

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

USO DE POLÍMEROS FUNCIONAIS EM DISPOSITIVOS
PARA *ENERGY HARVESTING*

BRUNO DE OLIVEIRA MENDES

SÃO CARLOS -SP
2024

USO DE POLÍMEROS FUNCIONAIS EM DISPOSITIVOS PARA *ENERGY HARVESTING*

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Carlos Henrique Scuracchio

São Carlos-SP
2024



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Bruno de Oliveira Mendes

RA: 759046

TÍTULO: Uso de polímeros funcionais em dispositivos para energy harvesting

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 26/01/2024, 09h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio	9,0	9,5
Prof. Dr. Rafael Barbosa	9,0	9,5
Média	9,0	9,5

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio

Documento assinado digitalmente
 CARLOS HENRIQUE SCURACCHIO
Data: 05/02/2024 16:01:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Barbosa

Documento assinado digitalmente
 RAFAEL BARBOSA
Data: 05/02/2024 17:04:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e amigos como homenagem ao apoio durante toda minha graduação

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer inicialmente aos meus pais, que estiveram presentes em toda minha jornada, participando ativamente nas decisões e me apoiando desde o início. Foram fundamentais para que eu tivesse a oportunidade de entrar e finalizar os estudos em uma universidade de excelência, foram os pilares que me sustentaram durante meu período em São Carlos, serei eternamente grato a todo o apoio e auxílio que recebi. Também agradeço a minha irmã que esteve do meu lado, do modo mais próximo possível e sempre me servindo de espelho como irmã mais velha, lembrarei sempre dos conselhos, apoio mútuo e momentos felizes que tivemos juntos.

Agradeço à minha parceira, melhor amiga e namorada que se fez presente me auxiliando em diversos momentos, me orientando e apoiando em todas as decisões, ter você do meu lado foi essencial para que eu pudesse ter momentos memoráveis em minha vida, dedico este trabalho também a você.

Conto com carinho especial também a Universidade Federal de São Carlos, que me abriu as portas para que eu tivesse contato com ensino superior público de excelência, mais especificamente ao DEMa (Departamento de engenharia de Materiais) que me mostrou este universo apaixonante dos materiais e agradeço aos professores que tive o prazer de absorver parte de seus conhecimentos e ensinamentos, todos foram essenciais para a minha formação. Agradeço também à SRInter (Secretaria de Relações Internacionais) que me auxiliou com todo o processo burocrático para eu realizar meu grande sonho da realização da Mobilidade Acadêmica.

Do outro lado da cidade, também levo comigo com carinho todo o conhecimento que adquiri no meu período de iniciação científica dentro da USP (Universidade de São Paulo). Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Valtencir Zucolotto que abriu as portas do Gnano (Grupo de Nanotecnologia e Nanotoxicologia) para mim, onde fiquei cerca de três anos pesquisando com o Dr. Leonardo Miziara, no qual agradeço também a todo apoio e auxílio prestado. Neste período tive auxílio da FAPESP, (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) a quem agradeço por fomentar a pesquisa nacional e proporcionar uma forma de retorno à comunidade acadêmica.

Agradeço com muito carinho à minha República, que fez parte de toda a minha história em São Carlos, onde fiz amigos e considero como minha segunda família, levarei para sempre a Open Beach dentro do meu coração como uma peça de extrema importância para a minha evolução como pessoa, desenvolvendo habilidades interpessoais que foram essenciais para o meu desenvolvimento além de laços de amizades eternos.

Em suma, agradeço a todos os que participaram de modo direto ou indireto para a minha formação acadêmica, meu desenvolvimento pessoal e formação como pessoa. Passamos diversos momentos juntos, bons e ruins, mas a vida sem altos e baixos deixa de ser prazerosa. Por isso, levarei todos em minha memória como peças fundamentais para quem sou hoje.

Do fundo do meu coração,
Obrigado

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”

Mahatma Gandhi

RESUMO

O mundo busca modos de obter energia de uma forma mais eficiente desde que a sociedade passou a ter elevada dependência de eletricidade para as mais diversas atividades do dia a dia. Os meios tradicionais de obtenção são os que geram energia suficiente para a humanidade, no entanto, diversos movimentos diários têm um elevado potencial e acabam não sendo explorados.

Este intervalo de energia dissipada é, justamente, a demanda reprimida na qual dispositivos de captura de energia buscam atuar e foram desenvolvidos criando o conceito de *Energy Harvesting* que começou a ser estudado no século XXI a partir do desenvolvimento de nanogeradores.

Os dispositivos criados utilizam de princípios que possibilitam gerar energia elétrica como piezoelectricidade e triboelectricidade. Com isso, a escolha de materiais a serem utilizados é de extrema importância e para ampliar a gama de aplicação, polímeros são bons candidatos para o desenvolvimento dessas peças devido às suas propriedades. A utilização de nanogeradores para a captura de energia depende de características de cada material utilizado no dispositivo e no modo com que é fabricado.

Pode-se explorar energias presentes no corpo humano e na natureza, portanto, para cada uso, se faz necessário analisar a melhor forma, material e modo de funcionamento de cada dispositivo.

Estudos são desenvolvidos nas mais diversas aplicações e com diferentes possibilidades de material, no entanto, a piezoelectricidade em polímeros é majoritariamente PVDF, um material que têm a capacidade de gerar energia elétrica a partir de tensões externas, já a triboelectricidade é facilmente explorada uma vez que depende somente de dois materiais diferentes e o atrito entre eles já é capaz de separar cargas gerando uma corrente.

Portanto, o potencial de exploração de dispositivos nanogeradores a partir de triboelectricidade é grande e possibilitam o desenvolvimento de novos meios de se obter energia e para ser utilizado em todo o globo a fim de alterar o consumo mundial de energia em busca de meios mais sustentáveis e que geram menos impacto em todas as esferas.

Palavras-chave: Captura de energia. Polímeros. Piezoelectricidade. Triboelectricidade.

ABSTRACT

The world is looking for ways to obtain energy in a more efficient way since society has become highly dependent on electricity for the most diverse daily activities. The traditional means of obtaining it are those that generate enough energy for humanity, however, several daily movements have a high potential and end up not being explored.

This range of dissipated energy is precisely the repressed demand on which energy capture devices seek to act and were developed, creating the concept of Energy Harvesting, which began to be studied in the 21st century with the development of nanogenerators.

The devices use principles that make it possible to generate electrical energy such as piezoelectricity and triboelectricity. Therefore, the choice of materials to be used is extremely important and to expand the range of application, polymers are good candidates for the development of these parts due to their properties. The use of nanogenerators to capture energy depends on the characteristics of each material used in the device and the way in which it is manufactured.

You can explore energies present in the human body and in nature, therefore, for each use, it is necessary to analyse the best shape, material and way of functioning of each device.

Studies are developed in the most diverse applications and with different material possibilities, however, piezoelectricity in polymers is mostly PVDF, a material that has the ability to generate electrical energy from external loads, while triboelectricity is easily explored since it only depends on two different materials and the friction between them is already capable of separating charges, generating a current.

Therefore, the potential for exploring nanogenerator devices based on triboelectricity is great and enables the development of new ways to obtain energy and to be used across the globe in order to change global energy consumption in search of more sustainable and that generate less impact in all spheres.

Keyword: Energy Harvesting. Polymers. Piezoelectricity. Triboelectricity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo global de energia primária por tipo de recurso	2
Figura 2 – Divisão de produção de eletricidade por fonte de energia	3
Figura 3 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – NU	4
Figura 4 – Geração de energia renovável por fonte de energia	5
Figura 5 – Esquema ilustrativo de um circuito elétrico	7
Figura 6 – Estrutura cristalina exemplificando piezoeletricidade de ZnO	8
Figura 7 – Representação esquemática de termoeletricidade	9
Figura 8 – Representação esquemática de triboeletricidade	10
Tabela 1 – Tabela 1 – Série triboelétrica para alguns materiais	10
Figura 9 – Exemplo de processo para fabricação de fibras de PVDF com campo elétrico	14
Figura 10 – estrutura do PVDF e as estruturas cristalinas	14
Figura 11 – Implantes intracorpóreos	19
Figura 12 – Esquema de amostras poliméricas piezoelétricas	20
Figura 13 – Nanogeradores com fibras e resultados de testes	20
Figura 14 – Esquema de dispositivos para captura de energia dos ventos	22
Figura 15 – Resultado de captura de ventos por meios alternativos	23
Figura 16 – Dispositivos para captura de energia das marés	24
Figura 17 - Foto representando junção de dispositivos em rede para geração de elevada	24

LISTA DE ABREVIATURAS

Fig.	Figura
3D	3 Dimensões
PVDF	Fluoreto de polivinildieno
PTFE	Poli TetraFlourEtileno
FEP	Etileno Propileno Fluorado
PZT	Titanato de Zirconio
PLGA	Poli Ácido Lático-co-glicolico
PCL	Policaprolactona
PET	Politereftalato de etileno
ZnO	Óxido de Zinco
CdS	Sulfeto de Cadmio
BaTiO ₃	Titanato de Bário

LISTA DE SIGLAS

NU	Nações Unidas
PENG	Nanogeradores piezoelétricos
TENG	Nanogeradores triboelétricos
café	Comunidade Acadêmica Federada
MEV	Microscópio eletrônico de varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

TWh	TeraWatt-hora
I	Corrente elétrica
C	Carbono
H	Hidrogênio
F	Flúor
V	Volt
W	Watt
kg	Quilograma
kW	QuiloWatt
m.s ⁻¹	Metro por segundo
m ²	Metro quadrado
MW	MegaWatt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	07
2.1	ENERGIA ELÉTRICA	07
2.2	EFEITOS ELÉTRICOS	08
2.2.1	Piezoelasticidade	08
2.2.2	Termoelectricidade	09
2.2.3	Triboelectricidade	09
2.3	NANOGERADORES	11
2.4	POLÍMEROS	11
2.4.1	Polímero Fluorado	12
2.4.2	Polímero Piezoelétrico	13
3	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1	GOOGLE ACADÊMICO	15
3.2	PERIÓDICOS CAPES	15
4	RESULTADOS/DESENVOLVIMENTO	17
4.1	ENERGIA MECÂNICA INERENTE AO CORPO HUMANO	18
4.1.1	Movimentos Intracorporais	18
4.1.2	Movimentos Extracorporais	19
4.2	ENERGIA MECÂNICA INDEPENDENTE DO CORPO HUMANO	21
4.2.1	Energia Eólica	21
4.2.2	Energia Maremotriz	23
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	25
6	CONCLUSÃO / CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
	REFERÊNCIAS	27
	ANEXO A - Série triboelétrica	28

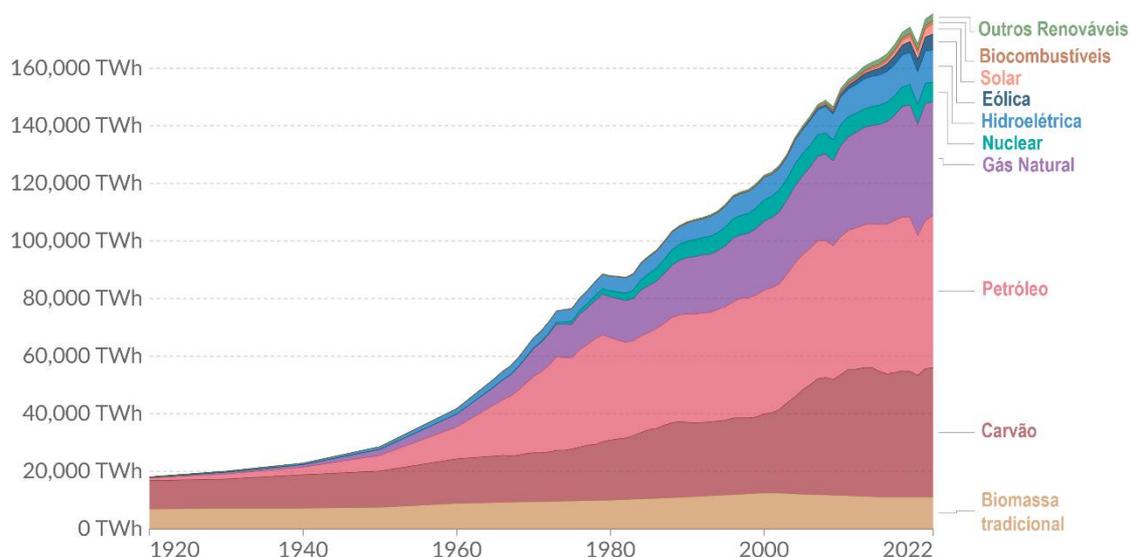
1 INTRODUÇÃO

A humanidade, de modo instintivo, deu um grande passo na evolução da espécie no momento em que dominou o fogo, em outras palavras, o ser humano passou a ter controle de uma fonte de energia que pôde ser explorada para diversas finalidades como aquecimento em dias mais frios, cocção de alimentos e iluminação. A partir desse momento, a espécie humana passa a criar novas tecnologias que auxiliaram na sobrevivência, no desenvolvimento de novas ferramentas e melhores condições de vida. Com o passar do tempo, pode-se dizer que as grandes revoluções foram pautadas em inovações tecnológicas baseadas no domínio das energias como o surgimento de máquina a vapor, combustão e energia a elétrica, sempre evoluindo em tecnologia e eficiência.

Com isso, a humanidade foi acumulando conhecimento e elevando o nível mínimo de necessidades básica e naturalmente acabou se tornando cada vez mais dependente de energias. Como exemplo, o homem primitivo descobriu o fogo para se aquecer, logo as próximas gerações teriam menos chances de sofrer com as baixas temperaturas, do mesmo modo com o uso de iluminação artificial, os dias passaram a ter mais horas disponíveis para realizar as mais diversas tarefas, não dependendo somente da iluminação natural. Dessa forma, a humanidade chega num ponto de elevada dependência da eletricidade até mesmo para as tarefas mais simples do dia a dia, de modo que, para quase todo o mundo, seria impossível imaginar viver no século XXI sem energia elétrica.

No gráfico a seguir, é possível verificar que o consumo energético mundial cresce rapidamente nos últimos 100 anos, mostrando tal dependência, uma vez que se estima um consumo total maior que 160.000TWh.

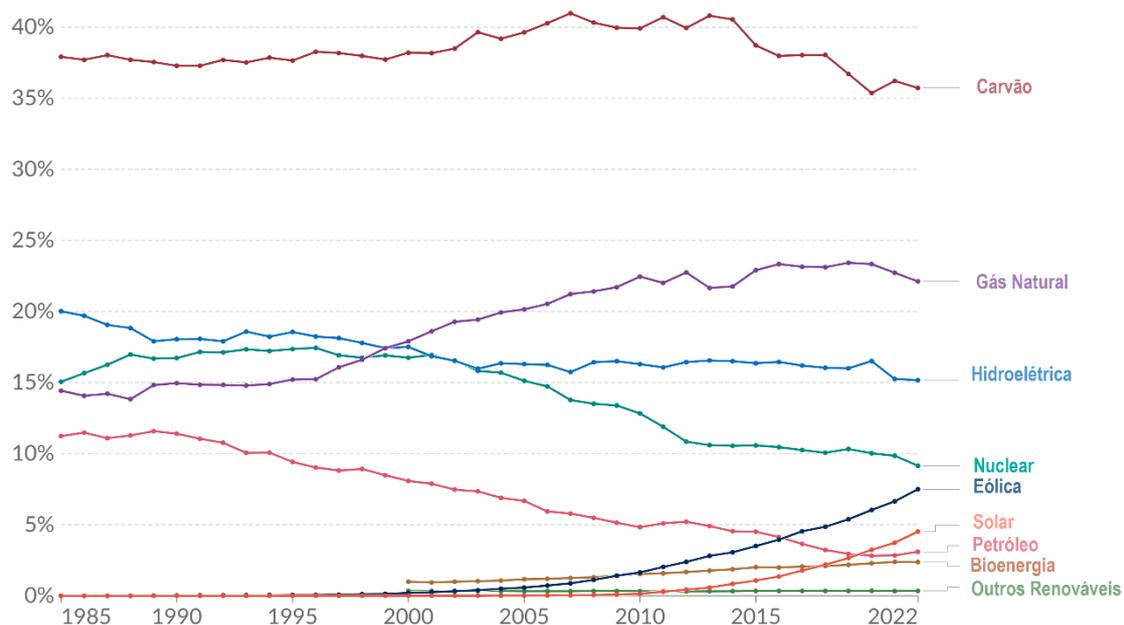
Figura 1 – Consumo global de energia primária por tipo de recurso



Fonte: (RITCHIE; ROSADO; ROSER, 2020)

Esta grande quantidade de energia precisa ser gerada de algum modo até que chegue ao consumidor final e pode ser transformada a partir de diferentes fontes que podem ser poluentes e não renováveis, mas também podem ser geradas por fontes renováveis com menor impacto no meio ambiente. As primeiras formas de geração de energia foram pautadas em fontes não renováveis e poluentes como pela combustão de carvão mineral (termoelétricas), de gás natural e derivados de petróleo que liberam gases que auxiliam o efeito estufa e podem gerar graves impactos ambientais. A evolução da produção de eletricidade por fonte, em escala mundial, pode ser vista na figura 2.

Figura 2 – Divisão de produção de eletricidade por fonte de energia



Fonte: (RITCHIE; ROSADO, 2020)

Verifica-se que grande parte da fonte energética mundial continua tendo grande impacto no ambiente, gerando gases que auxiliam com o efeito estufa e poluindo com resíduos e outras formas, porém é explorada devido à facilidade de acesso, custo e fatores geopolíticos, apesar de ser uma pauta de discussões e estudos, com diversos esforços de órgãos como as Nações Unidas (NU). Foi desenvolvido o Objetivo de desenvolvimento sustentável das NU que contém diversos pontos relacionados à obtenção de energias como a 07, 09, 11,13 vistos na figura a seguir.

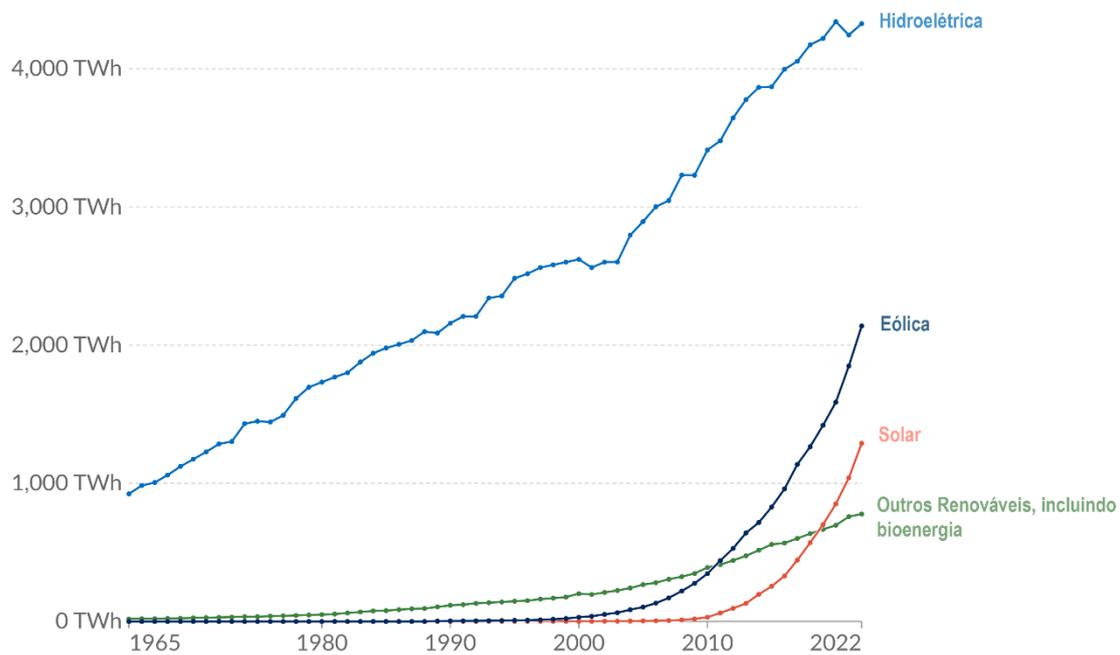
Figura 3 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – NU



Fonte: (Nações Unidas, 2023)

Logo, desenvolver e utilizar novas fontes de energia que estejam alinhadas com o objetivo de desenvolvimento sustentável torna-se necessário para que seja minimizado o impacto ambiental na transformação de energia. Como obtenção de energia elétrica por meios renováveis tradicionais, pode-se citar energia eólica, hidroelétrica, geotérmica que não geram gases do efeito estufa tendo menor impacto ambiental, comparado com métodos por fontes não renováveis. Vale salientar que condições climáticas e ambientais são fatores diretamente ligados com o uso e aplicação destas formas de obtenção de energia. Apesar da pequena parcela do mercado, energias sustentáveis vêm sendo cada vez mais exploradas e divulgadas e crescem a cada ano como pode ser visto no gráfico abaixo.

Figura 4 – Geração de energia renovável por fonte de energia



Fonte: (RITCHIE; ROSER; ROSADO, 2020)

Um outro método de obtenção de energia, que atualmente é alvo de estudos científicos com resultados promissores, é a captura e recuperação de energia gerada no ambiente e transformada por materiais devido a propriedades únicas, este conceito é chamado de *Energy Harvesting* e pode ser aplicado para piezoelectricidade, triboelectricidade, termoelectricidade e dispersão magnética (HUANG et al., 2020). O movimento diário de objetos e pessoas é uma fonte de energia com enorme potencial até então não explorado, e ao ser captada pode ser utilizada por equipamentos. Este universo energético tem um grande campo de atuação pois diariamente todo objeto que se movimenta, inclusive o ser humano, está dissipando energia que poderia ser usada através desta tecnologia

As propriedades mais exploradas na captura de energia são piezoelectricidade e triboelectricidade, objeto de estudo deste trabalho, de determinados materiais que possuem a capacidade de gerar uma resposta elétrica a partir de uma energia mecânica. Esta propriedade é resultado das interações moleculares e estruturais que tem a capacidade de gerar voltagens, podendo ser explorada em diversas aplicações.

A piezoelectricidade é comumente atrelada à materiais cerâmicos, porém, o desenvolvimento de polímeros com tal propriedade aumentou o leque de utilização desta tecnologia, uma vez que estes materiais possuem propriedades que ampliam

sua aplicação. Já a triboeletricidade está atrelada a geração eletrostática entre um material com maior tendência de ser condutor e outro isolante, gerando superfícies com cargas opostas possibilitando a formação de corrente elétrica. Explorados durante o trabalho por serem os métodos mais utilizados para a captura de energia.

Tem-se como objetivo do trabalho, entender as possíveis aplicações e vantagens do uso de polímeros em *Energy Harvesting* e suas aplicações com a capacidade de gerar corrente elétrica de modo sustentável possibilitando o uso de fontes alternativas de energia. Esta técnica de captura de energia pode ser aplicada em oscilações de baixa frequência que estão presentes em nosso cotidiano como o caminhar e movimento do corpo e de órgãos, uso de meios de transporte explorando o vento e a chamada energia azul que utiliza da movimentação das águas oceânicas para geração de grandes potências. Assim, aumentam as possibilidades de desenvolvimento de produtos e utilização desta tecnologia no dia a dia, contribuindo para um meio ambiente mais sustentável.

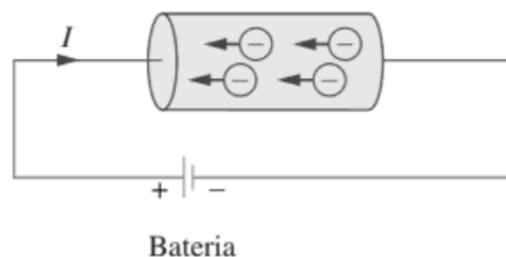
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA/PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – Energia elétrica

A humanidade tornou-se dependente da energia elétrica, uma vez que, grande parte das atividades realizadas estão atreladas a eletricidade mesmo que de forma indireta. Os equipamentos que auxiliam nas tarefas são desenvolvidos a partir de circuitos elétricos, que são compostos, de modo geral, por uma resistência e uma fonte de tensão com diferença de potencial conectado por fio condutor possibilitando a passagem de elétrons do polo negativo para o positivo.

Tais movimentos dos elétrons geram uma corrente elétrica(I), definida por fluxo de carga por unidade de tempo, que por convenção se desloca do polo positivo para o negativo. Além disso, todos os componentes que geram uma oposição à passagem de tais elétrons, são chamados de resistores, já que resistem a passagem de elétrons. Pode-se dizer que todos os equipamentos elétricos usados têm seu funcionamento simplificado nestes componentes e possuem uma potência, que é a energia absorvida ou fornecida por unidade de tempo. (ALEXANDRE; SADIKU, 2013)

Figura 5 – Esquema ilustrativo de um circuito elétrico



Fonte: (ALEXANDRE; SADIKU, 2013)

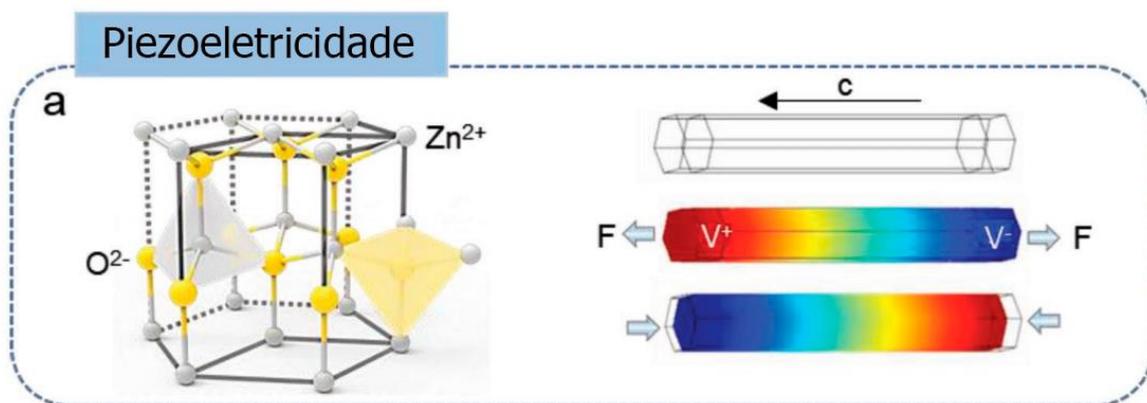
No mundo, estima-se que o consumo de energia elétrica seja em torno de 160.000TWh, logo, encontrar fontes geradoras de eletricidade com grande eficiência é de grande importância. Apesar do perfil de fontes renováveis e sustentáveis já ter melhorado nos últimos anos, ainda é necessário buscar melhores métodos de obtenção de energia elétrica.

2.2 – Efeitos elétricos

2.2.1 – Piezoelectricidade

O nome dado ao fenômeno provém do grego, piezo = pressão, e foi denominado desta forma pois fora observado experimentalmente que ao submeter o material a uma pressão externa, é induzida uma polarização que estabelece um campo elétrico e de modo oposto, caso o material for submetido a determinada diferença de potencial a resposta são tensões deformacionais (CALLISTER, 2007) O fenômeno da piezoelectricidade ocorre para alguns materiais e tem como condição básica de ocorrência a ausência de simetria central, ou seja, é necessário anisotropia do cristal para que se tenha uma polarização elétrica nas estruturas do material como visto na figura abaixo.

Figura 6 – Estrutura cristalina exemplificando piezoelectricidade de ZnO



Fonte: (HUANG et al., 2020)

De modo mais preciso, quando o material é pressionado, a estrutura reticular é deformada separando centros gravitacionais de cargas positivas e negativas gerando dipolo, internamente as cargas do polo se anulam restando cargas não nulas apenas na superfície do material, assim, torna-se possível transformar energia mecânica em elétrica.

Alguns materiais têm tal propriedade e são aplicados em diferentes situações como relógios, fogões, toca discos (cristal de rochelle), porém, alguns polímeros também possuem tal propriedade e geram eletricidade a partir de tensão, uma vez que tal uso de força externa é capaz de fazer com que as ligações moleculares, como C-H, rotacionem sobre a cadeia, confinando os dipolos num plano perpendicular ao

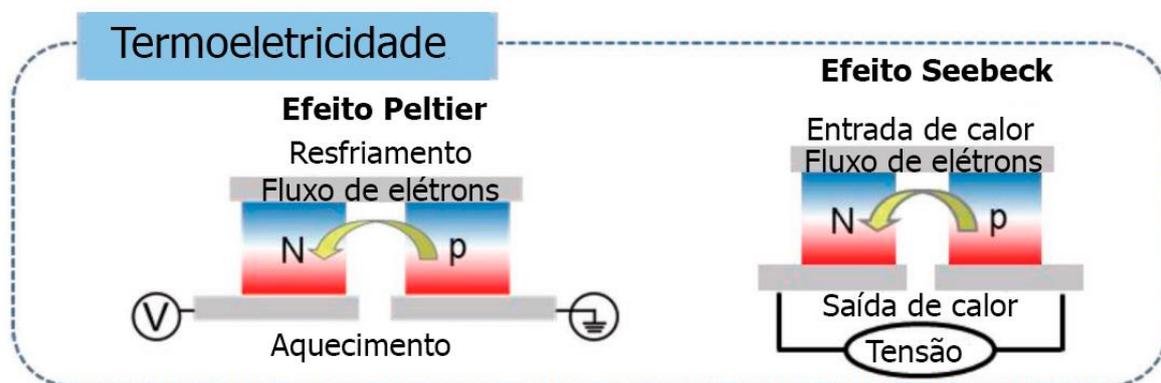
carregamento, polarizando e alinhando-os na direção das linhas do campo elétrico.(ZHOU et al., 2021)

2.2.2 – Termoeletricidade

A geração de corrente elétrica também é possível a partir de diferenças de temperatura, a partir da chamada termoeletricidade, uma vez que a temperatura está relacionada com a movimentação de elétrons, quanto maior a temperatura maior a agitação dos elétrons. Existem fenômenos termoeletricos que possuem funcionamentos diferentes, mas se destacam dois, o efeito Seebeck gera eletricidade a partir de diferença de temperatura e o efeito Peltier altera a temperatura das placas de contato, criando um gradiente de temperatura, a partir da passagem de eletricidade.

Tais fenômenos demonstram mais uma vez a possibilidade de gerar corrente elétrica a partir de métodos alternativos. A termoeletricidade está presente em diferentes equipamentos para medir temperatura, gerar eletricidade, esfriar ou aquecer objetos

Figura 7 – Representação esquemática de termoeletricidade



Fonte: (HUANG et al., 2020)

2.2.3 – Triboeletricidade

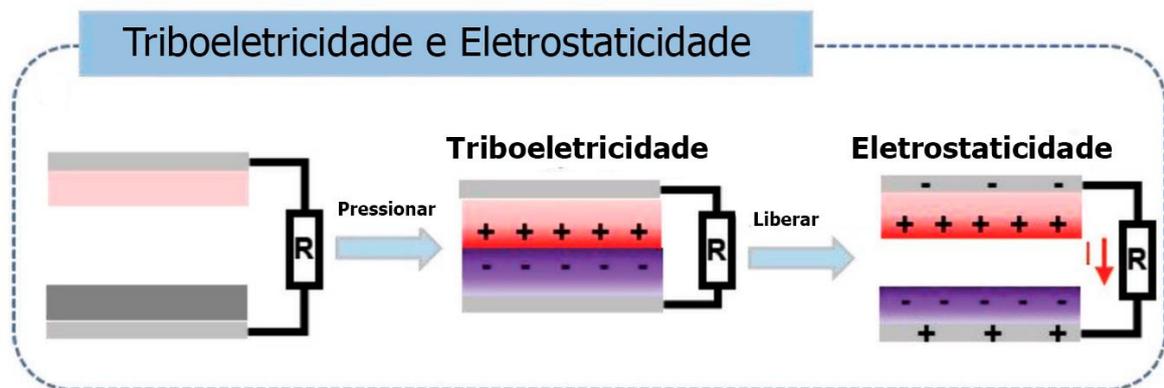
O conceito de triboeletricidade está relacionado a eletrostática, uma vez que do grego, "tribos" significa esfregar, logo entende-se que a triboeletricidade se dá pelo atrito entre superfícies.

Ao eletrizar dois materiais por fricção, um adquire carga negativa e o outro com carga positiva, definido pela tendência de atração de elétrons relativa entre os dois materiais. Com isso, torna-se possível criar a Série triboelétrica, usada para

compreender a tendência de movimentação dos elétrons entre os dois materiais, ou seja, analisando comparativamente entre dois materiais, qual adquire carga positiva e negativa quando atritados. A tabela 1 apresenta alguns exemplos de materiais.

Podemos verificar na figura 8, que o atrito entre superfícies possibilita gerar cargas opostas e ao conectar as partes por um fio condutor criando um circuito, gerar corrente elétrica.

Figura 8 – Representação esquemática de triboeletricidade



Fonte: (HUANG et al., 2020)

Tabela 1 – Série triboelétrica para alguns materiais

Tendência das cargas	Material
▲ Carga positiva	Pele humana
	Cabelo humano
	Nylon
	Papel
Neutro	Aço
▼ Carga Negativa	Poliéster
	Poliuretano
	Polietileno
	Teflon/PTFE

Fonte: (Brasil Escola Uol, 2023)

2.3 – Nanogeradores

Nanogeradores são dispositivos que tem a capacidade de transformação de energia mecânica em elétrica, foi desenvolvido com objetivo de capturar energias do ambiente para utilização em pequenos aparelhos eletrônicos ou sensores. Estudos sobre tal tema começaram a ser desenvolvidos somente no século XXI e apresentam diversos resultados animadores, com uso de diferentes tecnologias, materiais e aplicações, porém, ainda há muitos campos para serem explorados. (HUANG et al., 2020)

Os nanogeradores são divididos em dois grandes grupos que se diferenciam pelo método de geração de energia. Os nanogeradores piezoelétricos (PENG - *piezoelectric nanogenerators*) são dispositivos que convertem tensões externas em eletricidade a partir da piezoelectricidade e o nanogeradores triboelétricos (TENG - *triboelectric nanogenerator*) são dispositivos que utilizam da eletricidade eletrostática gerada pelo atrito entre dois materiais diferentes para obter corrente elétrica. (FAN; TANG; WANG, 2016)

Ambos os nanogeradores foram utilizados em trabalhos como o uso de TENG para captura de eletricidade a partir da movimentação do vento de baixa velocidade (ZHANG et al., 2016) e uso de PENG em diversas áreas como no caso de dispositivos para uso médico. (SHI; LI; FAN, 2018)

Os estudos nesta área, além de visar os circuitos elétricos, também buscam desenvolver materiais que tenham bom comportamento mecânico e preço competitivo com tais propriedades, com isso, a utilização de polímeros em nanogeradores é de grande importância, já que a combinação entre diferentes materiais num dispositivo pode levar a criação de PENG e TENG como pode ser visto em estudos. (JIANG et al., 2020)

2.4 - Polímeros

Esta classe de material se origina do grego, poli significa muitos e mero unidades de repetição, ou seja, um polímero é constituído de diversas repetições de uma mesma unidade, formando a macromolécula. A partir do monômero, a menor

unidade e que é a formadora do material, ocorre a reação química de polimerização, também chamada de síntese polimérica, que permite a adição sequencial de unidades de monômeros através de ligações covalentes, levando a cadeia a adquirir grandes comprimentos. (CANEVAROLO; 2020)

Materiais poliméricos têm propriedades físicas que os diferem de metais e cerâmicas, como baixo ponto de fusão e baixas tensões de escoamento, no entanto, sua baixa densidade, bom processamento e outros fatores, fazem com que seja empregado em diversos setores da indústria, além disso, seu caráter isolante também influencia na seleção de materiais.

Um fator importante no estudo e caracterização de polímeros é compreender a distribuição de tamanho e massa das moléculas, que vão auxiliar a entender o comportamento do material e suas propriedades físicas como viscosidade. Além do tamanho, é importante entender a estrutura molecular dos polímeros, caso seja linear, ramificado ou com ligações cruzadas, o grau de cristalinidade para entender se é um polímero amorfo ou semicristalino, além de transições térmicas e fatores influenciados no processamento como orientação de cadeias. (CANEVAROLO; 2020)

Os materiais poliméricos são de grande importância mundial e são explorados de diferentes maneiras devido as propriedades que podem ser adequadas às mais diversas aplicações. Pesquisas atuais voltadas a sustentabilidade de polímeros aumentam ainda mais a visibilidade para esta classe de material que está presente em todo o planeta.

2.4.1 – Polímeros Fluorados

O principal polímero fluorado utilizado atualmente nas mais diversas aplicações comerciais é o PTFE que tem uma grande tendência de ionização por elétrons segundo série triboelétrica, e é um material de grande aplicação em TENG. Tal dispositivo pode ser construído com dielétrico e dielétrico ou metal com dielétrico, uma vez que a escolha de materiais se norteia segundo a série citada, um exemplar é a tabela apresentada no anexo A.

A fórmula química do PTFE é composta por $(-2FC-CF_2-)_n$ na qual os átomos de flúor se movem helicoidalmente, se assemelhando a uma cadeia cilíndrica rígida. (BISWAS; VIJAYAN, 1992) Os materiais fluocarbonados, que inclui PTFE e etileno propileno fluorado (FEP), tem esta tendência de acúmulo de elétrons e são materiais clássicos para a fabricação de nanogeradores, atingindo voltagens de até 110V. Para

melhorar a eficiência e maior densidade superficial de carga é possível criar um composto de três camadas, as externas de FEP e interna de PTFE (HUANG et al., 2020)

Além destes exemplos mais utilizado, outros polímeros também são utilizados em nanogeradores triboelétricos uma vez que as propriedades de baixa densidade, flexibilidade, moldabilidade também são encontradas em outros materiais, no entanto é preciso se atentar a série triboelétrica para entender a tendência de ionização do polímero.

2.4.2 – Polímeros piezoelétricos

O polímero mais explorado entre os com propriedades piezoelétricas é o fluoreto de polivinildieno (PVDF) e seu copolímero PVDF-TrFE, uma vez que a estrutura química, composta por carbono e fluor é responsável pelo dipolo criado, devido a eletronegatividade do flúor e eletropositividade do hidrogênio, possibilitando a movimentação de elétrons. Tanto PVDF como PVDF-TrFE são empregados em PENG devido as boas propriedades mecânicas como flexibilidade, leves, estabilidade mecânica, boa processabilidade, resistência química e biocompatibilidade, diferentemente do mostrado em PENG usando materiais inorgânicos. (HUANG et al., 2020)

Apesar do PVDF apresentar menor piezoeletricidade e menor temperatura de currie ao comparar com piezocerâmicas como PZT, a maior flexibilidade dos polímeros leva a uma deformação que possibilita aplicações que demandam maiores trações e torções.(MISHRA et al., 2019)

PVDF apresenta 3 fases cristalinas, porém a fase beta que apresenta melhores propriedades piezoelétricas. Para sua fabricação, é necessário um campo elétrico, durante o processamento, que alinha os dipolos nas fibras do cristal possibilitando transformar a fase alfa em beta polar.

Figura 9 – Exemplo de processo para fabricação de fibras de PVDF com campo elétrico

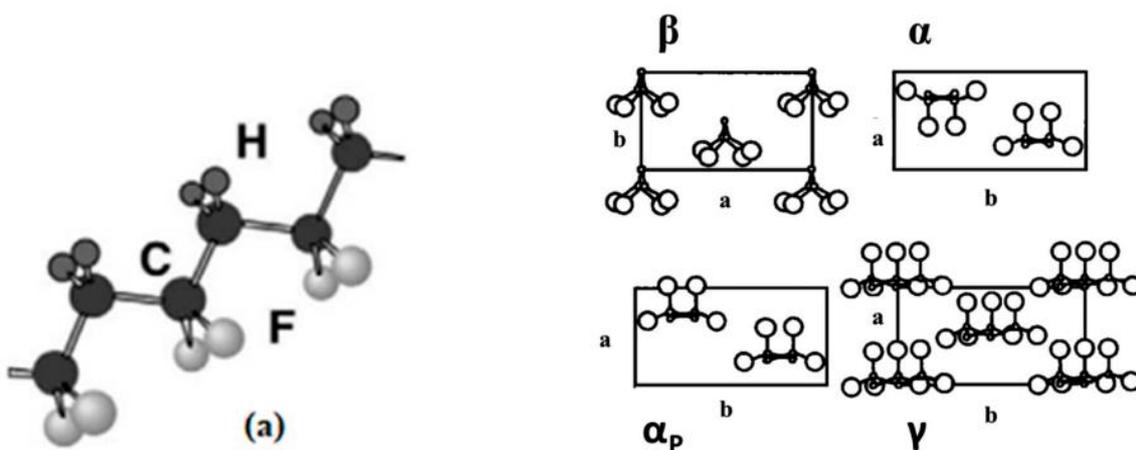


Fonte: (HUANG et al., 2020)

Poucas fibras deste material são capazes de gerar baixas tensões, porém, um conjunto leva a valores totais de eletricidade possíveis de utilizar (FAN; TANG; WANG, 2016)

A estrutura do PVDF $(-CHF-CHF-)_n$ e as diferentes estruturas cristalinas possíveis no PVDF podem ser vistas na figura 10. (MOHAMMADPOURFAZELI et al., 2023)

Figura 10 – estrutura do PVDF e as estruturas cristalinas



Fonte: (MOHAMMADPOURFAZELI et al., 2023)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Por se tratar de um estudo de revisão de literatura teórica, em sua totalidade, os métodos de pesquisa foram baseados no uso de plataformas on-line disponíveis para a busca de artigos científicos e revisões acadêmicas relacionados ao tema de *Energy Harvesting*.

As plataformas utilizadas foram:

3.1 – Google Acadêmico

Esta ferramenta é um dos braços da grande empresa de tecnologia Google, porém, voltada à busca online e gratuita de artigos, teses, livros e outros tipos de literaturas científica. Com uma base de dados extensa, torna-se possível encontrar diferentes trabalhos com o uso correto de palavras-chave. Para acessar, basta utilizar um navegador e entrar através do endereço <https://scholar.google.com.br>

Como forma de auxílio nas procuras, é possível utilizar a “pesquisa avançada” em que é possível buscar por diferentes parâmetros, filtro por data de publicação, buscar por artigos relacionados e uso de diferentes comandos na barra de pesquisa. No entanto, nem todos os documentos estão disponíveis na íntegra sem custo.

3.2 – Periódicos Capes

Esta plataforma reúne conteúdos acadêmicos nacionais e internacionais, se tornando um dos maiores acervos do Brasil disponibilizando-os para a comunidade democratizando o acesso à informação científica, uma vez que é inteiramente financiado pelo Governo Federal.

Para uma pesquisa com conteúdo assinado com editoras científicas, é necessário utilizar o acesso à área denominada Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). Tal acesso é atrelado à instituição de ensino que teve de aderir a esse serviço promovido pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa. Dessa forma, o conteúdo completo presente em revistas renomadas de todo o mundo fica disponível e pode ser utilizado em pesquisas. (PERIÓDICOS CAPES, 2023)

Em ambas as plataformas de busca, foram utilizadas métricas para que fosse possível filtrar artigos relevantes para este trabalho. Como palavras-chave, foram utilizadas, por exemplo, “*polymers energy harvesting*” levando a 8020 resultados e “*polymers nanogenerators*”, refinando a busca para 2801 resultados. Além disso,

parâmetros como quantidade de citações e data da publicação, com preferência para artigos dos últimos 8 anos foram importantes para conseguir obter uma boa quantidade de artigos e revisões com conteúdo teórico e resultados práticos que pudessem embasar este trabalho. Com tal filtro, o número de resultados obtidos nas pesquisas reduziram para 5656 e 2522, respectivamente

Vale ressaltar a importância do jornal científico "Advanced Materials" para este trabalho, já que foi utilizado por algumas das citações e obtido por meio da plataforma periódicos capes com acesso CAFe. Este jornal é um dos mais prestigiados mundialmente, reportando descobertas há mais de 30 anos. (ADVANCED MATERIALS - HOME, 2023) Como métrica, o jornal teve mais de 17 milhões de visualizações em 2022 e possui impacto de citação 29,4 e indicador de citação de 4,07 segundo Clarivate e CiteScore de 45,5 segundo Scopus. (ADVANCED MATERIALS – JOURNAL METRICS, 2023)

4 RESULTADOS / DESENVOLVIMENTO

Para que a captura de energia aconteça, é preciso gerar uma movimentação de elétrons de forma uniforme que terão a capacidade de criar uma corrente que assim, tornar-se explorável. Para que isso ocorra, os materiais precisam ter características únicas de microestrutura e processamento, ou seja, somente tipos específicos de materiais têm tal característica que pode ser explorada como piezoelectricidade e triboelectricidade.

Dessa forma, determinados materiais conseguem gerar uma corrente elétrica através de esforços mecânicos externos presentes em diversas ações do cotidiano, dentre os materiais estudados com tais propriedades, os inorgânicos foram a classe pioneira, com melhores resultados de piezoelectricidade, na qual titanato de zircônio (PZT) é o mais conhecido e explorado assim como Sulfeto de cádmio (CdS) e Titanato de bário (BaTiO₃) (HUANG et al., 2020), no entanto, algumas propriedades de cerâmicas limitam seu uso, como sua fragilidade, logo, este material tem suas aplicações restringidas.

O estudo sobre a conversão de energia por piezoelectricidade, triboelectricidade e termoelectricidade foram evoluindo e levaram a criação de nanogeradores, sendo o primeiro desenvolvido pelo professor Wang (SHI; LI; FAN, 2018). Assim, o surgimento destes nanogeradores atua nessa demanda reprimida de energia, explorando as propriedades dos polímeros nas mais diversas aplicações, (HUANG et al., 2020) aumentando ainda mais o campo de atuação de *Energy Harvesting*. (FAN; TANG; WANG, 2016)

A demanda energética de uso individual pode ser dividida em níveis conforme a potência dos equipamentos, ou seja, equipamentos como relógio, calculadoras podem ser considerados de baixa potência, já baterias de maior capacidade como de computadores podem ser considerados de média potência e o consumo residencial pode ser considerado de grande potência. Assim, os estudos de *Energy Harvesting* são abrangentes e atuam desde aplicações de baixa potência que podem alimentar pequenos equipamentos até o desenvolvimento de aplicações de maior potência para geração de grandes quantidades de energia capaz de suprir maiores necessidades.

Nanogeradores passam a ser estudados para desenvolver pontos que limitavam captura de energia por métodos tradicionais, o que levou a novas tecnologias que mostram a eficácia de novos materiais poliméricos no *Energy*

Harvesting, abrindo um novo campo de estudo (FAN; TANG; WANG, 2016)

A energia alvo de captura destes nanogeradores é dissipada todos os dias, logo, o campo de atuação é vasto possibilitando a intersecção de diferentes áreas do conhecimento científico para atingir o objetivo final de tal captura energética.

Os estudos desenvolvidos acerca desta temática variam desde dispositivos médicos implantáveis para *Energy Harvesting* (SHI; LI; FAN, 2018) até a obtenção de energia das marés, criando um novo conceito de energia azul, chamado de *blue energy*. (WANG et al., 2015)

Como forma de distinção, pode-se dividir os modos de obtenção de energia em dois grupos, os que utilizam movimentos inerentes ao corpo humano e os que utilizam movimentos externos e independentes do corpo. Logo, é possível explorar este conceito de diversas formas maximizando a obtenção de energia dos mais diferentes modos.

4.1 Energia mecânica inerente ao corpo humano

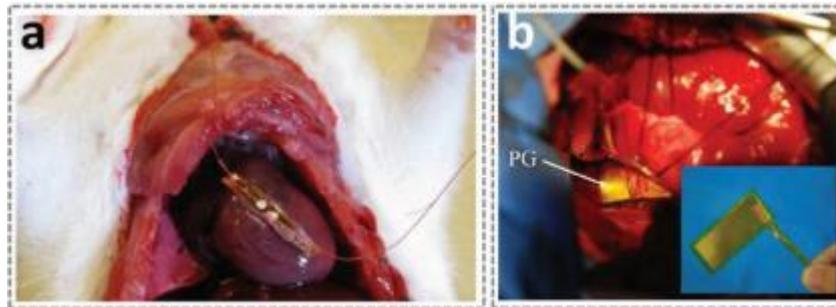
Ao analisar a obtenção de energia utilizando movimentos do corpo, pensa-se inicialmente em aplicações extracorporais como durante o caminhar ou prática de esportes, no entanto estudos avançam, também, na aplicação intracorporal para captura de movimentos de órgãos como coração e pulmões.

4.1.1 Movimentos intracorporais

Pesquisadores mostraram que o corpo humano está repleto de energia mecânica e química que pode ser usada em métodos de captura de energia in vivo através de batimentos cardíacos, respiração e circulação sanguínea. Essa captura de energia busca otimizar aplicações de implantes médicos que necessitam de baterias, que atualmente se limitam na capacidade, tamanho e peso, sendo esse o principal desafio dos dispositivos médicos. (SHI; LI; FAN, 2018)(CHEN et al., 2019)

Os movimentos de sístole e diástole do miocárdio gera cerca de 1,4W, logo, capturar essa energia e utilizá-la em implantes cardíacos promoveria uma boa alternativa para resolver o problema de vida-útil da bateria de dispositivos atualmente empregados. Os estudos mostram que materiais piezoelétricos (PENG) a base de PVDF e triboelétricos (TENG) com uso de PLGA e PCL apresentam resultados promissores na captura de movimentos cardíacos, pulmonares e circulatórios.

Figura 11 – Implantes intracorpóreos



a) Gerador de cabo único acoplado no coração de um rato vivo b) PG a base de PVDF implantado envolvendo a aorta de um suíno. Fonte: (SHI; LI; FAN, 2018)

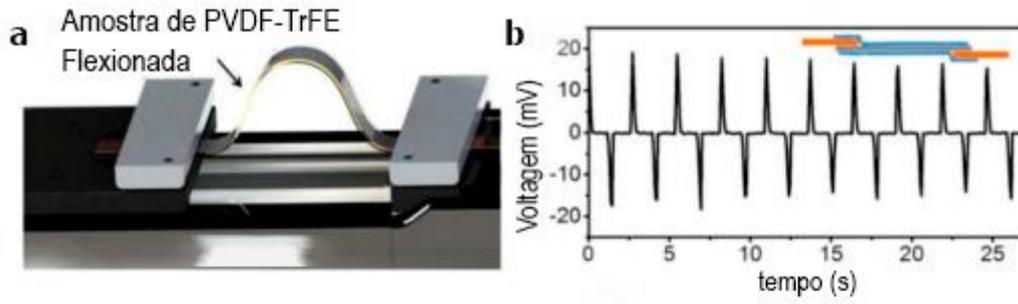
Além disso, tais dispositivos podem ser utilizados como sensores monitorando frequência cardiorrespiratória, a fim de diagnosticar doenças nos primeiros sinais, como testado com uso de um material piezoelétrico flexível. Tais tecnologias de obtenção de energia *in vivo* buscam promover soluções para evitar o uso de baterias e levar melhor qualidade de vida aos pacientes. (SHI; LI; FAN, 2018)

4.1.2 Movimentos extracorporais

O corpo humano também produz energia térmica e mecânica nas atividades diárias, que ao ser capturada por dispositivos de conversão, podem ser aplicadas em dispositivos de baixa potência e pequenos eletrônicos como relógios e pulseiras inteligentes. Estes equipamentos tem demanda crescente, porém com limitações de baterias, uma vez que têm como principal proposta serem leves e confortáveis, o que vai em descontra com as tradicionais baterias.

Um ser humano de 68kg pode gerar até 100W diariamente, convertendo 1% desta energia já seria suficiente para o trabalho da maioria dos pequenos eletrônicos. (HUANG et al., 2020) Estudos evoluíram para desenvolver fibras capazes de capturar energia, dessa forma, tecidos podem atuar como dispositivos de *Energy Harvesting* criando um sistema eletrônico de grande área, podendo ser ativado dos mais diferentes modos como compressão, flexão e tração, assim, torna-se uma boa opção para captura de energia.

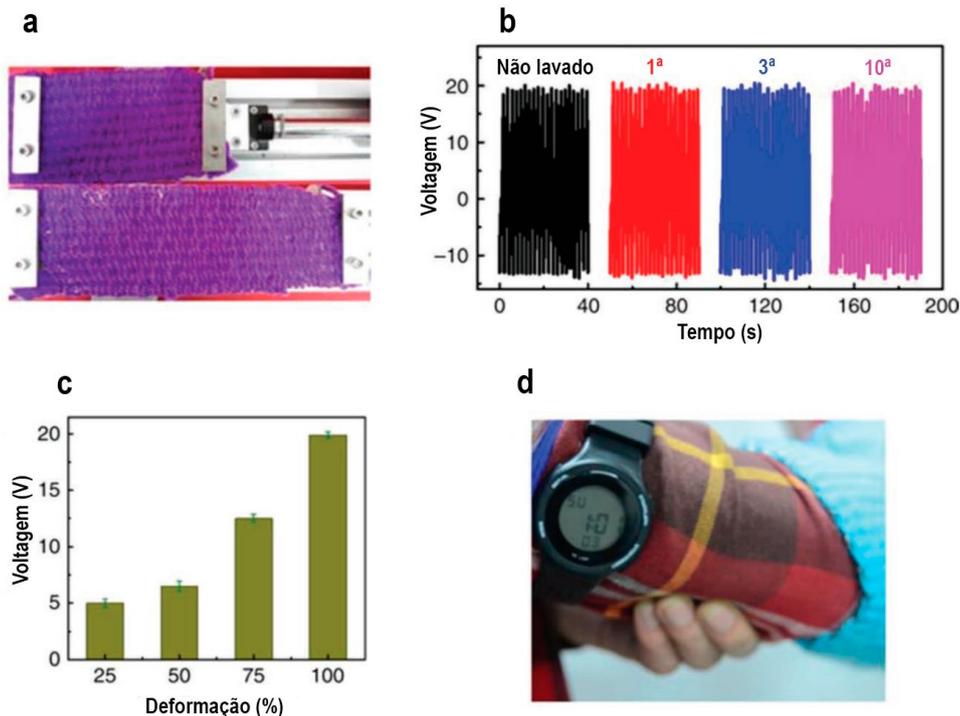
Figura 12 – Esquema de amostras poliméricas piezoelétricas



a) exemplo esquemático do teste de flexão de fibras b) voltagem gerada por nanogerador piezoelétrico em testes cíclicos de flexão. Fonte: (HUANG et al., 2020)

Ao pensar na viabilidade do uso dos tecidos geradores de energia, foi analisada a eficiência da geração de energia após lavagem e como apresentado na figura 13 a eficiência se mantém constante mesmo após dez lavagens. Também é possível analisar a variação de voltagem em diferentes deformações do tecido, sendo maior com elevada deformação.

Figura 13 – Nanogeradores com fibras e resultados de testes



a) Fotografia do dispositivo/tecido. b) resposta elétrica em função de lavagens do tecido. c) resposta elétrica em função da deformação no tecido. d) sistema de auto carregamento de um relógio eletrônico. Fonte: (HUANG et al., 2020)

Além disso, dispositivos flexíveis TENG e PENG podem ser aplicados, por exemplo, em sapatos e tênis possibilitando a captura de energia durante o caminhar das pessoas, uma vez que qualquer estímulo na compressão do solado do calçado gera energia. (FAN; TANG; WANG, 2016; KYMISSIS et al., 1998)

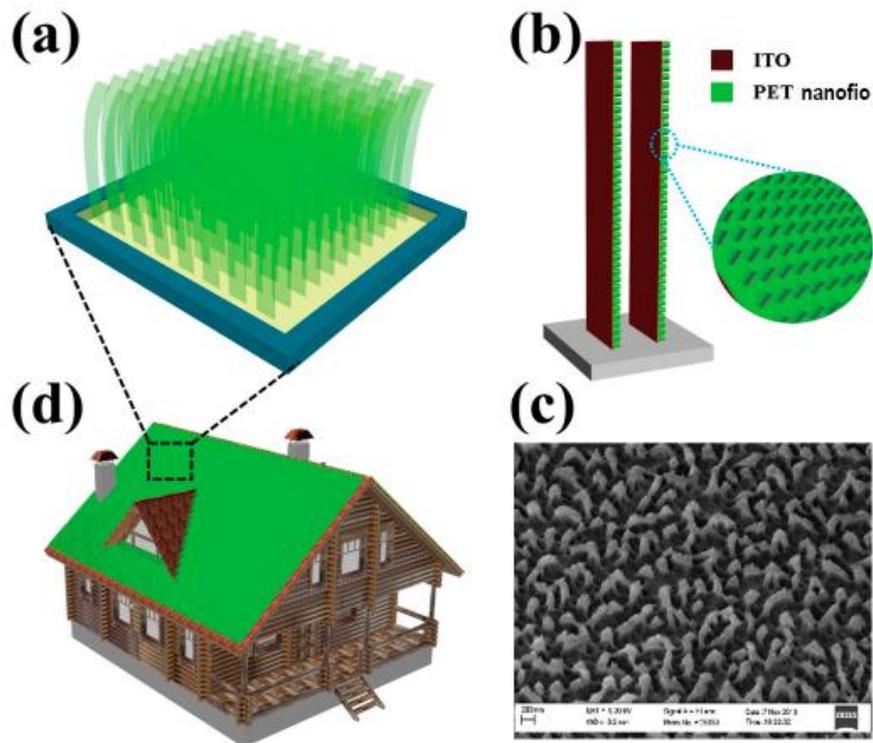
4.2 Energia mecânica independentes do corpo humano

Deve-se pensar também, na energia do ambiente que não são inerentes ao corpo humano e seu movimento. Dois meios de transformação de energia cinética em energia elétrica muito conhecidos são a energia eólica e maremotriz, que utilizam energia dos ventos e das marés, respectivamente, para transformar em energia elétrica. No entanto, os dispositivos tradicionais são geradores eletromagnéticos, que para uma boa eficiência, necessitam de grandes velocidades de ventos e elevadas frequências das marés, logo, a energia disponível em baixas velocidades e frequências é dissipada, sendo esse o intervalo de atuação dos nanogeradores.

4.2.1 Energia eólica

Para captura de energia de ventos com velocidades inferiores de $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, foi desenvolvido um TENG com FEP como material dielétrico maleável que com a vibração do vento de baixa velocidade, torna-se possível gerar energia elétrica que pode ser aplicada desde pequenos dispositivos a grandes aplicações como residências, podendo ser aplicado em telhados. Como estimativa, em um telhado de 300m^2 a potência teórica gerada é de $7,11\text{kW}$, que poderia ser aplicada no uso de eletrodoméstico, por exemplo. ((REN et al., 2020; ZHANG et al., 2016)

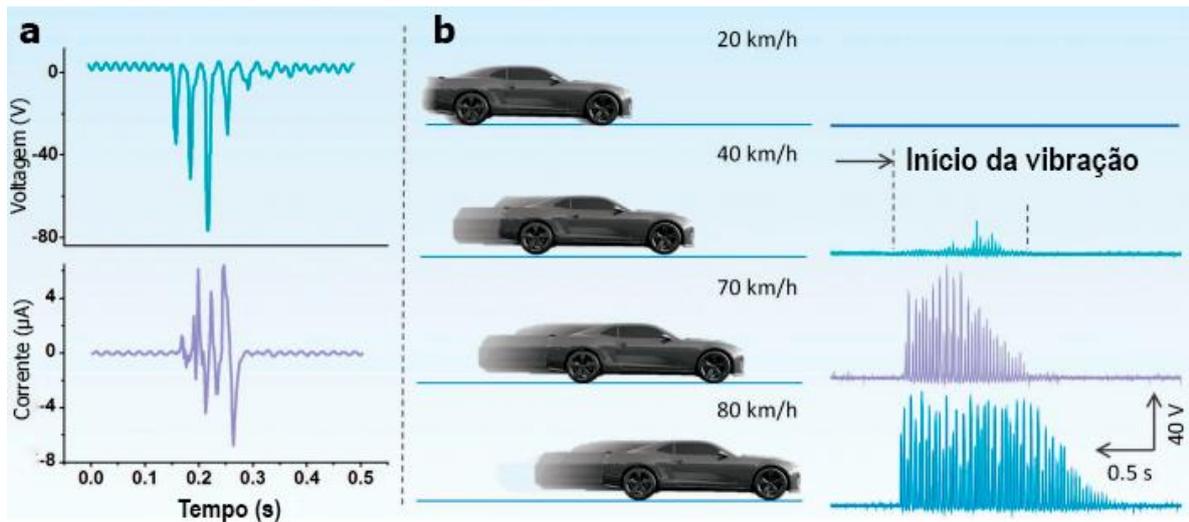
Figura 14 – Esquema de dispositivos para captura de energia dos ventos



a) Ilustração de um conjunto de dispositivos para captura de energia. b) unidade de TENG composto pelo par ITO e nanofio de PET. c) imagem de MEV de nanofio PET. d) ilustração esquemática de um telhado coberto com conjunto de TENG Fonte: (ZHANG et al., 2016)

Com o desenvolvimento desta tecnologia de TENG maleáveis que geram energia pela movimentação de vento, torna-se possível ampliar as aplicações e expandir a captura de energia uma vez que uma corrente de vento leve pode ser induzida no ambiente como na refrigeração de computadores, ao folhear livros ou na passagem de um veículo. (REN et al., 2020)

Figura 15 – Resultado de captura de ventos por meios alternativos

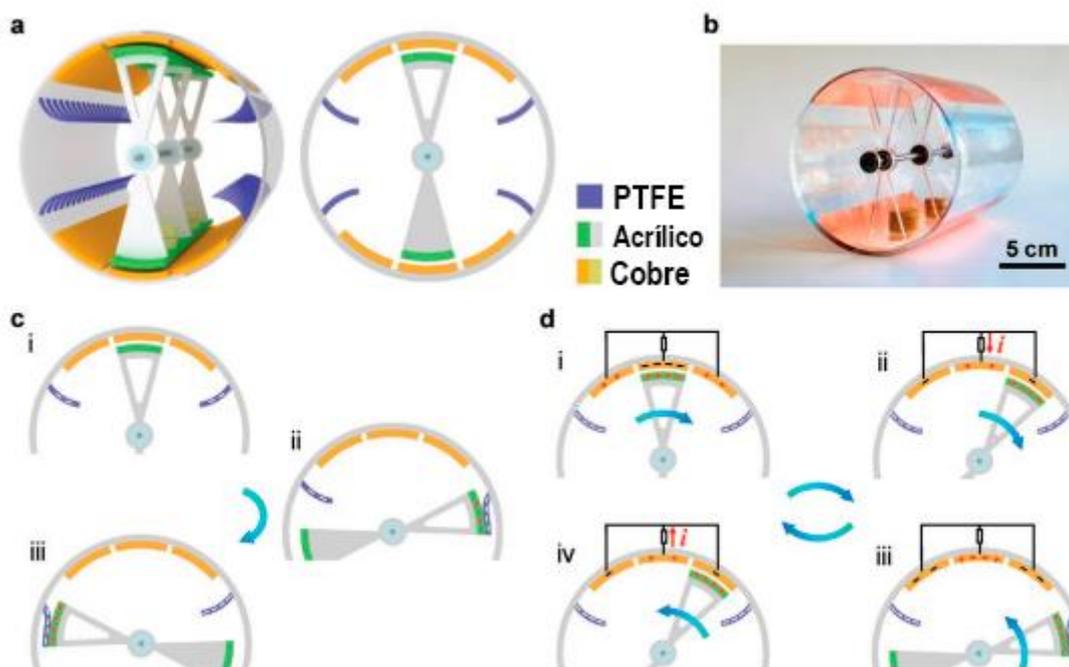


a) Resposta elétrica de TENG a partir vento gerado ao folhear livros b) Desenho esquemático representando respostas elétricas do dispositivo para diferentes velocidades que um veículo passa gerando uma corrente de vento. Fonte: (REN et al., 2020)

4.2.2 Energia maremotriz

Estudos sobre *Energy Harvesting* também focam na obtenção de energia em grande escala. Para captura de energia das marés, utilizou-se do mesmo conceito de TENG e construiu-se um dispositivo a base de acrílico, cobre e PTFE para a obtenção de energia de ultra baixa frequências das ondas.

Figura 16 – Dispositivos para captura de energia das marés



a)diagrama 3D da estrutura do TENG b) Fotografia do dispositivo TENG c) Esquema do princípio de funcionamento do TENG e processo de triboeletricidade d) indução eletrostática gerando corrente no circuito externo Fonte: (JIANG et al., 2020)

Tal dispositivo mostrou eficácia em testes laboratoriais em diferentes frequências conseguindo gerar 3,5V em 10 minutos, contudo, ao pensar em captura de energia em grande escala tal dispositivo mostrou seu potencial, ao criar uma rede com milhares de dispositivos conectados flutuando nos oceanos. (JIANG et al., 2020)

Esta tecnologia se empregada como rede, tem uma potência estimada de 1MW em um quilometro quadrado. Tal estudo torna-se impactante para o tema de energias gerando de grande potência energética através das ondas oceânicas. (WANG et al., 2015)

Figura 17 - Foto representando junção de dispositivos em rede para geração de elevada potência



Fonte: (WANG et al., 2015)

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos estudos desenvolvidos acerca do tema de *Energy Harvesting*, é possível verificar que nanogeradores triboelétricos e piezoelétricos são empregados nas mais diferentes aplicações a fim de capturar energia mecânica e transformá-la em elétrica, até então não explorada e presente na vida de todos.

Os resultados apresentados das fibras formadoras de tecidos que capturam energia apresentam bom comportamento, assim como dos dispositivos na captura de energia de órgãos, que possuem grande importância médica uma vez que podem salvar vidas. Ambos protótipos foram validados e demonstram a viabilidade destas aplicações para dispositivos de pequeno porte.

Na captura da energia eólica e maremotriz, os resultados mostram a viabilidade de geração elétrica de maior porte podendo ser aplicado em grades áreas, gerando energia suficiente para suprir necessidades de residências. Resultados práticos dos protótipos apresentados possibilitam a formação de redes para tais aplicações de maior demanda.

Como visto no tópico anterior, pode-se criar TENG com diversos polímeros, o que mostra sua versatilidade, já que pode ser desenvolvido com, no mínimo, dois materiais de diferentes tendências de carregamento triboelétrico, apesar da preferência por polímeros fluorados como FEP e PTFE. Já PENG não possui tal versatilidade, uma vez que o material precisa apresentar esta propriedade sendo utilizado majoritariamente PVDF.

Este estudo aborda um tema de impacto energético com grande potencial de exploração mostrando uma ampla área de estudo. Portanto, através deste trabalho de revisão, verifica-se que há possibilidade de desenvolvimento de novos materiais para nanogeradores, além de novos *designs* dos dispositivos e aplicações diferentes das já abordadas.

Logo, os resultados apresentados mostram as diversas áreas de estudo sobre *Energy Harvesting* que podem ser aprimoradas e desenvolvidas por engenheiros de materiais e equipes multidisciplinares, ampliando o impacto positivo na geração de energia sustentável.

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível inferir, com as informações apresentadas que *Energy Harvesting* é um importante aliado da transição energética para que aumente cada vez mais a parcela de energias renováveis. Além disso, resultados promissores para o uso de PENG e TENG mostram que ambas as tecnologias podem ser exploradas e devem ser estudadas para o desenvolvimento contínuo a fim de aumentar a eficiência da captura energética nas mais diversas aplicações.

O uso de polímeros nestas novas tecnologias é de suma importância para a viabilidade destes nanogeradores uma vez que possuem boas propriedades mecânicas, baixa densidade e flexibilidade, com boa processabilidade e facilidade para miniaturizar. Logo, é a classe de materiais com maior margem de exploração de novos estudos, como mostrado em todos as pesquisas realizadas sobre *Energy Harvesting*, polímeros estão presentes e tem papel fundamental para este desenvolvimento tecnológico.

Com isso, a variabilidade de materiais apresentados para a criação de TENG leva a uma maior possibilidade de combinações, uma vez que a eletricidade é gerada na fricção entre os materiais, levando também a uma maior quantidade de estudos sobre nanogeradores triboelétricos, fazendo com que o TENG seja o protagonista dos estudos atuais que cercam o assunto.

Portanto, conclui-se que este trabalho apresenta os estudos já desenvolvidos acerca do tema e as possibilidades de desenvolvimento e aprimoramento na área de *Energy Harvesting* para que se tenha melhores resultados e acelere a transição energética em busca de maior eficiência e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- Advanced Materials - Home**. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/15214095>>. Acesso em: 27/10/2023
- Advanced Materials – Journal Metrics**. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/page/journal/15214095/journal-metrics>>. Acesso em: 27/10/2023
- ALEXANDER, Charles; SADIKU, Matthew. Fundamentos de Circuitos elétricos. 5ed. AMGH Editora Ltda. 2013
- BISWAS, S. K.; VIJAYAN, K. Friction and wear of PTFE - a review. **Wear**, v. 158, n. 1–2, p. 193–211, 1992.
- CHEN, Y. et al. Energy harvesting and wireless power transmission by a hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator. **Energy and Environmental Science**, v. 12, n. 9, p. 2678–2684, 2019.
- FAN, F. R.; TANG, W.; WANG, Z. L. Flexible Nanogenerators for Energy Harvesting and Self-Powered Electronics. **Advanced Materials**, v. 28, n. 22, p. 4283–4305, 7 jun. 2016.
- HUANG, L. et al. Fiber-Based Energy Conversion Devices for Human-Body Energy Harvesting. **Advanced Materials**, v. 32, n. 5, 17 fev. 2020.
- JIANG, T. et al. Robust Swing-Structured Triboelectric Nanogenerator for Efficient Blue Energy Harvesting. **Advanced Energy Materials**, v. 10, n. 23, 4 jun. 2020.
- KYMISSIS, J. et al. Parasitic power harvesting in shoes. **International Symposium on Wearable Computers, Digest of Papers**, v. 1998- Octob, p. 132–139, 1998.
- MISHRA, S. et al. Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications: A Systematic Review. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 304, n. 1, p. 1–25, 2019.
- MOHAMMADPOURFAZELI, S. et al. Future prospects and recent developments of polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric polymer; fabrication methods, structure, and electro-mechanical properties. **RSC Advances**, v. 13, n. 1, p. 370–387, 2023.
- REN, Z. et al. Energy Harvesting from Breeze Wind ($0.7\text{--}6\text{ m s}^{-1}$) Using Ultra-Stretchable Triboelectric Nanogenerator. **Advanced Energy Materials**, v. 10, n. 36, 11 set. 2020.
- SHI, B.; LI, Z.; FAN, Y. Implantable Energy-Harvesting Devices. **Advanced Materials**, v. 30, n. 44, p. 18, 24 nov. 2018.
- WANG, X. et al. Triboelectric Nanogenerator Based on Fully Enclosed Rolling Spherical Structure for Harvesting Low-Frequency Water Wave Energy. **Advanced Energy Materials**, v. 5, n. 24, p. 1–9, 2015.
- ZHANG, L. et al. Lawn Structured Triboelectric Nanogenerators for Scavenging Sweeping Wind Energy on Rooftops. **Advanced Materials**, v. 28, n. 8, p. 1650–1656, 2016.
- ZHOU, W. et al. Enhancement of piezoelectricity in polymer PVDF based on molecular chain structure. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 32, n. 24, p. 28708–28717, 2021.
- ZOU, H. et al. Quantifying the triboelectric series. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019.

ANEXO A – Série triboelétrica

Série triboelétrica com diversos materiais para análise da densidade de carga triboelétrica (ZOU et al., 2019)

NATURE COMMUNICATIONS | <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x>

ARTICLE

Table 1 Triboelectric series of materials and their triboelectric charge density (TECD)				
Materials	Abbr.	Average TECD ($\mu\text{C m}^{-2}$)	STDEV	α
Chemical-Resistant Viton® Fluoroelastomer Rubber		-148.20	2.63	-1.31
Acetal		-143.33	2.48	-1.27
Flame-retardant garolite		-142.76	1.49	-1.26
Garolite G-10		-139.89	1.31	-1.24
Clear cellulose		-133.30	2.28	-1.18
Clear polyvinyl chloride	PVC	-117.53	1.31	-1.04
Polytetrafluoroethylene	PTFE	-113.06	1.14	-1.00
Abrasion-resistant polyurethane rubber		-109.22	0.86	-0.97
Acrylonitrile butadiene styrene	ABS	-108.07	0.50	-0.96
Clear polycarbonate (Glossy)	PC	-104.63	1.79	-0.93
Polystyrene	PS	-103.48	2.48	-0.92
Ultem polyetherimide	PEI	-102.91	2.16	-0.91
Polydimethylsiloxane*	PDMS	-102.05	2.16	-0.90
Polyester fabric (Plain)		-101.48	1.49	-0.90
Easy-to-machine electrical-insulating garolite		-100.33	1.79	-0.89
Food-grade high-temperature silicone rubber		-94.03	0.99	-0.83
Polyimide film	Kapton	-92.88	2.58	-0.82
DuraLar polyester film	PET	-89.44	0.86	-0.79
Polyvinylidene fluoride	PVDF	-87.35	2.06	-0.77
Polyetheretherketone	PEEK	-76.25	1.99	-0.67
Polyethylene	PE	-71.20	1.71	-0.63
High-temperature silicone rubber		-69.95	0.50	-0.62
Wear-resistant garolite		-68.51	1.99	-0.61
Low-density polyethylene	LDPE	-67.94	1.49	-0.60
High impact polystyrene		-67.37	1.79	-0.60
High-density polyethylene	HDPE	-59.91	1.79	-0.53
Weather-resistant EPDM rubber		-53.61	0.99	-0.47
Leather strip (Smooth)		-52.75	1.31	-0.47
Oil-filled cast nylon 6		-49.59	0.99	-0.44
Clear cast acrylic	PMMA	-48.73	1.31	-0.43
Silicone		-47.30	1.49	-0.42
Abrasion-resistant SBR rubber		-40.13	1.31	-0.35
Flexible leather strip (Smooth)		-34.40	0.86	-0.30
Noryl polyphenyl ether		-31.82	0.86	-0.28
Poly(phenylene Sulfide)	PPS	-31.82	0.86	-0.28
Pigskin (Smooth)		-30.10	0.86	-0.27
Polypropylene	PP	-27.23	1.31	-0.24
Slippery nylon 66		-26.09	0.50	-0.23
Weather- and chemical-resistant santoprene rubber		-25.23	0.50	-0.22
Chemical- and steam-resistant aflas rubber		-22.65	1.31	-0.20
Polysulfone		-18.92	0.86	-0.17
Cast nylon 6		-18.35	0.99	-0.16
Copy paper		-18.35	0.50	-0.16
Chemical-resistant and low-temperature fluorosilicone rubber		-18.06	0.86	-0.16
Delrin® Acetal Resin		-14.91	0.50	-0.13
Wood (marine-grade plywood)		-14.05	0.99	-0.12
Wear-resistant slippery garolite		-11.47	0.50	-0.10
Super-stretchable and abrasion-resistant natural rubber		-10.61	0.50	-0.09
Oil-resistant buna-N rubber		2.49	0.23	0.02
Food-grade oil-resistant buna-N/vinyl rubber		2.95	0.13	0.03

Note: STDEV refers to the standard deviation. The α refers to the measured triboelectric charge density of tested materials over the absolute value of the measured triboelectric charge density of the reference material. The material marked with an asterisk "*" means it has strong adhesion with mercury, a small drop of mercury is observed when it is separated with mercury. The measured TECD value may be a bit lower than its real value. Source data are provided as a Source Data file.