o continente da América do Sul, com grande parte da América do Norte temperada. (VOSE *et al.*, 2021).

No cenário brasileiro, segundo os dados subsidiários do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) publicados no Boletim anual de precipitação no Brasil de fevereiro de 2022, no ano de 2021 a precipitação média anual foi de 1.451 mm. Observou-se que a precipitação máxima anual foi registrada na região Norte, especificamente no Estado do Pará, correspondendo a 4.407 mm. Referente a precipitação mínima anual, a mesma foi registrada no semiárido da Paraíba, com um valor de 248,6 mm, demonstrando o quão heterogêneo é a precipitação dentro do país.

Assim, ainda em conformidade com o Boletim anual de precipitação no Brasil (2022), as dez estações que registraram as maiores precipitações estão localizadas na região Norte do país, ao passo que as dez estações com menores registros de chuva situam-se na região Nordeste, sendo cinco somente na Paraíba.

A chuva anual ocorrida no ano de 2021, segundo dados obtidos pelos satélites *Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement* (IMERG) e *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS), pode ser verificado na Figura 5.

Figura 5 – Precipitação anual ocorrida no ano de 2021



Fonte: PPGEAM (2022).

A partir da Figura 5 e informações dispostas no Boletim anual sobre a chuva no Brasil, constata-se que os dois satélites apresentam em grande maioria concordância na distribuição espacial da precipitação pluviométrica ocorrida no ano de 2021. Dessa forma, infere-se que os dois satélites indicaram a região Norte na qual ocorreu a maior precipitação com volumes superiores a 3.200 mm/ano, enquanto a região Nordeste apresentou os menores índices de precipitação, retratando em algumas zonas valores inferiores a 500 mm/ano. O Sul do Centro-Oeste e parcela considerável do Sudeste também apresentaram baixos índices de precipitação. As maiores divergências ocorreram no sul da Amazônia e norte do Centro-Oeste, onde o

CHIRPS apontou totais anuais superiores ao IMERG. Na Tabela 2 constata-se as dez localidades com maiores e menores índices de precipitação anual no Brasil.

Tabela 2 – Maiores e menores precipitações anuais no Brasil

Maiores precipitações anuais (mm)	Menores precipitações anuais (mm)
Belém – PA: 4.407,0	Campina Grande – PB: 248,6
Belém – PA: 3.941,5	Irauçuba – CE: 317,0
Belém – PA: 3.789,0	Campina Grande – PB: 326,4
Belém – PA: 3.492,8	Campina Grande – PB: 348,6
Tabatinga – AM: 3.491,0	Caruaru – PE: 357,9
Tabatinga – AM: 3.458,8	Upanema – RN: 358,0
Apuí – AM: 3.390,2	Campina Grande – PB: 368,2
Juruá – AM: 3.268,8	Caruaru – PE: 394,8
Alvarães – AM: 3.237,0	Bezerros – PE: 397,3
Tonantins – AM: 3.224,8	Mulungu – PB: 402,0

Fonte: PPEGECAM (2022).

Conforme destacado na Tabela 2, o município de Belém no Estado do Pará apresenta as quatro maiores precipitações anuais, em que a mais elevada corresponde a 4.407,0 mm, seguidas pelo município de Tabatinga no Estado do Amazonas, a qual corresponde a duas precipitações mais elevadas com 3.491,0 mm e 3.458,8 mm, respectivamente. Relacionado aos municípios que apresentam menores índices de precipitação destacam-se Campina Grande na Paraíba com 248,6 mm e Irauçuba no Estado do Ceará com 317,0 mm.

2.4 APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL

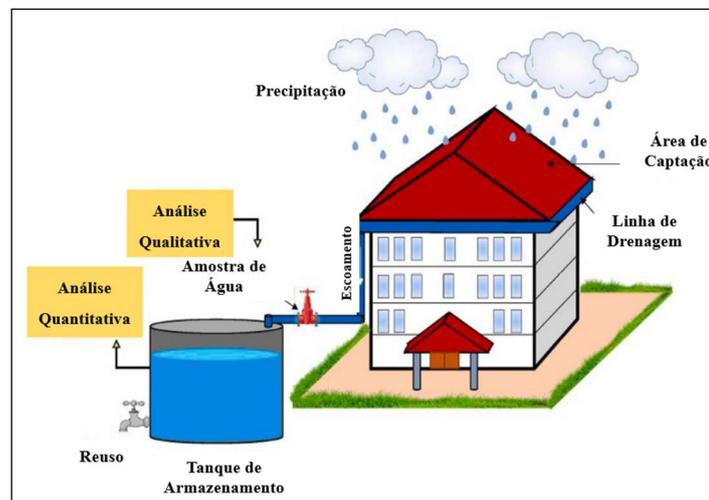
A água pluvial é um dos exemplos de fontes de energia limpa, desse modo, a técnica de tratamento e de reutilização da água da chuva transformou-se em uma problemática que merece atenção (LIU *et al.*, 2021). À vista disso, o aproveitamento de água pluvial é um conceito simples, baseado na captação por meio de uma superfície impermeável. O aproveitamento da água e os sistemas de coleta configuram-se como um meio de conservação e minimização dos problemas relativos a carência de água. Ademais, a água captada e posteriormente armazenada representa uma alternativa e solução para a utilização e suprimento de usos potáveis, menos nobres e não potáveis (SANT’ANA; MEDEIROS, 2017; MORUZZI; LEÃO, 2019; GOLDENFUM, 2006).

Segundo Marinoski e Ghisi (2008), a água pluvial captada possui inúmeros usos e aplicações, dentre elas podem ser destacadas a utilização em descargas de bacias sanitárias, torneira de jardins, lavagem de roupas, calçadas e automóveis. Ainda segundo os autores, a captação e armazenamento de água pluvial traz como vantagens e benefícios a minimização de alagamentos, enchentes e redução no consumo de água potável, para além dos já mencionados, evita a escassez hídrica e preserva o meio ambiente.

De acordo com Sautchúk (2004) e Marinoski (2007), a captação de água pluvial é uma das formas mais antigas de abastecimento. Nesse sentido, inúmeros relatos de civilizações antigas ao longo do globo constataam o armazenamento e aproveitamento de água pluvial. Neste contexto, registros históricos datados de 3000 a.C apontam cisternas escavadas em rochas para o armazenamento da água captada.

Em concordância com Gomes *et al.* (2014), no cenário internacional países como a China, Nova Zelândia e Tailândia são destaques quanto a captação de água pluvial, havendo a construção de estruturas de calhas acopladas aos telhados, técnica denominada de *Rooftop Rainwater Harvesting* (RTRWH). Na Figura 6, é possível identificar um sistema de captação e armazenamento de água pluvial.

Figura 6 – Sistema de captação e armazenamento de água pluvial



Fonte: Adaptado de Anchan; Prasad (2021).

No Brasil, a captação e armazenamento de água pluvial é instigada pelo Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), criado no ano de 1999, o qual foi arquitetado pela Articulação Semiárido Brasileiro (ASA) visando descentralizar e democratizar o acesso à água em regiões que apresentam insuficiência hídrica, como na região do semiárido brasileiro em que há a prática de estoque de água pluvial nas cisternas para diversos usos (GRINGS, 2005; ASA, “s.d”).

Segundo o Boletim informativo Nº19 de fevereiro de 2019 do Ministério da Cidadania, somente no semiárido brasileiro há 1.294.503 tecnologias de captação descentralizado de água pluvial e quando estendido as demais regiões do país o número corresponde a 1.310.282. Ademais, segundo o caderno informativo “Acesso à água para populações do semiárido brasileiro”, realizado pela ASA no ano de 2019, a Associação programa um milhão de cisternas (AP1MC) implementou 729.640 tecnologias. Quanto à perspectiva regional da implantação dos sistemas de captação e armazenamento de água pluvial, nas Figura 7 A) e B) estão expressos alguns dos sistemas implantados em residências.

Figura 7 – Sistema de captação e armazenamento de água pluvial



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Como apresentado na Figura 7, os sistemas de captação e armazenamento de água pluvial implantados nas residências da região são compostos basicamente por uma calha metálica acoplada ao telhado, em seguida há a presença de um tubo condutor de cano PVC de diâmetro variável, o qual está disposto na abertura de um reservatório comercial (caixa de água) de capacidade distinta. Em alguns casos, como indicado na Figura 7 A), há uma telha protetora que evita a dispersão de folhas e gravetos na água armazenada.

2.4.1 Legislações pertinentes ao aproveitamento de água pluvial

Conforme expresso por Sant’ana e Medeiros (2017), o poder legislativo e os órgãos públicos apesar da ausência de incentivos fiscais e econômicos para a ampliação das tecnologias de aproveitamento pluvial vêm apresentando ao longo dos anos leis que fomentam essa prática. No Quadro 1, estão apresentadas legislações pertinentes ao aproveitamento de água pluvial.

Quadro 1 – Legislações pertinentes ao aproveitamento de água pluvial no Brasil

Referência legal	Trecho
Lei Nº 9.433/1997 – Política Nacional de Recursos Hídricos	Art. 2º inciso IV - incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais.
ABNT NBR 15.527:2007	Dispõe acerca dos requisitos para o aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis.
ABNT NBR 10.844:1989	Fixa exigências e critérios necessários aos projetos das instalações de drenagem de águas pluviais visando a garantir níveis aceitáveis de funcionalidade, segurança, higiene, conforto, durabilidade e economia.
Projeto de Lei do Senado Nº 411/2007	Institui mecanismos de estímulo à instalação de sistemas de coleta, armazenamento e utilização de águas pluviais e de reutilização de águas servidas em edificações públicas e privadas.
Projeto de Lei Nº7.818/2014	Estabelece a Política Nacional de Captação, Armazenamento e Aproveitamento de Águas Pluviais e define normas gerais para sua promoção.
Projeto de Lei Nº 2.457/2011	Altera a Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade) e a Lei Nº 4.380, de 21 de agosto de 1964 que dispõe sobre o Sistema Financeiro da Habitação, para instituir mecanismos de estímulo à instalação de sistemas de coleta, armazenamento e utilização de águas pluviais em edificações públicas e privadas.
Projeto de Lei Nº 3.322/2004	Dispõe sobre a obrigatoriedade de reservatórios ou cisternas para o acúmulo de água da chuva no território brasileiro.
Lei Ordinária Nº 14.270/2013	Determina que todos os prédios do Corpo de Bombeiros localizados no Estado do Rio Grande do Sul mantenham sistema de captação e armazenagem de água da chuva e dá outras providências.
Lei Nº 2.276/2010 – Plano Diretor de Cerro Largo	Art. 26 inciso XXII - desenvolver programas e incentivos para captação de águas pluviais nas edificações, para uso próprio, desonerando o sistema de abastecimento de água potável.
Decreto Nº 1976/2012 - Aprova o Plano Municipal de Saneamento Básico de Cerro Largo	Ações para o sistema de drenagem e manejo das águas pluviais: propor tecnologias de baixo impacto (ex: armazenamento de água das chuvas); Ações para o sistema de abastecimento de água: implantar e normatizar o aproveitamento das águas pluviais.

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme explicitado no Quadro 1, no cenário nacional não se encontram dispostas diretrizes e regulamentações consolidadas a respeito do aproveitamento de água pluvial. Contudo, conforme verificado na Lei Nº 9.433/1997 referente a Política Nacional dos Recursos Hídricos, a captação e armazenamento de água pluvial se apresenta como um incentivo. As demais como configuram-se como projetos de leis acerca da obrigatoriedade e instalação, como o Projeto de Lei Nº 2.457/2011.

À nível estadual, tem-se a Lei Ordinária Nº 14.270/2013, a qual determina a adoção do sistema de captação e armazenamento de água da chuva, constituindo-se como a única referente ao tema abordado no estado. Ademais, na esfera regional como analisado no município de Cerro Largo/RS, estão previstas ações de implementação de sistemas aproveitamento de água pluvial por meio da captação e armazenamento da mesma para outros fins, as quais são propostas através dos planos diretores e de saneamento básico.

2.5 ENERGY HARVESTING

A colheita de energia ou *Energy Harvesting* é a conversão da energia ambiente (na forma de luz, vibrações, vento, etc.) em energia elétrica (POZO *et al.*, 2019). Como também, em conformidade com Soin (2018), pode ser definida como um processo em que as fontes, como carga mecânica, vibrações, gradientes de temperatura e luz são eliminadas e convertidas para obter níveis relativamente pequenos de energia na faixa nW - mW.

Neste cenário, em concordância Dogini e Dino (2015), o termo *Energy Harvesting* foi delineado pelo avanço de pesquisas, as quais almejavam expandir a autonomia energética de dispositivos eletrônicos que demandam baixo consumo através do aproveitamento de energia que se encontra presente em movimentos harmônicos.

Deste modo, uma das principais aplicações de *Energy Harvesting* é no suprimento de energia para sensores objetivando torná-los energeticamente autônomos (MORAES JÚNIOR, 2013).

Com o crescente número de implantações de infraestrutura de Internet das Coisas (IoT) para uma ampla variedade de aplicações, a manutenção de baterias tornou-se uma grande limitação para a sustentabilidade dessa infraestrutura. Para superar esse problema, a coleta de energia oferece uma alternativa viável para alimentar dispositivos IoT de forma autônoma, resultando em uma série de IoTs de coleta de energia sem bateria (ou EH-IoTs) aparecendo no mercado nos últimos anos (MA, *et al.*, 2019).

À vista disso, a captação de energia decorre de fontes de macro energia associadas a energia hídrica, oceânica, solar e eólica. Mas também, com o progresso tecnológico e com o

avanço na colheita de micro energia, a captação pode estar relacionada a vibração, movimento, gradiente de pressão, micro fluxo de água, térmico e demais fontes (HARB, 2011).

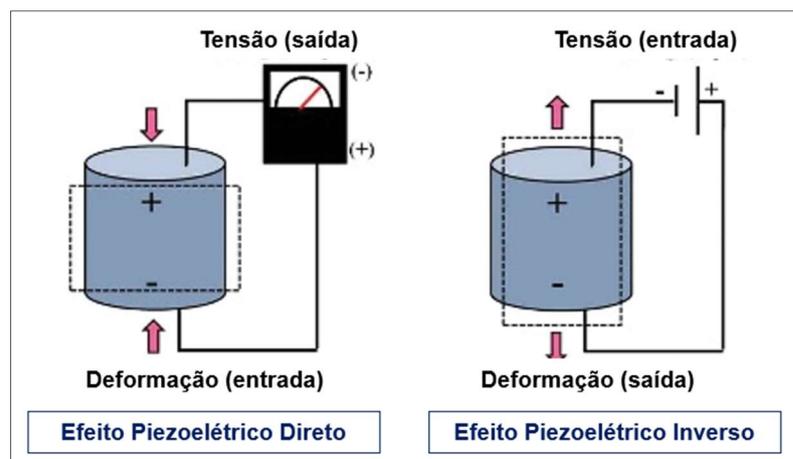
Na era da tecnologia da informação, a colheita de energia sustentável é essencial (GREESHMA; RAJEV, 2022). De tal modo, é considerada um método relativamente novo para o fornecimento de energia. Neste contexto, numerosos coletores de energia utilizando mecanismos de conversão piezoelétrica, eletromagnética, eletrostática e triboelétrica já foram propostos (ZHOU; LALLART; ERTURK, 2022).

2.6 PIEZOELETRICIDADE

A piezoelectricidade foi descoberta no ano de 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie (TICHÝ *et al.*, 2010). Logo em seguida, no ano de 1881 Lippman discorreu sobre a tensão mecânica gerada em um cristal de quartzo quando aplicado um campo elétrico sobre ele, sendo comprovado no mesmo ano pelos irmãos Curie (HARVEY, 2002).

Por conseguinte, a piezoelectricidade é a junção do termo grego *piezin* (apertar/pressionar) com eletricidade, na qual trata do aparecimento de cargas elétricas positivas em um dos lados de certos cristais não condutores e cargas negativas no lado oposto quando esses são submetidos a uma tensão mecânica (RANGEL, 2014). À vista disso, na piezoelectricidade consideram-se dois efeitos centrais, sendo eles o efeito direto e inverso, conforme está apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Efeito piezoelétrico direto e inverso



Fonte: Adaptado de Mishra *et al.*, (2018).

O efeito piezoelétrico direto gera um potencial elétrico através de um material quando aplicado uma deformação mecânica externa, isso acontece devido ao deslocamento assimétrico

de cargas ou íons (PUSTY; SHIRAGE, 2022). Ao passo que, o efeito piezoelétrico inverso ocorre quando um campo elétrico é aplicado, produzindo uma deformação no material (atuadores) (MASSONE; REIS; VIOLA, 2019).

2.6.1 Materiais piezoelétricos e aplicações na geração de energia

Materiais piezoelétricos são materiais inteligentes que podem gerar atividade elétrica em resposta a pequenas deformações (RAJABI; JAFFE; ARINZEH, 2015). Os materiais inteligentes são todos aqueles que mudam suas propriedades ao variar uma propriedade física (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016). Comumente há três principais tipos de materiais piezoelétricos, sendo eles materiais naturais, produzidos pelo homem e cerâmicos.

Neste panorama, segundo Mendonça (2019) as propriedades piezoelétricas encontram-se naturalmente em alguns cristais, como quartzo, topázio, sacarose, tartarato de sódio e potássio (sal de La Rochelle) e ainda em materiais orgânicos e naturais como o osso, ADN (ácido desoxirribonucleico), tendões, seda, dentes e madeira. Ademais, conforme destacado por Hu e Song (2022) podem ser observadas propriedades piezoelétricas em cristais de turmalina e berlinita (AlPO_4).

Existem materiais piezoelétricos sintéticos, isto é, que não exibem o efeito piezoelétrico no estado natural (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016). Estão nesses materiais, o ortofosfato de gálio (GaPO_4) e langasite ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$). Neste mesmo contexto, materiais piezoelétricos cerâmicos compreendem titanato de bário (BaTiO_3), titanato de chumbo (PbTiO_3), titanato zirconato de chumbo (PZT), niobato de potássio (KNbO_3), niobato de lítio (LiNbO_3), tantalato de lítio (LiTaO_3), tungstato de sódio (Na_2WO_4) (HU; SONG, 2022).

Para além dos materiais piezoelétricos já mencionados, Oo *et al.* (2022) elencaram o polifluoreto de vinilideno (PVDF), o qual possui comportamento piezo, piro e ferroelétrico. O PVDF e seus copolímeros são altamente empregues devido a sua elevada resistência mecânica, fácil processamento, estabilidade térmica e natureza não reativa (BICY *et al.*, 2022). De modo a complementar, LU *et al.*, (2020) destacaram o baixo custo desse material, sendo assim amplamente empregado em pesquisas. Desta maneira, no Quadro 2, estão expressas algumas aplicações de materiais piezoelétricos na geração de energia presentes na literatura.

Quadro 2 – Aplicações de materiais piezoelétricos na geração de energia

Título	Autor (es) e ano de publicação
Micro energia piezoelétrica rodoviária	WANG <i>et al.</i> (2021)
Turbina eólica piezoelétrica	TAO <i>et al.</i> (2017)
Colheitadeira de energia piezoelétrica em chuva	WONG; HO; CHAI. (2017)
Modelagem e simulação de um sistema de Captação de energia piezoelétrica usando fluxo de fluido (PEHF) de canal aberto para captação eficiente de energia PVDF	YADAV <i>et al.</i> (2019)
Capacidade de coleta de energia drasticamente aprimorada em nanocompósitos piezoelétricos modulados em estrutura de sanduíche	ZHANG <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A aplicação de materiais piezoelétricos é muito diversa, tendo potencial para alimentar dispositivos portáteis de baixa potência e sistemas eletrônicos autoalimentados por extração de energia mecânica (PETROVIC *et al.*, 2021). No que tange a geração de energia piezoelétrica, os mesmos abrangem uma ampla gama de fontes em que podem ser empregues como na geração de energia utilizando fluidos, vento, chuva, conforme destacado no Quadro 2.

2.6.2 Piezoeletricidade com base no aproveitamento de água pluvial

Segundo Wong *et al.* (2017), o impacto das gotas de chuva na superfície do sensor piezoelétrico causa deformação no material e dessa forma resultará em energia elétrica, sendo sua aplicação viável em regiões com índices pluviométricos abundantes. Nesse panorama, os autores destacaram que a geração de energia baseada no impacto de gotas de chuva é estritamente depende da taxa de chuva.

Bem como, Ilyas e Swingler (2015) enfatizaram que para além da dependência da taxa de chuva devem ser considerados a massa da gota, velocidade e o mecanismo de impacto que atinge o dispositivo de colheita. De modo amplo, a tensão gerada pelo piezoelétrico está relacionada à quantidade de intensidade da chuva, que é diretamente proporcional à pressão (DEFIYANI; PANGARIBUAN; DARLIS, 2018).

Em conformidade com Doria *et al.* (2019), diversos pesquisadores estudaram como se dá a colheita de água pluvial por distintos dispositivos piezoelétricos, citam-se como exemplos as estruturas *cantilever*/viga engastada, de ponte, membrana e em forma de vagão. Viola (2018) buscou realizar uma comparação experimental entre as estruturas de colheita que são submetidas a tensões por gotas de chuva, sendo elas as estruturas de balanço, ponte e círculo

flutuante. No entanto, outros pesquisadores procuraram entender os impactos das gotas de chuva em superfícies sólidas e descrever cenários de espalhamento, respingo e rebote.

Visando minimizar a influência dos níveis de precipitação, Susanti *et al.* (2021) propuseram um plano de geração de energia piezoelétrica a partir de água pluvial que pode ser aplicado nas residências, em que a precipitação coletada proveniente dos telhados é redirecionada a um tanque de armazenamento. Desta maneira, a geração de energia se dá com base na pressão exercida pelo fluido no circuito piezoelétrico, a qual é obtida pela queda de água.

Neste contexto, Bao e Wang (2021) propuseram um novo mecanismo de geração baseado na coleta, diferindo das técnicas tradicionais, as quais são dependentes da transferência da energia cinética para a elétrica produzida pelo impacto direto das gotas de chuva.

Os autores propuseram inicialmente a coleta da água pluvial em um tanque de liberação automática, quando ele estiver cheio, o tanque irá liberar de forma autônoma a água armazenada para posterior passagem na placa defletora piezoelétrica em balanço. No Quadro 3 encontram-se estudos de piezoeletricidade com base no aproveitamento de água pluvial presentes na literatura.

Quadro 3 – Estudos de piezoeletricidade com base no aproveitamento de água pluvial

Título	Autor (es) e ano de publicação
Captação de energia piezoelétrica em condições de chuva simuladas variadas	WONG; HO; CHAI. (2016)
Uma colheitadeira de hidroenergia piezoelétrica com uma estrutura de contêiner especial	BAO; CHEN; WANG. (2019)
Captação de Energia Vibração de Impactos de Gotas de Chuva: Testes Experimentais e Modelos Interpretativos	PALOMBA <i>et al.</i> (2022)
Desenvolvimento de uma nova colheitadeira piezoelétrica excitada por gotas de chuva	DORIA <i>et al.</i> (2022)
Uma nova estrutura piezoelétrica para captação de energia de gotículas de água: estudos teóricos e experimentais	HAO; DONG; LI. (2021)

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme destacado no Quadro 3, muitos estudos recentes são encontrados no que tange a geração de energia piezoelétrica com base no aproveitamento de água pluvial. Contudo, a produção de energia usando esse sistema é muito baixa em comparação com outras formas de geração de energia renovável, mas pode ser suficiente para alimentar dispositivos eletrônicos em aplicações especializadas de baixa potência (ILYAS; SWINGLER, 2015).

Apesar disso, tendo em vista a melhoria do desempenho dos coletores de energia piezoelétrica com o aproveitamento de água pluvial Kim *et al.* (2014) exploraram estruturas bioinspiradas na cauda do peixe elétrico resultando no modelo de tronco que é acoplado ao sensor piezoelétrico.

Para além das estruturas bioinspiradas anteriormente mencionadas, vibrações induzidas por vórtice podem auxiliar na colheita de energia vibracional em baixas frequências, aumentando sua eficiência (DU *et al.*, 2020).

Neste contexto, cilindros circulares podem induzir vórtices por meio do acoplamento na ponta de uma viga em balanço piezoelétrico ou uma viga em balanço é colocada na esteira de um cilindro circular de forma que ocorra o vórtice de Kármán que permite que a colheitadeira oscile de maneira periódica (ABDELKEFI, 2016).

Assim, quando a frequência de emissão de vórtices estiver próxima da frequência natural do corpo rombudo, ocorrerá ressonância, sofrendo assim uma vibração de alta amplitude e conseqüentemente aumentando a eficiência da coleta de energia (WANG *et al.*, 2020).

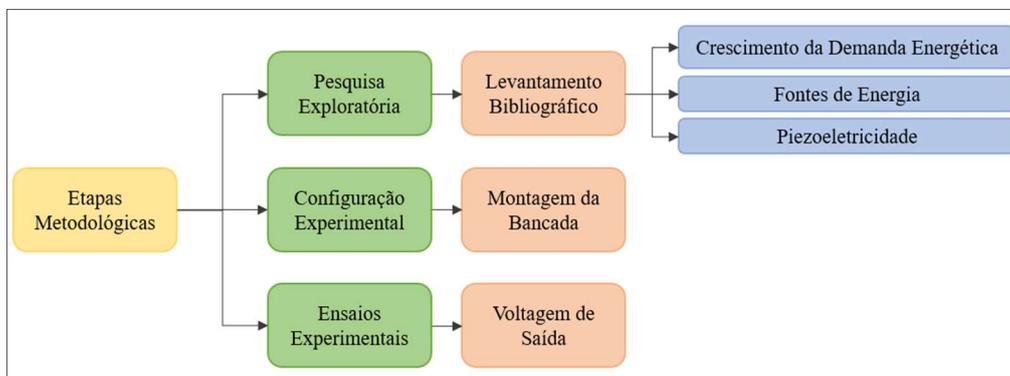
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento metodológico para este trabalho de conclusão de curso foi elaborado a partir de revisões de literatura no que tange a geração de energia piezoelétrica com base no aproveitamento de água pluvial. Deste modo, nesta seção estão elencados o tipo de estudo, configuração, ensaios e tratamento dos dados experimentais.

3.1 TIPO DE ESTUDO

Segundo Gil (2022), a pesquisa pode ser classificada quanto à área do conhecimento, assim, no contexto deste trabalho, cabe destacar a pesquisa aplicada, a qual engloba estudos que possuem a finalidade de solucionar problemas identificados no meio social em que os pesquisadores vivem. Quanto ao propósito geral da pesquisa, pode-se definir como exploratória, uma vez que têm o intuito de proporcionar maior familiaridade com o problema, com vista a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. As etapas metodológicas estão expostas na Figura 9.

Figura 9 – Etapas metodológicas



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

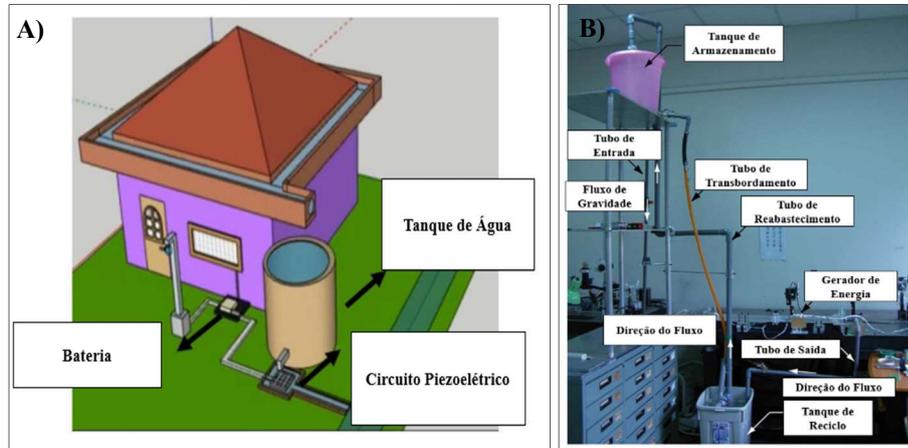
O presente estudo foi embasado e estruturado a partir das etapas metodológicas expostas na Figura 9, como forma de propiciar maior grau de organização e entendimento.

3.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A configuração experimental sucedeu-se inicialmente pela montagem da bancada experimental em pequena escala, como contribuição acadêmica às tecnologias de energias

renováveis, a qual seguiu os modelos estruturais aproximados às configurações físicas propostas por Susanti *et al.* (2021) e Wang *et al.* (2012), como exposto nas Figuras 10 A) e B).

Figura 10 – Configuração experimental



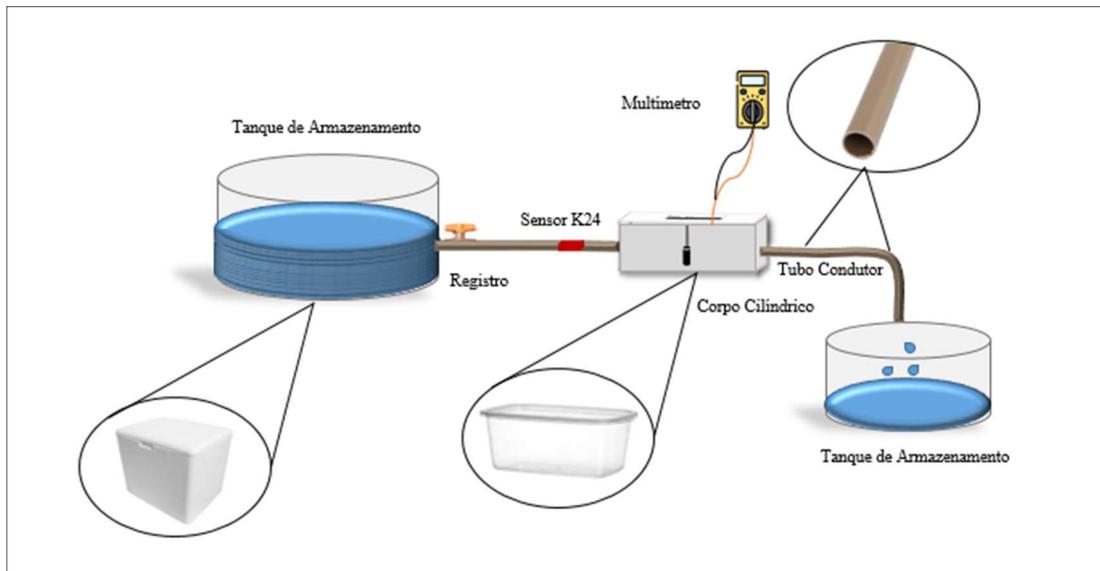
Fonte: Adaptado de Susanti *et al.* (2021) e Wang *et al.* (2012).

A configuração experimental em pequena escala idealizada para a realização do ensaio experimental conta com um tanque de armazenamento de água (caixa de isopor) de 21 L de volume, com dimensões de 24,5 cm de largura, 44 cm de comprimento e 32,0 cm de altura. A esse tanque estão dispostos canos de PVC e conexões de 20 mm e 1” (polegada), equivalente a canos de diâmetro nominal de 25 mm, que propiciarão o escoamento e redirecionamento do fluxo de água até o dispositivo de coleta ou gerador de energia elétrica.

Este dispositivo está disposto no interior de uma microestrutura no formato de paralelepípedo (caixa plástica) com dimensões de 9,3 cm de largura, 18,5 cm de comprimento e 14,0 cm de altura. A partir da passagem do fluxo de água, o qual foi aferido com o Medidor de Fluxo Digital K24, há a indução de oscilações e vibrações sobre um sensor piezoelétrico de PVDF de configuração física do tipo viga engastada, responsável pela geração de tensão, em que a mesma fora quantificada pelo Multímetro Digital HXY.

Após a passagem da água pelo sensor piezoelétrico a mesma é redirecionada para um tanque de armazenamento (caixa de isopor) de 18 L de volume, com dimensões de 23,5 cm de largura, 39,0 cm de comprimento e 30,5 cm de altura. Na Figura 11 está apresentado a representação esquemática do sistema de geração de energia piezoelétrica com base no aproveitamento de água pluvial.

Figura 11 – Representação esquemática do sistema de geração de energia piezoelétrica

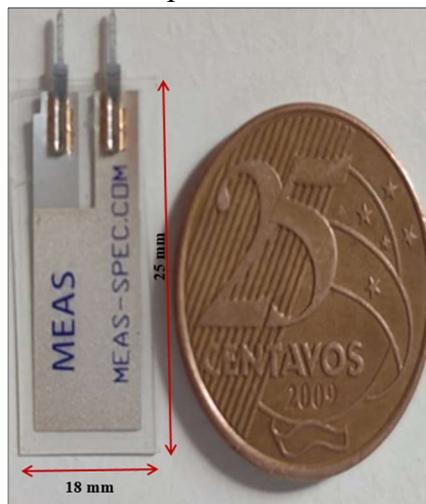


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O sensor piezoelétrico utilizado no estudo é do tipo PVD modelo LDT0-028K que foi utilizado em projetos de geração ou colheita de energia tendo como fonte o vento (SCHONARTH, 2017; DAMKE, 2019).

Segundo a Ficha Técnica do sensor piezoelétrico PVDF modelo LDT0 – 028K, o sensor é um filme de polímero PVDF de 18 mm de largura, 25 mm de comprimento e 28 μm de espessura, com eletrodos de tinta de prata serigrafados, laminado a 0,125 mm com substrato de poliéster e equipado com dois contatos (TE CONNECTIVITY, 2015). Ademais, possui densidade de massa de $1,78 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ e Módulo de Young de $2 - 4 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ (MEASUREMENT SPECIALTIES, 1999). Na Figura 12 está disposto o sensor piezoelétrico utilizado no estudo comparado com a dimensão de uma moeda.

Figura 12 – Sensor piezoelétrico PVDF – 028K



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Ao sensor piezoelétrico podem ser acoplados estruturas bioinspiradas, corpos cilíndricos, massas adicionais, a fim de propiciar maior sensibilidade ao sensor à baixas frequências. Deste modo, na Figura 13 está disposto o corpo cilíndrico proposto acoplado ao sensor piezoelétrico, a fim de induzir vórtices.

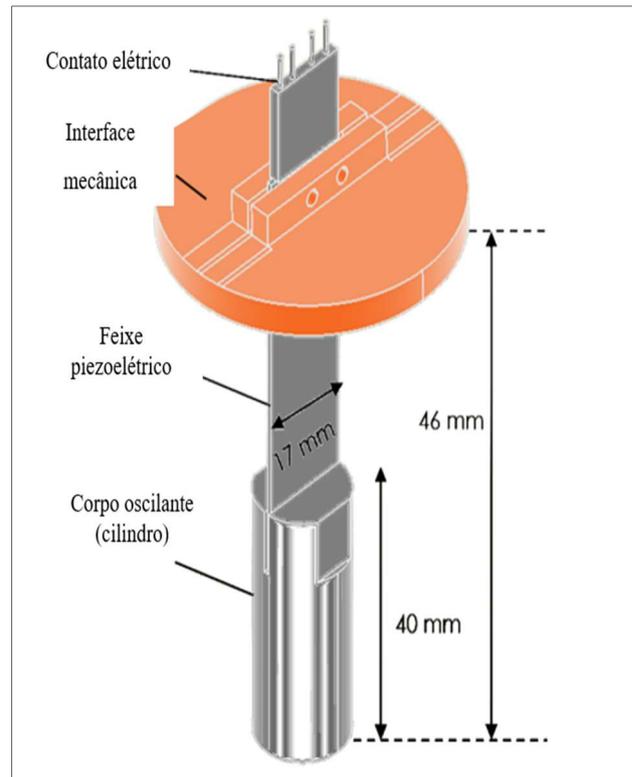
Ainda no que concerne a Figura 13, nela estão especificadas as dimensões e composição do corpo cilíndrico, confeccionado com base nos estudos de Mattarelli *et al.* (2016), conforme elencado na Figura 14.

Figura 13 – Corpo cilíndrico do estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 14 – Corpo cilíndrico da literatura



Fonte: Mattarelli *et al.* (2016).

O corpo cilíndrico utilizado no estudo conta com uma massa de 20 gramas composta por pedras do tipo seixo dolomitas. Bem como, a haste na qual está acoplada o sensor piezoelétrico é constituída de plástico acetato de celulose, o qual possui uma constante de flexão mínima de 0,60 Gpa (gigapascal) e máxima de 2,80 Gpa (OMNEXUS, 2023).

Deste modo, estruturas de massa, bioinspiradas e corpos cilíndricos são estudados conjuntamente a sensores piezoelétricos pois almejam tornar o sistema de geração de energia mais sensível e eficiente a perturbação do fluido, conforme elencado por Kim *et al.* (2014); DU *et al.* (2020); ABDELKEFI (2016) e WANG *et al.* (2020).

3.3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados nas dependências da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Cerro Largo, Unidade Seminário. Diante disso, em virtude da limitação das condições do estudo e dos materiais disponíveis foram necessárias adequações na estruturação da bancada do estudo e dos ensaios experimentais.

Nesta circunstância, os ensaios experimentais foram realizados segundo a configuração experimental elencada na Figura 11. Entretanto, antecedente a execução do ensaio experimental foi realizada a calibração do medidor de fluxo digital K24 de forma a garantir sua precisão e exatidão quanto ao volume medido. Deste modo, pegou-se um recipiente de volume conhecido, especificamente de 2 L e procedeu-se com o enchimento do mesmo.

A partir disso, o medidor contabilizou 1,881 L, sendo necessário o ajuste da constante do equipamento, a qual é 1,000 pelo padrão de fábrica. O ajuste da constante de calibração é dado pela fórmula disponibilizada pelo fabricante, a qual está indicada na Equação 1.

$$\text{Constante} = (\text{Const. padrão de fábrica}) * \left(\frac{\text{Vol.recipiente}}{\text{Vol.K24}} \right) \quad (1)$$

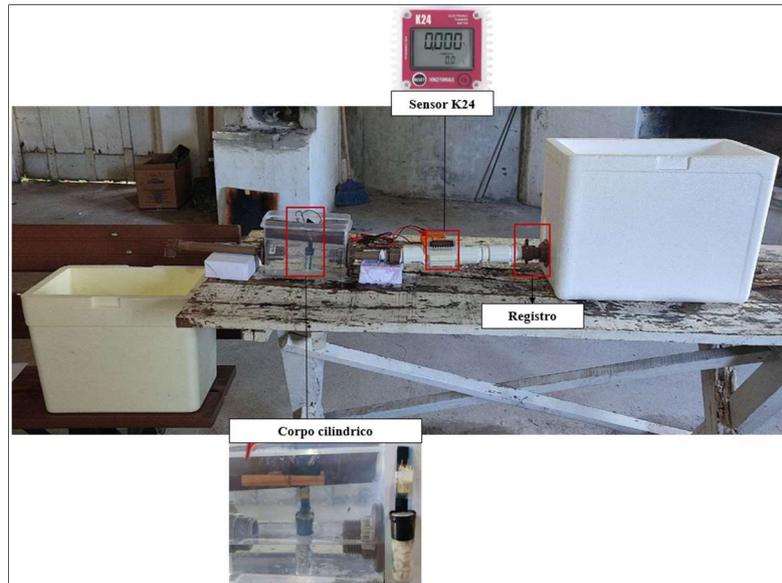
Após o cálculo da nova constante, a qual resultou em 1,063, repetiu-se o procedimento de enchimento do recipiente de volume conhecido.

Os ensaios experimentais foram realizados a partir da reserva de água de volumes de 3 L, 5 L e 7 L em uma caixa de isopor de 21 L. Para além disso, devido a saída da tubulação na caixa de isopor utilizada deixou-se um “volume morto” correspondente à 8,150 L.

Assim, o início dos ensaios experimentais deu-se com a liberação de modo respectivo dos volumes de 3 L, 5 L e 7 L. Destarte, a água reservada escoou a partir da abertura do registro de água localizado no início da tubulação.

Após a abertura do mesmo, a água perpassou o medidor de fluxo digital K24, o qual contabilizou o volume e paralelamente cronometrou-se o tempo em que os mesmos eram aferidos. É importante salientar que o medidor de fluxo digital K24 pode ser utilizado para a medição de vazão, contudo, é indicado para a faixa de operação de 10 L/min à 120 L/min, superior a faixa utilizada no estudo. Na Figura 15 está apresentado a condução do ensaio experimental.

Figura 15 – Ensaio experimental



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Logo em seguida, após a passagem pelo medidor de fluxo digital, o fluxo de água foi redirecionado à microestrutura no formato de um paralelepípedo, na qual está localizado o sensor piezoelétrico conectado ao Multímetro HYX para a aferição da tensão gerada. Por último, é redirecionado ao tanque de armazenamento de 18 L para a reutilização da água nas demais medições. Na Figura 16 está indicado o processo de aferição do volume, tensão e tempo de escoamento.

Figura 16 – Aferição dos parâmetros de interesse



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O procedimento mencionado acima, relativo aos ensaios experimentais foram repetidos em duplicata para os três volumes de armazenamento, totalizando seis ensaios experimentais.

Ressalta-se ainda que, a observância e armazenamento dos dados de volume, tempo de esvaziamento e tensão sucedeu-se por meio da filmagem das telas do Multímetro Digiral HYG, do medidor de fluxo digital e cronômetro, para posterior tratamento dos dados experimentais. Por fim, destaca-se que não foi estudado os efeitos relativos a variação de temperatura do fluido e sua influência no sensor piezoelétrico.

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Ao final dos ensaios experimentais foram contabilizados os vetores respectivos aos volumes e voltagens de saída por meio da observação dos vídeos gravados durante os ensaios experimentais. À vista disso, para o volume de 3 L nas duplicatas realizadas foram aferidos 178 e 214 dados, enquanto para 5 L, 340 e 312 dados e por fim, para 7 L, 415 e 411 dados. Posterior a obtenção dos vetores de dados, realizou-se a média aritmética dos valores de volume e tensão, conforme expresso pela Equação 2.

$$\text{Média} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (2)$$

Com os valores correspondentes as médias foram efetuados os cálculos das vazões para os três volumes aferidos pelo sensor K24, relacionando o tempo contabilizado, por meio da Equação 3, a qual advém da conceituação de vazão. Desta forma, foram gerados gráficos respectivos aos volumes mencionados acima para os dois ensaios experimentais realizados, os quais estarão descritos no Tópico 4, Resultados e Discussões.

$$\text{Vazão} = \frac{\text{Volume}}{\text{Tempo}} \quad (3)$$

Por seguinte, transformou-se a vazão respectiva a cada volume em velocidade, relacionando os parâmetros vazão e área da seção circular, conforme expresso pela Equação 4, a qual provém da Equação da Continuidade. Por conseguinte, foram gerados gráficos respectivos às velocidades de escoamento do fluido para os dois ensaios experimentais realizados, os quais estarão descritos no Tópico 4, Resultados e Discussões.

$$\text{Velocidade} = \frac{\text{Vazão}}{\text{Área da seção circular}} \quad (4)$$

A transformação da vazão em velocidade foi efetuada a fim de realizar um comparativo com os estudos presentes na literatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão descritos os resultados obtidos referentes aos ensaios experimentais acerca da geração de energia piezoelétrica com base no aproveitamento de água pluvial.

4.1 EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO ENERGÉTICA

A partir dos ensaios experimentais realizados e do tratamento dos dados experimentais, na Tabela 3, estão dispostos os dados obtidos para os ensaios experimentais em duplicata para os volumes de armazenamento de 3 L, 5 L e 7 L.

Tabela 3 – Dados dos ensaios experimentais

Parâmetros	Ensaio I			Ensaio II		
	3 L	5 L	7 L	3 L	5 L	7 L
Média do fluxo (L)	1,4755	2,5615	3,6436	1,4959	2,5866	3,5930
Média de tensão (mV)	67,3763	61,6720	50,2039	6,0333	52,6903	50,1077
Tempo de esvaziamento (s)	24	38,48	52,84	24,40	39	52
Vazão (L/s)	0,06148	0,0666	0,0690	0,06131	0,0663	0,0691

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme os dados expostos na Tabela 3, foi possível constatar que a média do fluxo dos volumes de armazenamento para 3 L, 5 L e 7 L nos ensaios experimentais I e II estão em concordância, uma vez que os valores para 3 L se encontram em torno de 1,4755 L e 1,4959 L, para 5 L, em média de 2,5615 L e 2,5866 L, bem como, para 7 L de 3,6436 L e 3,5930 L.

Do mesmo modo, o tempo de esvaziamento dos respectivos volumes de 3 L, 5 L e 7 L estão em torno de 24 s, 38 s e 52 s de modo respectivo. Para além disso, no que concerne o parâmetro vazão, os dados também são condizentes entre si, visto que são dependentes dos volumes e tempos.

No tocante ao parâmetro de tensão de saída, para o volume armazenado de 3 L, conforme elencado na Tabela 3, a tensão média de saída referente ao primeiro ensaio experimental é de 67,3763 mV, superior quando comparado ao segundo ensaio experimental, o qual resultou em 6,0333 mV.

A discrepância para os valores de tensão para o volume de 3 L pode estar associada a elevação do nível da água na microestrutura em formato de paralelepípedo. Essa elevação

deve-se ao menor volume associado a ela quando comparado com o reservatório de armazenamento, o qual possui volume de 21 L, ocasionando disparidade no nível de água.

De forma análoga, o Teorema de Stevin discorre acerca da diferença de pressão entre dois pontos de um fluido em repouso, o qual aborda que para a diferença de pressão é essencial a variação de cotas entre eles, na qual a pressão entre dois pontos em um mesmo plano ou nível horizontal é a mesma, não importando o formato do recipiente (BRUNETTI, 2008).

Assim, de forma similar os recipientes possuem distintos níveis de água e volume, na qual o reservatório com maior volume exerce maior pressão, contribuindo para o aumento do nível de água do recipiente menor.

Portanto, o aumento do nível de água próximo ao contato elétrico do sensor é responsável pelo aumento de pressão e deformação no mesmo, para além da oscilação provocada pelo fluxo do fluido, inferindo maiores picos de tensão.

Deste modo, sensores piezoelétricos quando acoplados na superfície de um componente estrutural se comportam como sensores de deformações dinâmicas, apresentando alta sensibilidade à deformação (BELOVA; GOLYAMINA; RASTORGUEV, 1988, apud NERY; PASTORE, 2016).

Para além da alta sensibilidade dos sensores piezoelétricos a deformação quando acoplados à superfície de um componente estrutural, De Lima (2013), destaca que de forma isolada materiais/sensores piezoelétricos apresentam alta sensibilidade a deformação.

No que diz respeito aos resultados obtidos para o volume de 5 L, para o primeiro ensaio, a tensão de saída resultante foi de 61,6720 mV, enquanto para o segundo houve decréscimo, acarretando em uma tensão de 52,6903 mV.

A disparidade entre os dados obtidos para os ensaios pode estar associada a questões naturais, a exemplo do vento, no qual o mesmo pode ser responsável por provocar oscilação no sensor piezoelétrico, o qual está em um recipiente aberto.

Nesta conjuntura, Sun *et al.* (2018), destacam que a coleta de energia vibracional induzida por fluido geralmente envolve a extração de energia eólica em pequena escala, corroborando assim, com a hipótese da autora.

No tocante ao volume de 7 L, obteve-se dados para a tensão semelhantes, em que referente ao primeiro ensaio experimental a tensão de saída foi de 50,2039 mV enquanto para o segundo ensaio experimental de 50,1077 mV, mantendo-se relativamente estável nos dois ensaios.

Para além disso, durante a realização dos ensaios experimentais concernentes a todos os volumes em estudo foi observado que no início da passagem de água pelo corpo cilíndrico havia maior oscilação, resultando em picos iniciais de tensão maiores.

Após isso, constatou-se que o corpo cilíndrico era deslocado até uma posição e mantinha-se nela por um período de tempo, com menor oscilação, provocando estabilidade na tensão de saída.

Posteriormente, próximo ao volume final de esvaziamento foi verificado que o corpo cilíndrico sofria novamente maior oscilação, uma vez que, saía de sua posição estável e retornava até a posição inicial, acarretando em picos de tensão maiores ao final de cada ensaio experimental.

Em razão disso, Pobering *et al.* (2009) salientam que a oscilação pode ser induzida por um corpo responsável por perturbar o fluxo, de forma semelhante a um mastro de bandeira que força a mesma a tremular ao vento.

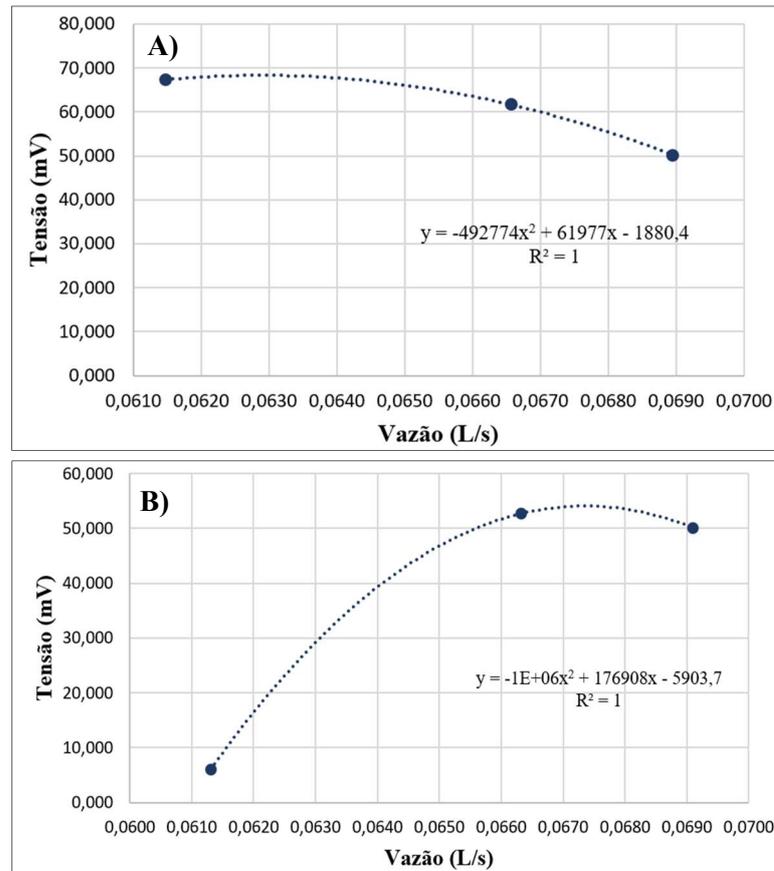
Isto posto, os autores destacam que piezoelétricos em vigas engastadas que funcionam como bandeira podem ser conectados a corpos cilíndricos, sendo assim, forçados a se mover para cima e para baixo.

Os mesmos autores, destacam que se a estrutura de viga engastada entre outros fatores for muito longa podem levar a curvatura simultânea para cima e para baixo em diferentes posições, levando à uma neutralização das cargas, não sendo adequado.

De forma semelhante, esse fato pode ser observado durante a realização dos ensaios experimentais, com base na trajetória de deslocamento do corpo cilíndrico de sua posição inicial.

A partir dos dados expressos da Tabela 3 e de forma complementar, os gráficos concernentes a vazão em litros por segundo (L/s) e tensão de saída em milivolts (mV) estão dispostos nos Gráficos 1 A) e B), para o primeiro e segundo ensaio experimental de forma respectiva.

Gráfico 1 – Tensões de saída



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme expresso pelo Gráficos 1 A), referente ao primeiro ensaio experimental, a medida em que há o aumento do volume e conseqüentemente da vazão do fluido, há o decréscimo da tensão de saída. Por conseguinte, a linha de tendência que se ajusta a esses dados é quadrática, apresentando um ajuste dos dados de 1 ou 100 %, conforme o coeficiente de determinação.

No que tange o Gráfico 1 B), referente ao segundo ensaio experimental, quanto maior o volume de armazenamento e conseqüentemente vazão, há o aumento da tensão de saída. Contudo, após o pico máximo de tensão em aproximadamente 0,0675 L/s a tensão tende ao decaimento. O ajuste dos dados experimentais relativo ao segundo ensaio experimental é de ordem quadrática, havendo um ajuste de 1 ou 100% dos dados em relação a linha de tendência, conforme explicitado pelo coeficiente de determinação.

No que diz respeito ao parâmetro relativo a velocidade do fluido, a mesma fora calculada para as distintas seções que compreendem diâmetros de tubulações discrepantes, sendo elas de 25 mm e 20 mm. Neste âmbito, as velocidades do fluido referente a seção de 25 mm para ambos ensaios experimentais estão contidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Velocidades para a seção de 25 mm

Volume de armazenamento (L)	Vazão (L/s)		Velocidade (m/s)	
	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio I	Ensaio II
3	0,06148	0,06131	0,1213	0,1210
5	0,0666	0,0663	0,1314	0,1309
7	0,0690	0,0691	0,1361	0,1364

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Da mesma forma, os dados de velocidade do fluido respectivas a seção de 20 mm, conjuntamente com a tensão encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Velocidade para a seção de 20 mm

Volume de armazenamento (L)	Vazão (L/s)		Velocidade (m/s)		Tensão (mV)	
	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio I	Ensaio II
3	0,06148	0,06131	0,1957	0,1951	67,3763	6,0333
5	0,0666	0,0663	0,2119	0,2111	61,6720	52,6903
7	0,0690	0,0691	0,2195	0,2199	50,2039	50,1077

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

De acordo com os dados expressos nas Tabelas 4 e 5, referente as velocidades de escoamento do fluido nas seções de 25 mm e 20 mm, verificou-se que as mesmas são similares para ambos os ensaios. À vista disso, observa-se a elevação da velocidade do fluido quando o mesmo passa da seção de maior diâmetro para a de menor.

Esse fato pode ser explicado a partir da Equação da Continuidade, em que a velocidade do fluido aumenta quando a área da seção reta através do qual o fluido escoar é reduzida (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Ademais, esse conceito é aplicado para fluidos ideais que escoam em canos. Entretanto, quando aplicados a fluidos reais seus valores são próximos da realidade com margem de erro pequena (AMORIN *et al.*, 2017).

Os dados referentes às velocidades do fluido para a seção de 20 mm são de extrema relevância, uma vez que, são essas que perturbam incisivamente o corpo cilíndrico acarretando em tensão. Assim, as mesmas variam em média entre 0,19 m/s a 0,21 m/s para os três volumes de armazenamento.

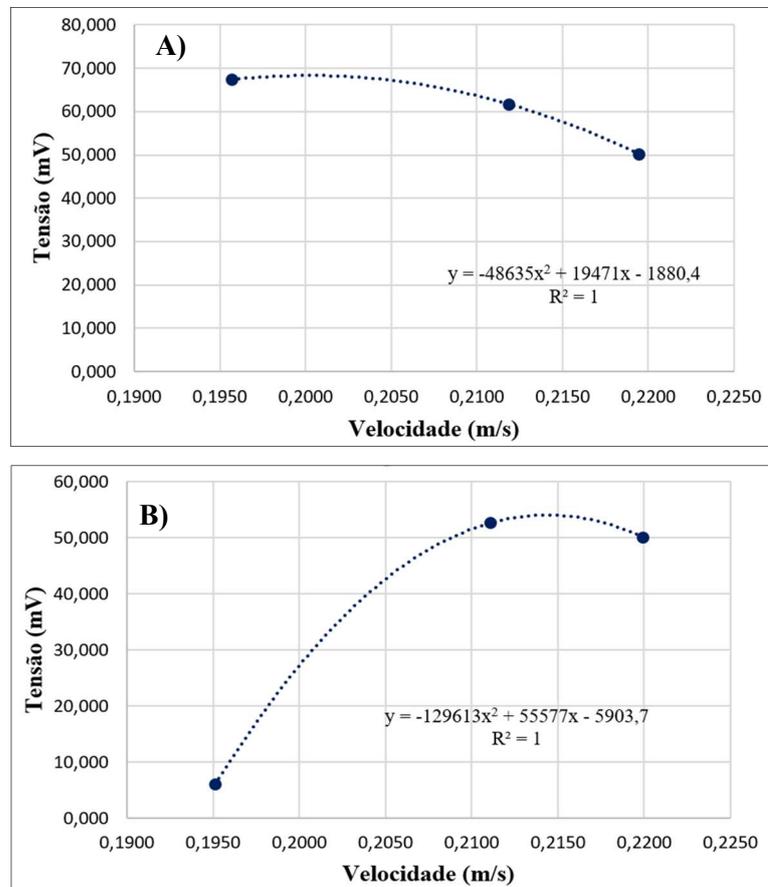
A partir de estudos semelhantes presentes na literatura, constatou-se que para velocidades compreendidas entre 0,0 a 0,20 m/s a tensão de saída é de 0,62 V, conforme exemplificado por de Sui *et al.* (2023).

Para além disso, Pobering *et al.* (2009), destacam que na faixa de velocidade de 0,0 a 0,40 m/s a tensão de saída é inferior a 10 mV, na qual especificamente de 0,0 a 0,20 m/s, faixa essa que compreende as obtidas no estudo, a tensão é de aproximadamente 0,50 mV.

Conforme evidenciado pelos dados relativos as tensões obtidas na Tabela 5, a ordem de grandeza de todas tensões de saída obtidas são de milivolts, apresentando variação com os dados presentes na literatura para configurações experimentais que fazem uso de coletores de energia acoplados a corpos cilíndricos na presença do fluido água.

Esse fato se deve, as disparidades das configurações experimentais, tipos dos sensores e materiais piezoelétricos, entre outras condições que possam a interferir na obtenção dos dados. Deste modo, os Gráficos 2 A) e B) relacionam a velocidade do fluido (m/s) e tensão (mV) para o primeiro e segundo ensaio de forma respectiva.

Gráfico 2 – Velocidade e tensões de saída



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

De acordo com o Gráfico 2 A), quando há o aumento da velocidade de escoamento do fluido há a diminuição da tensão de saída e o ajuste dos dados é quadrático com coeficiente de determinação de 1 ou 100%, semelhantemente ao ocorrido no Gráfico 1 A).

Do mesmo modo, para o Gráfico 2 B), com a elevação da velocidade do fluido há o aumento da tensão de saída até o pico de tensão, o qual ocorre em aproximadamente 0,2170 m/s. Após a observância do pico de tensão, há o decréscimo da tensão de saída, análogo ao Gráfico 2 B). O ajuste dos dados é quadrático.

Conforme explicitado no estudo Abdelkefi (2016), para as vibrações/oscilações induzidas por vórtices, há regiões de pré-sincronização, sincronização e de pós-sincronização. Na região de pré-sincronização a velocidade e a tensão são baixas.

Contudo na região de sincronização para um valor ótimo de velocidade há o pico máximo de tensão. Por fim, na região de pós-sincronização há o decaimento da tensão com o aumento da velocidade conforme observado no Gráficos 2 B).

Segundo Sui *et al.* (2023), independente do coletor de energia subaquático em baixa velocidade, a tensão de saída após a estabilização da vibração/oscilação está na forma de uma onda senoidal periódica.

De acordo com os mesmos autores, com a elevação da velocidade há conseqüente elevação da tensão de saída até um pico máximo, havendo posteriormente o decréscimo da mesma, consideração essa que vai ao encontro do que fora descrito por Abdelkefi (2016). Ademais, acredita-se que se houvessem mais dados experimentais para a velocidade de escoamento do fluido e tensão gerada, os dados apresentar-se-iam de forma semelhante.

Em suma, a maioria dos coletores de energia piezoelétrica de vibração/oscilação induzida por vórtices são provenientes de um único coletor de energia piezoelétrico. Contudo, no contexto prático, serão necessários ao mesmo tempo um grupo de coletores de energia para aproveitar melhor o espaço e gerar mais energia (SHAN *et al.*, 2016).

4.2 ALIMENTAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE BAIXO CONSUMO

A fim de investigar a eficiência energética para a alimentação de dispositivos de extra e baixo consumo foi realizada uma comparação entre as voltagens médias de saída para os respectivos volumes armazenados com a tensão necessária para o carregamento de dispositivos eletrônicos, a exemplo de telefones celulares e tablets.

Neste contexto, sabe-se que a tensão necessária para carregar esses dispositivos é de 5 V (PRASAD; TRIPATHI, 2021). Dessa forma, na Tabela 6 estão dispostas a quantidade

necessária de sensores piezoelétricos respectivo a cada volume de armazenamento para suprir a demanda de carregamento de dispositivos eletrônicos, bem como a viabilidade econômica para a implementação desse sistema, dispondo como base o preço unitário de R\$ 30,23 do sensor piezoelétrico do tipo PVDF modelo LDT0 – 028K, presente na plataforma *online* de compras RS.

Tabela 6 – Viabilidade econômica

Volume de armazenamento	Média da tensão de saída – ensaio I e II		Quantidade de sensores	Custo
	Litro (L)	Milivolt (mV)		
3	36,7048	0,0367048	137	4.141,51
5	57,1812	0,0571812	88	2.660,24
7	50,1558	0,0501558	100	3.023,00

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme os dados presentes na Tabela 6, a média da tensão de saída para ambos os ensaios é baixa, insuficiente para o carregamento de dispositivos eletrônicos que necessitam de 5 V ou mais.

Sendo assim, é necessária uma quantidade alta de sensores para suprir essa demanda, acarretando em um custo elevado quando comparado a outras tecnologias que fazem uso de matrizes renováveis, como a solar e eólica que apresentam tensão de saída superior.

A respeito disso, Nascimento (2019), obteve em seus estudos acerca do sistema de *energy harvesting* empregado a estruturas bioinspiradas, tensões de 4,70 V, 3,52 V e 1,92 V para modelos de folha artificial I, folha triangular em I e folha triangular em L de maneira respectiva.

Da mesma forma, Pauli (2021), em seu estudo de comparação do potencial de geração de energia elétrica para sistemas solares fotovoltaicos utilizando espelhos e rastreador solar, obteve tensões máximas de 3,85 V, 3,84 V e 4,00 V para os painéis branco, espelho e rastreador de modo respectivo.

Assim, conforme presente na literatura, a grande maioria dos sistemas de coleta de energia piezoelétrica opera na escala de micro à mili de tensão e potência, sendo excelentes para pequenos dispositivos, incluindo eletrônicos embutidos, dispositivos biomédicos implantados, nós de sensores sem fio e *gadgets* (NAQVI *et al.*, 2022).

De forma complementar, as aplicações de dispositivos piezoelétricos para aproveitamento da energia no fluxo de fluidos, como vento e água são de extrema importância. O fluxo dos

fluidos tem alto potencial para a geração de energia elétrica no canal e na tubulação. De tal maneira, estão sendo desenvolvidos estudos acerca do movimento das ondas do mar como recurso de energia alternativa para obter energia elétrica, sendo capaz de suprir pequenas aplicações elétricas, ampliando a disponibilidade energética (HAMLEHDAR; KASAEIAN; SAFAEI, 2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como intuito a investigação da eficiência de geração energética a partir da captação e armazenamento de água pluvial quando empregue o sensor piezoelétrico do tipo PVDF modelo LDT0 – 028K. Neste contexto, a partir dos ensaios experimentais conduzidos inferiu-se que a tensão máxima de saída obtida é de 67,3763 mV para o volume de armazenamento de 3 L, seguido de 61,6720 mV para 5 L, no primeiro ensaio experimental.

No entanto, as tensões geradas são insuficientes para o carregamento de dispositivos como celulares, tablets, dispositivos esses que requerem uma tensão elevada de 5 V. Entretanto, torna-se uma alternativa viável para dispositivos de baixo consumo que operam na escala de micro à mili de tensão e potência.

Ademais, verificou-se que para suprir demandas de tensão corriqueiras no cotidiano, a implantação do sistema torna-se inviável, devido a necessidade de um elevado número de sensores piezoelétricos, acarretando em um elevado custo.

Para além disso, o presente estudo pode vir a contribuir para a ampliação e complementação da disponibilidade energética para suprir pequenas demandas de energia em regiões de menos favorecidas por outras fontes de energia.

Por fim, acredita-se que a eficiência da geração de energia piezoelétrica pode ser melhorada a partir de alterações nas condições e configurações experimentais, vindo assim a superar os obstáculos encontrados, contribuir e configurar uma plausível alternativa de energia limpa para o provisão energético. Não obstante, sugere-se o estudo e pesquisa futura contínua para a consolidação e evolução do método para além das desenvolvidas acerca da captação de energia de fluxos em canais, riachos e rios.

REFERÊNCIAS

ABDELKEFI, A. **Aeroelastic energy harvesting: a review**. International Journal Of Engineering Science, [S.L.], v. 100, p. 112-135, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijengsci.2015.10.006>. Acesso em: 10/01/2023.

ACE CORTEX. **GrowthInsights Energia renovável**, 2021. 25 p. Disponível em: <https://www.acecortex.com.br/wp-content/uploads/2021/06/GrowthInsights-Energia-Renovavel.pdf>. Acesso em: 11/05/2022.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA – IEA. **Renováveis**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. Acesso em: 20 jun. 2022.

AGÊNCIA INTERNACIONAL PARA AS ENERGIAS RENOVÁVEIS - IRENA. **The Energy Progress Report 2021: renewable energy**, 2021. 2 p. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-sdg7-the-energy-progress-report-2021>. Acesso em: 05/05/2022.

ALRWASHDEH, Saad S. **Energy sources assessment in Jordan**. Results In Engineering, [S.L.], v. 13, p. 100329, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100329>. Acesso em: 10/06/2022.

AMORIM, Emerson Lopes de et al. **Equação da continuidade aplicada ao Cálculo de Vazão do igarapé São Lourenço do Município de Cantá**. Revista Multidisciplinar Pey Këyo Científico-ISSN 2525-8508, v. 2, n. 2, 2017. Disponível em: <http://revistaadmmade.estacio.br/index.php/pkcroraima/article/view/3827/1650>. Acesso em: 12/01/2023.

ANCHAN, Sanjith S.; PRASAD, H.C. Shiva. **Feasibility of roof top rainwater harvesting potential - A case study of South Indian University**. Cleaner Engineering And Technology, [S.L.], v. 4, p. 100206, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clet.2021.100206>. Acesso em: 05/07/2022.

ARAÚJO, Gabrielle Souza de; MENDES, Luiz Fernando Rosa. **Energia renovável ou energia “limpa”? Uma busca pela percepção conceitual nos alunos do curso técnico em Meio Ambiente**. Revista Vértices, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 408-427, 7 dez. 2018. Essentia Editora. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/6257/625767802013/625767802013.pdf>. Acesso em: 20/07/2022.

ARTICULAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO – ASA. **Acesso à água para populações do semiárido brasileiro: proposta da sociedade civil**. Disponível em: https://www.asabrasil.org.br/acervo/publicacoes?artigo_id=10981&start=5. Acesso em: 23/07/2022.

ARTICULAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO - ASA. **Ações P1MC**. Disponível em: <https://www.asabrasil.org.br/acoes/p1mc>. Acesso em: 12/07/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.844: Instalações prediais de águas pluviais**. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.527: Água da chuva - aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - requisitos**. Rio de Janeiro, 2007.

BAO, Bin; CHEN, Wen; WANG, Quan. **A piezoelectric hydro-energy harvester featuring a special container structure**. *Energy*, [S.L.], v. 189, p. 116261, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.116261>. Acesso em: 01/08/2022.

BAO, Bin; WANG, Quan. **A rain energy harvester using a self-release tank**. *Mechanical Systems And Signal Processing*, [S.L.], v. 147, p. 107099, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107099>. Acesso em: 15/06/2022.

BERTONI, Juan Carlos; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Precipitação**. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (org.). **Hidrologia ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Ufgrs, 2001. p. 1-469.

BICY, K; GUEYE, Amadou Belal; ROUXEL, Didier; KALARIKKAL, Nandakumar; THOMAS, Sabu. **Lithium-ion battery separators based on electrospun PVDF: a review**. *Surfaces And Interfaces*, [S.L.], v. 31, p. 101977, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101977>. Acesso em: 25/08/2022.

BP. **BP Energy Outlook: 2019 edition**, 2019. 73 p. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>. Acesso em: 10/05/2022.

BRASIL. **Boletim informativo nº 19** de fevereiro de 2019. Programa cisternas, Ministério da Cidadania, DF, 2019.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia (org.). **Atlas de Eficiência Energética: Brasil, 2021**. Relatório de indicadores. Brasília, 2021. 83 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf. Acesso em: 01/06/2022.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **BEN Relatório Síntese 2022: ano base 2021**. Brasília, 2022. 67 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 30/06/2022.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia (org.). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica: ano base 2021**. Brasília, 2021. 255 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf. Acesso em: 01/06/2022.

BRASIL. **Lei nº 9.433** de 09 de janeiro de 1997. Instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, 1997.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 2.457** de 04 de outubro de 2010. Altera a Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade), e a Lei nº 4.380, de 21 de agosto de 1964, que dispõe sobre o Sistema Financeiro da Habitação, para instituir mecanismos de estímulo à instalação de sistemas de coleta, armazenamento e utilização de águas pluviais em edificações públicas e privadas. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 3.322** de 06 de março de 2004. Dispõe sobre a obrigatoriedade de reservatórios ou cisternas para o acúmulo de água da chuva no território brasileiro. Brasília, DF, 2004.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 411, de 10 de julho de 2007**. Institui mecanismos de estímulo à instalação de sistemas de coleta, armazenamento e utilização de águas pluviais e de reutilização de águas servidas em edificações públicas e privadas. Brasília, DF, 2007.

BRAZ, Carlos Alberto; RODRIGUES, Reinaldo Luan; SIQUEIRA, Hugo Valadares. **Geração de energia elétrica por meio de fontes de energias renováveis: uma revisão sistemática da literatura sobre energia eólica**. Revista Gestão Industrial, v. 13, n. 1, 2017. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/5547/5487>. Acesso em: 02/07/2022.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. Pearson Educación, 2008.

CAO, Yangsen; ZHANG, Fan; SHA, Aimin; LIU, Zhuangzhuang; LI, Jiarong; HAO, Yun. **Energy harvesting performance of a full-pressure piezoelectric transducer applied in pavement structures**. Energy And Buildings, [S.L.], v. 266, p. 112143, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112143>. Acesso em: 03/07/2022.

CERRO LARGO. **Decreto 1.976**, de 02 de agosto de 2012. Aprova o plano municipal de saneamento básico. Cerro Largo, RS, 2012.

CERRO LARGO. Lei nº 2.276 de 15 de dezembro de 2010. **Institui o plano diretor de desenvolvimento integrado municipal, estabelece diretrizes de desenvolvimento no município de cerro largo e dá outras providências**. Cerro Largo, RS, 2010.

DAMKE Luana Ruwer. **Análise da eficiência energética do material polímero piezoelétrico: um novo conceito de energia renovável**. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis) -UFFS, Cerro Largo, 75f, 2019. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/2996>. Acesso em: 05/08/2022.

DEFIYANI, Eka; PANGARIBUAN, Porman; DARLIS, Denny. **Implementation of raindrops energy collector board using piezoelectric transducer**. Matic Web Of Conferences, [S.L.], v. 197, p. 11011, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201819711011>. Acesso em: 05/08/2022.

DERUYCK, Margot; BOVA, Silvia; VALLERO, Greta; MEO, Michela; MARTENS, Luc; JOSEPH, Wout. **Designing a hybrid renewable energy source system to feed the wireless access network**. Sustainable Energy, Grids and Networks, [S.L.], v. 31, p. 100722, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.segan.2022.100722>. Acesso em: 05/08/2022.

DOGINI, Leandro Lyra Braga; DINO, Ramide Miranda. **Energy harvesting: teoria e aplicações**. 2015. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Ciencia e

Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/8234>. Acesso em: 04/05/2022.

DORIA, A., FANTI, G., & MORO, F. **Response of a piezoelectric harvester to impacts generated by rain-drops**. Paper presented at the 2019 14th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2019, doi:10.1109/EVER.2019.8813527. Acesso em: 05/05/2022.

DORIA, Alberto; FANTI, Giulio; FILIPI, Gino; MORO, Federico. **Development of a Novel Piezoelectric Harvester Excited by Raindrops**. Sensors, [S.L.], v. 19, n. 17, p. 3653, 22 ago. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s19173653>. Acesso em: 08/06/2022.

DU, Xiaozhen; ZHAO, Yan; LIU, Guilin; ZHANG, Mi; WANG, Yu; YU, Hong. **Enhancement of the Piezoelectric Cantilever Beam Performance via Vortex-Induced Vibration to Harvest Ocean Wave Energy**. Shock And Vibration, [S.L.], v. 2020, p. 1-11, 14 set. 2020. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/8858529>. Acesso em: 08/06/2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022**: ano base 2021. Brasília, 2022. 6 p. Disponível em: 11nq.com/0iZbM. Acesso em: 10/05/2022.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. International Energy Agency. Organização Internacional de Energia. **Renováveis**. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. Acesso em: 01/07/2022.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. Jessica Blunden. American Meteorological Societ. **State of the climate in 2020: special supplement to the bulletin of the american meteorological society**. In: ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. VOSE. R.S., et al. American Meteorological Societ. **Precipitation**, 2021. Cap. 4. p. 56-57. Disponível em: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00755/86744/92215.pdf>. Acesso em: 01/04/2022.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. U.S Energy Information Administration. **Renewable energy explained**. 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/#:~:text=Renewable%20energy%20is%20energy%20from,Wood%20and%20wood%20waste>. Acesso em: 31/05/2022.

FERREIRA, Lindomayara França; SANTANA, José Ricardo de; RAPINI, Márcia Siqueira; MOURA, Fábio Rodrigues de. **Financiamento à pesquisa em energia renovável no Brasil: uma análise a partir do fundo setorial de energia**. Nova Economia, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 505-537, maio 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6351/6984>. Acesso em: 31/05/2022.

GIL, Antonio Carlos. Como classificar as pesquisas? In: GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Rio de Janeiro: Atlas, 2022. Cap. 4. p. 40-57.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados**, [S.L.], v. 21, n. 59, p. 7-20, abr. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142007000100003>. Acesso em: 01/06/2022.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

GOLDENFUM, Joel Avruch. **Reaproveitamento de águas pluviais**. Porto Alegre, 2006. Disponível em: encurtador.com.br/evyR4. Acesso em: 20/07/2022.

GOMES, Uende Aparecida Figueiredo et al. **A captação de água de chuva no Brasil: novos aportes a partir de um olhar internacional**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 1, p. 7-16, 2014. Disponível em: 11nq.com/nnCbk. Acesso em: 26/07/2022.

GREESHMA, M.G.; RAJEEV, Sreenidhi Prabha. **Optimising proof mass for cantilever based piezoelectric energy harvester**. Materials Today: Proceedings, [S.L.], v. 59, p. 623-627, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.179>. Acesso em: 17/06/2022.

GRINGS, V. H.; DE OLIVEIRA, P. A. V. **Cisternas para armazenagem de água da chuva**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2005. Folder. Disponível em: http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_18q82c2e.pdf. Acesso em: 26/07/2022.

GYIMAH, Justice; YAO, Xilong; TACHEGA, Mark Awe; HAYFORD, Isaac Sam; OPOKU-MENSAH, Evans. **Renewable energy consumption and economic growth: new evidence from ghana**. Energy, [S.L.], v. 248, p. 123559, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2022.123559>. Acesso em: 05/06/2022.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física**. Vol. 2. 9 ed. Editora LTC, 2012.

HAMLEHDAR, Maryam; KASAEIAN, Alibakhsh; SAFAEI, Mohammad Reza. **Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: a critical review**. Renewable Energy, [S.L.], v. 143, p. 1826-1838, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.078>. Acesso em: 08/09/2022.

HAO, Guannan; DONG, Xiangwei; LI, Zengliang. **A novel piezoelectric structure for harvesting energy from water droplet: theoretical and experimental studies**. Energy, [S.L.], v. 232, p. 121071, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121071>. Acesso em: 14/010/2022.

HARB, Adnan. **Energy harvesting: state-of-the-art**. Renewable Energy, [S.L.], v. 36, n. 10, p. 2641-2654, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>.
HARVEY, James. A. Smart Materials. In: KUTZ, Myer (ed.). **Handbook of materials selection**. Canadá: John Wiley & Sons, 2022. Cap. 13. p. 401-418.

HOSSAIN, M.s.; MADLOOL, N.A.; RAHIM, N.A.; SELVARAJ, J.; PANDEY, A.K.; KHAN, Abdul Faheem. **Role of smart grid in renewable energy: an overview**. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v. 60, p. 1168-1184, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.098>. Acesso em: 15/10/2022.

HU, Jeffrey; SONG, Yuqi. **Piezoelectric modulus prediction using machine learning and graph neural networks**. Chemical Physics Letters, [S.L.], v. 791, p. 139359, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpllett.2022.139359>. Acesso em: 03/10/2022.

HU, Xiaobin; LI, Ying; XIE, Xiangdong. **A study on a U-shaped piezoelectric coupled beam and its corresponding ingenious harvester.** Energy, [S.L.], v. 185, p. 938-950, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.084>. Acesso em: 05/11/2022.

ILYAS, Mohammad Adnan; SWINGLER, Jonathan. **Piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts.** Energy, [S.L.], v. 90, p. 796-806, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.114>. Acesso em: 05/11/2022.

KIM, Gi-Woo; KIM, Jaehwan; KIM, Joo-Hyung. **Flexible piezoelectric vibration energy harvester using a trunk-shaped beam structure inspired by an electric fish fin.** International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing, [S.L.], v. 15, n. 9, p. 1967-1971, set. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-014-0552-1>. Acesso em: 08/10/2022.

KOVALESKI, Aurélio; COUTINHO, Aparecido dos Reis. **Avaliação do ciclo de vida energético do processo de fabricação de embalagens metálicas: Estudo de caso para latas de bebidas.** Ponta Grossa: Aya, 2020. 83 p.

LI, Di; WANG, Chun; CUI, Xinhui; CHEN, Dongdong; FEI, Chunlong; YANG, Yintang. **Recent progress and development of interface integrated circuits for piezoelectric energy harvesting.** Nano Energy, [S.L.], v. 94, p. 106938, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.106938>. Acesso em: 05/11/2022.

LIMA, Karlla Karolinne França *et al.* **Eficiência energética e conservação de energia na indústria do petróleo.** 2014. Disponível em: 11nq.com/xvovq. Acesso em: 05/05/2022.

LIMA, W. B. **Transdutores de deformação à base de sensores piezoelétricos.** 2013. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://docplayer.com.br/15565046-Transdutores-de-deformacao-a-base-de-sensores-piezoelétricos.html>. Acesso em: 09/01/2023.

LIU, Xiao; REN, Zixiao; NGO, Huu Hao; HE, Xu; DESMOND, Peter; DING, An. **Membrane technology for rainwater treatment and reuse: a mini review.** Water Cycle, [S.L.], v. 2, p. 51-63, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watcyc.2021.08.001>. Acesso em: 06/09/2022.

LU, Lijun; DING, Wenqing; LIU, Jingquan; YANG, Bin. **Flexible PVDF based piezoelectric nanogenerators.** Nano Energy, [S.L.], v. 78, p. 105251, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105251>. Acesso em: 05/08/2022.

MA, Dong; LAN, Guohao; HASSAN, Mahbub; HU, Wen; DAS, Sajal K. **Sensing, Computing, and Communications for Energy Harvesting IoTs: a survey.** Ieee Communications Surveys & Tutorials, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 1222-1250, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/comst.2019.2962526>. Acesso em: 02/08/2022.

MARINOSKI, Ana Kelly. **Aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis em instituição de ensino: estudo de caso em Florianópolis - SC.** 2007. 118 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em:

https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/tccs/TCC_Ana_Kelly_Marinoski.pdf. Acesso em: 11/07/ 2022.

MARINOSKI, Ana Kelly; GHISI, Enedir. **Aproveitamento de água pluvial para usos não potáveis em instituição de ensino: estudo de caso em Florianópolis – SC**. Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/5355/3283>. Acesso em: 15/07/2022.

MASSONE, Ana Carolina Cellular; REIS, Sabrina de Oliveira; VIOLA, Flavio Maggessi. **Colheita de energia vibracional utilizando materiais piezoelétricos**. Conhecimento & Diversidade, [S.L.], v. 11, n. 25, p. 63, 18 jun. 2020. Centro Universitario La Salle - UNILASALLE. <http://dx.doi.org/10.18316/rcd.v11i25.6394>. Acesso em: 18/07/2022.

MATTARELLI, Maurizio et al. **Underwater piezoelectric energy harvester**. TIC-ENERGIA. Disponível em: https://www.nanoenergyletters.com/files/nel/ICT-Energy_Letters_12.pdf#page=13. Acesso em: 03/01/2023.

MEASUREMENT SPECIALTIES (Estados Unidos da América). **Piezo Film Sensors: technical manual. Technical Manual**. Disponível em: <https://www.electronicaembajadores.com/datos/pdf2/ss/sspz/MSI-techman.pdf>. Acesso em: 15/01/2023.

MENDONÇA, Ricardo Jorge Galambas. **Desenvolvimento de um Sistema para a Medição do Efeito Piezoelétrico**. 2019. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Física, Física, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/104890>. Acesso em: 05/06/2022.

MISHRA, Suvrajyoti; UNNIKRIISHNAN, Lakshmi; NAYAK, Sanjay Kumar; MOHANTY, Smita. **Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications: a systematic review**. Macromolecular Materials And Engineering, [S.L.], v. 304, n. 1, p. 1800463, 27 nov. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/mame.201800463>. Acesso em: 10/08/2022.

MORAES JÚNIOR, Tarcísio de Oliveira. **Sistema de captação de energia (Energy Harvesting) por dispersão magnética em linha de potência**. 2013. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5294>. Acesso em: 01/05/2022.

MORUZZI, Rodrigo Braga; LEÃO, Cintia Loturco Pinheiro. **Estimativa da correção do coeficiente de retorno de esgoto sanitário em habitações com sistemas de aproveitamento de água pluvial: estudo de caso da cidade de Bauru, sp**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 45-53, fev. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019151601>. Acesso em: 01/05/2022.

MOTA, Bruno Cavalcante. **Captação e geração de energia no pavimento rodoviário com a aplicação de células piezoelétricas**. 2021. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de E Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/60895>. Acesso em: 05/06/2022.

MOURA, Cassiano Rodrigues; CARLINI, Giovanni Conrado; SILVA, Cristiano da. **Desenvolvimento de um dispositivo de fixação baseado em diretrizes de projeto para confiabilidade**. Revista Tecnologia, [S.L.], v. 42, n. 1, p. 1-13, 2021. Fundação Edson Queiroz. <http://dx.doi.org/10.5020/23180730.2021.10634>. Acesso em: 10/08/2022.

MOURA, Priscila Gonçalves; ARANHA, Felipe Nicolau; HANDAM, Natasha Berendonk; MARTIN, Luis Eduardo; SALLES, Maria José; CARVAJAL, Elvira; JARDIM, Rodrigo; SOTERO-MARTINS, Adriana. **Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 791-808, dez. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-4152202020180201>. Acesso em: 22/07/2022.

NAQVI, Areeba; ALI, Ahsan; ALTABEY, Wael A.; KOURITEM, Sallam A.. **Energy Harvesting from Fluid Flow Using Piezoelectric Materials: a review**. Energies, [S.L.], v. 15, n. 19, p. 7424, 10 out. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en15197424>. Acesso em: 10/01/2023.

NASCIMENTO, Alessandro Cassiano Vargas do. **Sistema de Energy Harvesting empregado a estruturas bioinspiradas usando dispositivo Piezoelétrico PVDF**. 2019. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/3551>. Acesso em: 08/01/2023.

NERY, João Fabrício da Costa Gomes; PASTORE, Pedro Rogerio Gonçalves. **Método não invasivo para medição de vazão utilizando sensores piezoelétricos**. 2017. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/3597>. Acesso em: 09/01/2023.

OLIVEIRA, Ana Paula Moreira de; FUGANHOLI, Nicola Sgrignoli; CUNHA, Pedro Henrique de Souza; BARELLI, Vivian Aparecida; BUNEL, Maxime Philippe Michel; NOVAZZI, Luís Fernando. **Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis**. The Journal Of Engineering And Exact Sciences, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 0163-0169, 2 mar. 2018. Universidade Federal de Vicosa. <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl4iss1pp0163-0169>. Acesso em: 05/08/2022.

OMNEXUS (Estados Unidos da América). **Stiffness - Mechanical Properties of Plastics Flexural Modulus or Bend Modulus**. 2023. Disponível em: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/stiffness>. Acesso em: 17 jan. 2023.

Oo, Naw Blessing; WIPATAPHAN, Phatchara; WICHEAN, Thanate Na; PANOMSUWAN, Gasidit; PEWNIM, Naray; JONGPRATEEP, Oratai; TECHAPIESANCHAROENKIJ, Ratchatee. **Fabrication, structural and piezoelectric force microscopy analyses of nanorod ZnO-PVDF thin films**. Materials Today: Processings, Thailand, p. 1-5, 13 jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.002>. Acesso em: 10/07/2022.

PALOMBA, Ilaria; DORIA, Alberto; MARCONI, Edoardo; BOTTIN, Matteo; ROSATI, Giulio. **Vibration Energy Harvesting from Raindrops Impacts: experimental tests and interpretative models**. Applied Sciences, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 3249, 23 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app12073249>. Acesso em: 05/09/2022.

PAULI, Cristiano Rauber. **Estudo e comparação do potencial de geração de energia elétrica para sistemas solares fotovoltaicos utilizando espelhos e rastreador solar**. 2021. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/5345>. Acesso em: 10/01/2023.

PERLINGEIRO, Antônio Ramos; PIMENTA, Gilberto Maia; SILVA, Salviano Evaristo da. **Geração de energia através de materiais piezoelétricos**. 2016. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Educação Superior, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: encurtador.com.br/fuzY2. Acesso em: 31/07/2022.

PETROVIC, M. Vijatovic; CORDERO, F.; MERCADELLI, E.; BRUNENGO, E.; ILIC, N.; GALASSI, C.; DESPOTOVIC, Z.; BOBIC, J.; DZUNUZOVIC, A.; STAGNARO, P. **Flexible lead-free NBT-BT/PVDF composite films by hot pressing for low-energy harvesting and storage**. Journal Of Alloys And Compounds, [S.L.], v. 884, p. 161071, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161071>. Acesso em: 11/07/2022.

POZO, Borja; GARATE, José Ignacio; ARAUJO, José Ángel; FERREIRO, Susana. **Energy Harvesting Technologies and Equivalent Electronic Structural Models – Review**. Electronics 8, 486, p. 1-31, 2019. doi:10.3390/electronics8050486. Acesso em: 12/07/2022.

PRASAD, Jeetendra; TRIPATHI, Ramesh Kumar. **Scale-up and control the voltage of sediment microbial fuel cell for charging a cell phone**. Biosensors And Bioelectronics, [S.L.], v. 172, p. 112767, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2020.112767>. Acesso em: 13/08/2022.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL. Universidade Federal da Paraíba (org.). **Boletim anual de precipitação no Brasil: análise a partir dos dados subsidiários do CEMADEN 2021**. Paraíba, 2022. 16 p. Disponível em: encurtador.com.br/benR3. Acesso em: 29/06/2022.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL. Universidade Federal da Paraíba (org.). **Boletim anual sobre a chuva no Brasil: análise a partir de dados de sensoriamento remoto 2021**. Paraíba, 2022. 16 p. Disponível em: encurtador.com.br/atHZ9. Acesso em: 29/06/2022.

PUSTY, Manojit; SHIRAGE, Parasharam M. **Insights and perspectives on graphene-PVDF based nanocomposite materials for harvesting mechanical energy**. Journal Of Alloys And Compounds, [S.L.], v. 904, p. 164060, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164060>. Acesso em: 30/06/2022.

RAJABI, Amir Hossein; JAFFE, Michael; ARINZEH, Treena Livingston. **Piezoelectric materials for tissue regeneration: a review**. Acta Biomaterialia, [S.L.], v. 24, p. 12-23, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2015.07.010>. Acesso em: 30/06/2022.

RANGEL, Renato Franklin. **Caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para a geração de energia elétrica**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5295/1/arquivototal.pdf>. Acesso em: 01/05/2022.

RIEGELHAUPT, Enrique Mario; PAREYN, Frans Germain Corneel. **Florestais da Caatinga: a questão energética**. In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Serviço Florestal Brasileiro. Uso sustentável e conservação dos recursos. Brasília, 2010. p. 1-370. Disponível em: encurtador.com.br/cDEJ6. Acesso em: 30/06/2022.

RIFKIN, Jeremy. **A terceira revolução industrial: como o poder lateral está transformando a energia, a economia e o mundo**. São Paulo: M.Books, 2021.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei ordinária nº 14.270** de 22 de julho de 2013. Determina que todos os prédios do Corpo de Bombeiros, localizados no Estado do Rio Grande do Sul, mantenham sistema de captação e armazenagem de água da chuva e dá outras providências. Porto Alegre, RS, 2013.

RS. **TE Connectivity Vibration Sensor**. 2023. Disponível em: <https://br.rsdelivers.com/product/te-connectivity/1002794/te-connectivity-vibration-sensor-0c-85c/8937086>. Acesso em: 17/01/2023.

S. Pobering, S. Ebermeyer, and N. Schwesinger. **Generation of electrical energy using short piezoelectric cantilevers in flowing media**. Proc. SPIE 7288, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009, 728807 (6 April 2009); <https://doi.org/10.1117/12.815189>. Acesso em: 14/01/2023.

SALAZAR, Marlon Bruno. **Demanda de energia na indústria brasileira: efeitos da eficiência energética**. 2012. 97 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Econômicas, Piracicaba, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11132/tde-15052012-094631/publico/Marlon_Bruno_Salazar_versao_revisada.pdf. Acesso em: 05/05/2022.

SANT'ANA, Daniel Richard; MEDEIROS, Lídia Batista Pereira. **Aproveitamento de Águas Pluviais e Reúso de Águas Cinzas em Edificações: padrões de qualidade, critérios de instalação e manutenção**. Brasília, 2017. 68 p. Disponível em: encurtador.com.br/bEFGV. Acesso em: 21/07/2022.

SANTA CATARINA. Paulo Armando Victória de Oliveira et al. Embrapa. **Aproveitamento da Água da Chuva na Produção de Suínos e Aves**. Concórdia, 2012. 42 p. Disponível em: http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_v7r28u3f.pdf. Acesso em: 12/07/2022.

SAUTCHÚK, Carla Araujo. **Formulação de diretrizes para implantação de programas de conservação de água em edificações**. 2004. 332 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-13122004-145038/publico/carlasautchuk.pdf>. Acesso em: 22/07/2022.

SCHONARTH, Aline de Oliveira. **Geração de energia limpa através de materiais piezoelétricos poliméricos e do vento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – UFFS, Cerro Largo, 93 f., 2017. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/1717>. Acesso em: 05/08/2022.

SHAN, Xiaobiao; SONG, Rujun; FAN, Menglong; XIE, Tao. **Energy-Harvesting Performances of Two Tandem Piezoelectric Energy Harvesters with Cylinders in Water**. Applied Sciences, [S.L.], v. 6, n. 8, p. 230, 17 ago. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app6080230>. Acesso em: 07/07/2022.

SHARMA, Saurav; KIRAN, Raj; AZAD, Puneet; VAISH, Rahul. **A review of piezoelectric energy harvesting tiles: available designs and future perspective.** Energy Conversion And Management, [S.L.], v. 254, p. 115272, fev. 2022. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115272>. Acesso em: 10/09/2022.

SILVA, Beatriz Matias; DA SILVA, Wilson Sotero Dália. **Um panorama da implantação do etanol de 3ª geração como uma fonte de energia sustentável.** Engevista, v. 21, n. 1, p. 176-192, 2019. <https://doi.org/10.22409/engevista.v21i1.13289>. Acesso em: 06/06/2022.

SILVA, Luciane Pimentel da. **Hidrologia: engenharia e meio ambiente.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 330 p.

SILVEIRA, Paula Galbiatti. **Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira.** Opinión Jurídica, [S.L.], v. 17, n. 33, p. 123-148, 2018. Universidad de Medellin.

<http://dx.doi.org/10.22395/ojum.v17n33a5>. Acesso em: 10/08/2022.

SOIN, Navneet. **Magnetic Nanoparticles—Piezoelectric Polymer Nanocomposites for Energy Harvesting.** Magnetic Nanostructured Materials, [S.L.], p. 295-322, 2018. Elsevier.

<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-813904-2.00010-3>. Acesso em: 20/07/2022.

SUI, Guangdong; SHAN, Xiaobiao; HOU, Chengwei; TIAN, Haigang; HU, Jingtao; XIE, Tao. **An underwater piezoelectric energy harvester based on magnetic coupling adaptable to low-speed water flow.** Mechanical Systems And Signal Processing, [S.L.], v. 184, p. 109729, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109729>.

Acesso em: 15/01/2023.

SUN, Weipeng; TAN, Ting; YAN, Zhimiao; ZHAO, Daoli; LUO, Xingqi; HUANG, Wenhui. **Energy harvesting from water flow in open channel with macro fiber composite.** Aip Advances, [S.L.], v. 8, n. 9, p. 095107, set. 2018. AIP Publishing.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.5035383>. Acesso em: 06/09/2022.

SUSANTI, Ai; SARI, Della Puspita; NAUZY, Muhammad Azar; WIDANINGSIH, Sri; HAMDIYANTI, Yanti; NOVIANINGSIH, Khusnul. **Rainwater Pressure Electric Generator Model Using Piezoelectric.** Indonesian Journal Of Multidisciplinary Research, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 11-16, 20 abr. 2021. Universitas Pendidikan Indonesia (UPI).

<http://dx.doi.org/10.17509/ijomr.v1i1.33666>. Acesso em: 10/10/2022.

TAO, J.X.; VIET, N.V.; CARPINTERI, A.; WANG, Q. **Energy harvesting from wind by a piezoelectric harvester.** Engineering Structures, [S.L.], v. 133, p. 74-80, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.021>. Acesso em: 10/08/2022.

TE CONNECTIVITY. Empresa de Vendas. **Ldt with crimps vibration sensor/switch.**

Disponível em: <https://www.farnell.com/datasheets/2310776.pdf>. Acesso em: 19/07/2022.

TICHÝ, Jan *et al.* **Fundamentos de sensoriamento piezoelétrico: propriedades mecânicas, dielétricas e termodinâmicas de materiais piezoelétricos.** Springer Science & Business Media, 2010.

VELOSO, Nircele da Silva Leal; MENDES, Ronaldo Lopes Rodrigues. **Aspectos legais do uso da água da chuva no Brasil e a gestão dos recursos hídricos: notas teóricas.** Bento

Gonçalves: Hhhh, 2013. 8 p. Disponível em: encurtador.com.br/hsvO3. Acesso em: 12/07/2022.

VIOLA, Fabio. **Comparison Among Different Rainfall Energy Harvesting Structures**. Applied Sciences, [S.L.], v. 8, n. 6, p. 955, 9 jun. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app8060955>. Acesso em: 05/04/2022.

WANG, Chaohui; WANG, Shuai; GAO, Zhiwei; SONG, Zhi. **Effect evaluation of road piezoelectric micro-energy collection-storage system based on laboratory and on-site tests**. Applied Energy, [S.L.], v. 287, p. 116581, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116581>. Acesso em: 05/06/2022.

WANG, Dung-An; CHAO, Chia-Wei; CHEN, Jyun-Hua. **A miniature hydro-energy generator based on pressure fluctuation in Kármán vortex street**. Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, [S.L.], v. 24, n. 5, p. 612-626, 29 nov. 2012. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389x12467517>. Acesso em: 06/07/2022.

WANG, Junlei; GENG, Linfeng; DING, Lin; ZHU, Hongjun; YURCHENKO, Daniil. **The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations**. Applied Energy, [S.L.], v. 267, p. 114902, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114902>. Acesso em: 06/07/2022.

WONG, Voon-Kean; HO, Jee-Hou; CHAI, Ai-Bao. **Piezoelectric energy harvesting in varying simulated rain conditions**. Ásia: Arpn Journal Of Engineering And Applied Sciences, 2016. Disponível em: encurtador.com.br/wFMO9. Acesso em: 31/07/2022.

YADAV, Dinesh; YADAV, Jyoti; VASHISTHA, Rajat; GOYAL, Dharminder P.; CHHABRA, Deepak. **Modeling and simulation of an open channel PEHF system for efficient PVDF energy harvesting**. Mechanics Of Advanced Materials And Structures, [S.L.], v. 28, n. 8, p. 812-826, 11 abr. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15376494.2019.1601307>. Acesso em: 30/07/2022.

ZHANG, Hongjian; WU, Yiqun; JIN, Wenting; CHEN, Wen; ZHANG, Yong. Dramatically enhanced energy harvesting capability in sandwich-structure modulated piezoelectric nanocomposites. **Materials Science In Semiconductor Processing**, [S.L.], v. 155, p. 107260, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2022.107260>. Acesso em: 30/07/2022.

ZHANG, Qianxiao; SHAH, Syed Ale Raza; YANG, Ling. **An Appreciated Response of Disaggregated Energies Consumption towards the Sustainable Growth: a debate on g-10 economies**. Energy, [S.L.], v. 254, p. 124377, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2022.124377>. Acesso em: 01/08/2022.

ZHOU, Shengxi; LALLART, Mickaël; ERTURK, Alper. **Multistable vibration energy harvesters: principle, progress, and perspectives**. Journal Of Sound And Vibration, [S.L.], v. 528, p. 116886, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116886>. Acesso em: 14/08/2022.