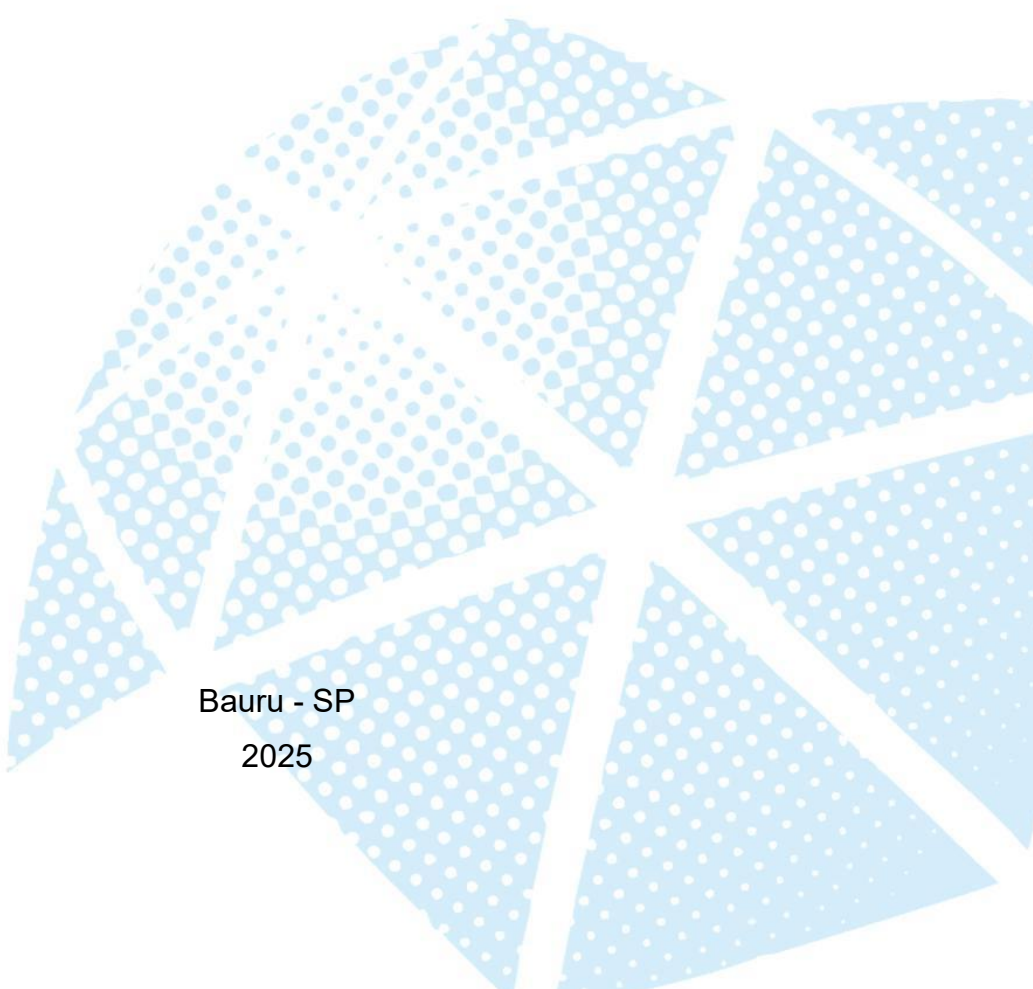


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE BAURU**

GUSTAVO NEVES DE OLIVEIRA

**TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS EM APLICAÇÕES MÉDICAS:
UMA REVISÃO**

Bauru - SP
2025



GUSTAVO NEVES DE OLIVEIRA

**TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS EM APLICAÇÕES MÉDICAS:
UMA REVISÃO**

Trabalho de Graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru, para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Assoc. Fabricio
Guimarães Baptista

Bauru - SP

2025

Oliveira, Gustavo Neves de.

Transdutores piezelétricos em aplicações médicas:
Uma revisão / Gustavo Neves de Oliveira. - Bauru,
2025

49 p.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia de
Bauru, Bauru

Orientador: Fabricio Guimarães Baptista

1. Transdutores piezelétricos. 2. Eletrônica
médica. 3. Materiais acústicos. 4. Ultrassom. I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Bauru. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: **Gustavo Neves de Oliveira**

Título: **Transdutores Piezelétricos em Aplicações Médicas: Uma Revisão**

Trabalho de Graduação defendido e aprovado em 18/11/2025, com

MÉDIA: **10,0 (dez)**, pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista

Prof. Dr. Leandro Melo Campeiro

Prof. Dr. Fernando de Souza Campos

Prof. Dr. José Eduardo Cogo Castanho
Coordenador do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Elaine e Osmundo, e ao meu irmão, Vinicius, por todo amor e suporte fornecido no decorrer da minha formação acadêmica, assim como pela sabedoria e vivências compartilhadas.

Agradeço também ao professor Fabricio Guimarães Baptista pela sua orientação e disposição no decorrer deste trabalho, assim como pelo conhecimento fornecido em suas aulas.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru, por todo conhecimento e pelos serviços prestados a fim de auxiliar no processo de aprendizado.

Finalmente, agradeço a meus amigos: Miguel, Diogo, Gabriel, Nicolas, Francisco, Giovanni e Henrique, por todo suporte, tanto acadêmico quanto emocional, e pelos momentos compartilhados durante nossa jornada.

“Toda tecnologia suficientemente avançada é indistinguível da magia” (Arthur C. Clarke, 1962, p. 36, tradução nossa).

RESUMO

O trabalho a seguir apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de transdutores piezelétricos na medicina. Seguida de uma breve contextualização sobre o fenômeno físico da piezeletricidade, essa revisão tem como objetivo apontar as áreas em que a tecnologia se encontra em uso, assim como áreas em potencial em que possa ser implementada. Além disso, são abordadas lacunas as quais devem ser estudadas futuramente a fim de ampliar o escopo de uso desses transdutores para a realização de diagnósticos, geração de imagem e condução de tratamentos. Esse trabalho demonstra como avanços em engenharia, como na área de materiais e na engenharia de design, são capazes de trazer aperfeiçoamentos na medicina, por meio do desenvolvimento de materiais acústicos mais eficientes, pela miniaturização e incorporação a tecnologias inteligentes e vestíveis, além de resolver problemas como biocompatibilidade, durabilidade e eficiência energética presentes nas aplicações atuais. É possível prever que avanços em materiais e na automação médica irão consolidar os transdutores piezelétricos como dispositivos chave para diagnósticos e tratamentos de alta precisão.

Palavras-chave: transdutores piezelétricos; eletrônica médica; materiais acústicos; ultrassom.

ABSTRACT

The following work presents a bibliographic review on the use of piezoelectric transducers in medicine. Followed by a brief contextualization of the physical phenomenon of piezoelectricity, this review aims to highlight the areas in which the technology is currently used, as well as potential areas where it may be implemented. In addition, it addresses gaps that should be further studied to expand the scope of use of these transducers for diagnostics, image generation, and treatment applications. This work demonstrates how the development of engineering fields, such as materials engineering and design engineering, can bring improvements to medicine through the development of more efficient acoustic materials, miniaturization, and the incorporation of intelligent and wearable technologies, in addition to solving issues such as biocompatibility, durability, and energy efficiency present in current applications. It is possible to foresee that advances in materials and medical automation will consolidate piezoelectric transducers as key devices for high-precision diagnostics and treatments.

Keywords: piezoelectric transducers; medical electronics; acoustic materials; ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração do efeito piezelétrico. Uma força externa é responsável por deslocar o centro de gravidade das cargas e cria um efeito Dipolo. Fonte: (WANG; KANG, 1998).

Figura 2 - Elementos básicos de um transdutor ultrassônico gerador de imagem (HOSKINS, 2010)

Figura 3 - Esquemático de um transdutor de arranjo linear unidimensional (LEE; ROH, 2017)

Figura 4 - (a) Feixe do arranjo linear (b) Feixe do arranjo convexo (c) Feixe do arranjo faseado (LEE; ROH, 2017)

Figura 5 - Esquemático de um transdutor de oscilação mecânica (LEE; ROH, 2017)

Figura 6 - Esquemático da utilização de HIFU em remoção de tumores (IZADIFAR *et al.*, 2020)

Figura 7 - Diagrama de configuração de ESWL com litotriptor focado no cálculo renal (adaptado de SORENSEN *et al.*, 2012)

Figura 8 - Scaffolds produzidos via impressão 3D (ALVES *et al.*, 2023)

Figura 9 - Diagrama ilustrativo de um dispositivo fixador de um sensor PZT para medição de pressão arterial (adaptado de LI *et al.*, 2025)

Figura 10 - Diagrama ilustrativo das camadas de um transdutor ultrassônico para monitoramento neural (adaptado de HOU *et al.*, 2024)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AlN	Aluminum Nitride (Nitreto de Alumínio)
BTO	Barium Titanate (Titaniato de Bário)
CMUT	Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (Transdutor Ultrassônico Micromaquinado Capacitivo)
ESWL	Extracorporeal Shock Wave Litotripsy (Litotripsia por Ondas de Choque Extracorpórea)
ESWT	Extracorporeal Shock Wave Therapy (Terapia por Ondas de Choque Extracorpórea)
HIFU	High Intensity Focused Ultrasound (Ultrassom focado de alta intensidade)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
KNN	Potassium Sodium Niobate (Nióbato de Potássio-Sódio)
LIPUS	Low Intensity Pulsed Ultrasound (Ultrassom pulsado de baixa intensidade)
MEMS	Microelectromechanical Systems (Sistemas Microeletromecânicos)
MUT	Micromachined Ultrasonic Transducer (Transdutor Ultrassônico Micromaquinado)
PCL	Poly(ϵ -caprolactone) (Poli(ϵ -caprolactona))
PENG	Piezoelectric nanogenerator (Nanogeradores Piezelétricos)
PLLA	Poly(L-lactic acid) (Poli(ácido L-láctico))
PMN-PT	Lead Magnesium Niobate–Lead Titanate (Niobato de Magnésio e Chumbo–Titanato de Chumbo)
PMUT	Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer (Transdutor Ultrassônico Micromaquinado Piezelétrico)
PVDF	Polyvinylidene Fluoride (Poli(Fluoreto de vinilideno))
PZT	Lead Zirconate Titanate (Titanato-Zirconato de Chumbo)
PZT-5A	Lead Zirconate Titanate type 5A (Titanato-Zirconato de Chumbo tipo 5A)
PZT-5H	Lead Zirconate Titanate type 5H (Titanato-Zirconato de Chumbo tipo 5H)

ROS	Reactive Oxygen Species (Espécies Reativas de Oxigênio)
SNR	Razão Sinal Ruído
SONAR	Sound Navigation and Ranging (Sistema de navegação e detecção acústica)
TrFE	Trifluoretileno
VDF	Fluoreto de Vinilideno

LISTA DE SÍMBOLOS

d	Constante de Carga Piezelétrica
ϵ	Permissividade elétrica
g	Constante de tensão piezelétrica
k	Coeficiente de Acoplamento
Q	Fator de Qualidade Mecânico
T_C	Temperatura Curie
BaTiO_3	Titaniato de bário
ZnO	Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	CONCEITOS DE PIEZELETRICIDADE.....	17
2.1.1	Princípios físicos de Piezeletricidade	17
2.1.2	Principais Parâmetros	18
2.2	MATERIAIS PIEZELÉTRICOS	19
2.2.1	Materiais Piezelétricos Monocristalinos	20
2.2.2	Cerâmicas Piezelétricas (Materiais Policristalinos)	20
2.2.3	Polímeros Piezelétricos.....	21
3	APLICAÇÕES MÉDICAS.....	22
3.1	ULTRASSONOGRAFIA.....	23
3.1.1	Transdutores Piezelétricos na Ultrassonografia	24
3.2	TERAPIA MÉDICA	28
3.2.1	Remoção de Tumores	28
3.2.2	Fisioterapia.....	29
3.2.3	Litotripsia	29
3.2.4	Terapia Sonodinâmica.....	30
3.3	BIOENGENHARIA E ENGENHARIA DE TECIDOS.....	30
3.3.1	Regeneração de Tecidos	30
3.3.2	Liberação de Fármacos	31
3.4	MONITORAMENTO E SENSORIAMENTO	31
3.4.1	Monitoramento Cardiovascular	32
3.4.2	Monitoramento Respiratório	32
3.4.3	Monitoramento Neural	33
3.4.4	Monitoramento Metabólico	34
3.4.5	Acessórios	34
4	AVANÇOS TECNOLÓGICOS E TENDÊNCIAS.....	35
4.1	MINIATURIZAÇÃO E INTEGRAÇÃO COM DISPOSITIVOS VESTÍVEIS	35
4.1.1	Monitoramento de saúde.....	35
4.1.2	Interfaces Homem-Máquina	36
4.2	NOVOS MATERIAIS	36
4.2.1	Materiais Piezelétricos livres de Chumbo	36
4.2.2	Materiais Piezelétricos Flexíveis.....	37
4.2.3	MEMS.....	38
4.3	TECNOLOGIAS DE TRANSDUTORES PARA IMAGEM.....	39

	4.3.1	Transdutores CMUT e PMUT.....	39
	4.3.2	Teranóstico em 3D e 4D	39
	4.4	ENERGIA AUTOALIMENTADA	39
	4.5	APLICAÇÕES EMERGENTES	40
	4.5.1	Terapia Sonodinâmica e Imunoterapia.....	40
	4.5.2	Scaffolds em tecidos neurais.....	40
5		DESAFIOS E LIMITAÇÕES	41
	5.1	MATERIAIS E PERFORMANCE	41
	5.2	QUALIDADE DE IMAGEM E APLICAÇÕES CLÍNICAS	42
	5.3	FABRICAÇÃO E ESCALABILIDADE	42
	5.4	ENGENHARIA E DESIGN DE TRANSDUTORES	43
6		CONCLUSÃO	44

1 INTRODUÇÃO

À medida que a humanidade foi desenvolvendo maneiras de automatizar os meios de produção, novas maneiras de se coletar dados que nos forneçam informações sobre o procedimento em tempo real, assim como dados das condições das máquinas que ali estão atuando foram desenvolvidas. A pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias voltadas para o sensoriamento tornaram-se fundamentais para garantir que os processos industriais apresentem o desempenho esperado e que os equipamentos operem em condições ideais, contribuindo para um aumento da eficiência, da qualidade dos produtos e para a redução do tempo e custo de produção (SILVA, 2020).

A Piezeletricidade foi descoberta em 1880 pelos irmãos Curie e teve sua primeira aplicação comercial somente em 1921, com o desenvolvimento do oscilador elétrico estabilizado por cristal de quartzo seguidos pelo desenvolvimento de novos materiais à base de óxido de titânio e bário (BaTiO_3), em 1947, sendo mais baratos e eficientes. Atualmente, a presença de materiais cerâmicos, poliméricos, compósitos e outros em desenvolvimento, assim como o quartzo, estão amplamente disponíveis no mercado e aplicados em áreas como controle e processamento de sinais, som e ultrassonografia, atuadores e motores, sensores e na área de ignição adaptativa (HEYWANG, 2008).

A utilização de transdutores piezelétricos na medicina está principalmente associada às áreas de som e ultrassom primariamente e deve-se levar em conta diversos fatores como: limitações de tamanho, compatibilidade biológica e flexibilidade, o que torna inviáveis quaisquer aplicações diretas de dispositivos piezelétricos convencionais. Para que essa tecnologia seja aplicada na medicina são necessários diversos estudos sobre as estruturas piezelétricas presentes no corpo humano a fim de emular seus comportamentos e desenvolver dispositivos compatíveis (CHEN-GLASSER *et al.*, 2018).

Com isso, o objetivo dessa revisão é de pontuar os transdutores de natureza piezelétrica em uso na medicina, descrever seu funcionamento e estado da arte, assim como mencionar tecnologias emergentes e lacunas em seu processo de pesquisa e desenvolvimento. Utilizando o formato de pesquisa bibliográfica e tendo como guia as palavras-chave "Transdutores piezelétricos", "Eletrônica médica", "Ultrassom" e "Materiais acústicos", foi possível realizar a coleta de dados de artigos e livros de referência no assunto, a fim de abordar o tema proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

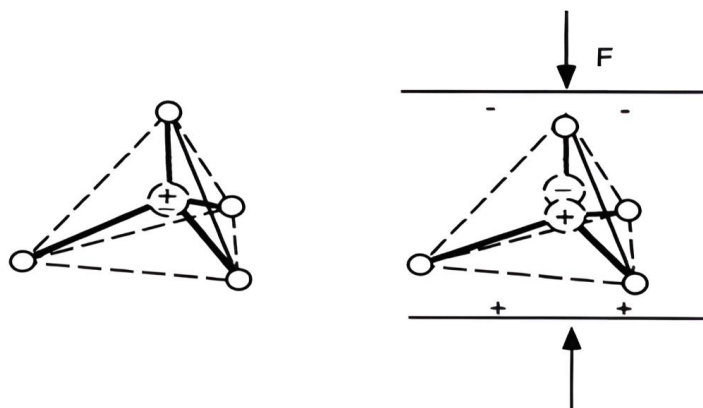
2.1 CONCEITOS DE PIEZELETRICIDADE

2.1.1 Princípios físicos de Piezeletricidade

O efeito piezelétrico, descrito fisicamente, é a propriedade de certos materiais de converter energia mecânica em energia elétrica, sendo esse o efeito piezelétrico direto, e de converter energia elétrica em energia mecânica, sendo esse o efeito piezelétrico reverso (SHIGUE *et al.*, 2010). Um transdutor piezelétrico é um sensor ou atuador capaz de utilizar esses fenômenos em seu modo de operação.

Para compreender esse fenômeno, pode-se decorrer ao modelo descrito por WANG e KANG (1998) e demonstrado na Figura 1, onde um átomo de carga positiva for posicionado como sendo o centro de gravidade de um arranjo tetraédrico, com os átomos das extremidades tendo carga negativa. Observa-se que ao exercer pressão nas extremidades do tetraedro, tem-se o deslocamento do centro de gravidade dos átomos negativos, não coincidindo no átomo de carga positiva. Isso cria um dipolo elétrico que leva a polarização de uma face positivamente carregada e outra face negativamente carregada no cristal.

Figura 1 - Demonstração do efeito piezelétrico. Uma força externa é responsável por deslocar o centro de gravidade das cargas e cria um efeito Dipolo.



Fonte: adaptado de (WANG; KANG, 1998).

Para que um hipotético cristal feito desse arranjo tetraédrico, é necessário que ele não seja centrossimétrico, a fim de garantir que os dipolos criados pelos tetraedros não sejam compensados e assim negando sua característica piezelétrica (WANG; KANG, 1998).

2.1.2 Principais Parâmetros

Dentre as propriedades relacionadas a esse fenômeno, valem citar a constante de carga piezelétrica 'd', constante de tensão piezelétrica 'g', coeficiente de acoplamento 'k', fator de qualidade mecânico 'Q' e a temperatura Curie 'TC' (SHIGUE *et al.*, 2010).

- Constante de carga piezelétrica (d)

A constante de carga piezelétrica é a relação entre a carga elétrica gerada por unidade de área pela força mecânica aplicada. Esse parâmetro tem como objetivo mensurar a eficiência da conversão de energia mecânica em energia elétrica de um material, ou vice-versa (TICHÝ *et al.*, 2010).

- Constante de tensão piezelétrica (g)

A constante de tensão piezelétrica é a razão entre o campo elétrico produzido pelo estresse mecânico aplicado. Por meio da permissividade relativa (ϵ) é possível relacionar as constantes piezelétricas 'd' e 'g' por meio da Equação 1 (TICHÝ *et al.*, 2010):

$$g = \frac{d}{\epsilon} \left(\frac{Vm}{N} \right) \quad (1)$$

Fonte: (TICHÝ *et al.*, 2010)

- Coeficiente de Acoplamento (k)

O fator de acoplamento 'k' é a razão entre a energia mecânica armazenada pelo efeito piezelétrico sobre a energia elétrica introduzida ou vice-versa (HONG *et al.*, 2016).

- Fator de Qualidade mecânico (Q)

O fator de qualidade mecânico 'Q' é um parâmetro de estabilidade da performance de um oscilador durante a operação, representando o amortecimento do material (HONG *et al.*, 2016). Ele é a razão da reatância com a resistência equivalente do circuito equivalente de um ressonador piezelétrico (TICHÝ *et al.*, 2010).

- Temperatura Curie (TC)

A temperatura Curie se refere à temperatura a qual às características magnéticas de um material não se encontram mais presentes, tornando um material anteriormente ferromagnético em um material paramagnético. Essa temperatura age como um parâmetro limítrofe para que materiais piezelétricos mantenham sua característica piezelétrica (MENG *et al.*, 2022).

2.2 MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

Historicamente, o cristal de quartzo teve importância significativa em tecnologias envolvendo piezeletricidade. Por conta de suas características piezelétricas, baixo ruído acústico, alta estabilidade, facilidade de processamento e abundância, além de outras propriedades, o uso cristal de quartzo mostrou-se dominante na área. Em 1880, os estudos que levaram os irmãos Curie a descobrir o efeito piezelétrico foram realizados sobre cristais de quartzo; em 1920, o primeiro oscilador elétrico estabilizado à base de cristal de quartzo foi inventado e a partir desse ponto diversas inovações surgiram por conta do advento desses cristais (HEYWANG, 2008).

A partir dessas descobertas, a área de pesquisa de materiais piezelétricos ganhou relevância, com o objetivo de desenvolver materiais com características mais desejáveis que o cristal de quartzo, como potencial piezelétrico, compatibilidade ambiental e rigidez (ZHU, 2024). Atualmente, os materiais piezelétricos podem ser classificados em diferentes categorias de acordo com sua composição e estrutura cristalina (DONG *et al.*, 2024).

2.2.1 Materiais Piezelétricos Monocristalinos

Esses são materiais inorgânicos compostos por redes cristalinas ordenadas, tendo seus átomos organizados no espaço de forma a manter a orientação. Dentre esses, situam-se os cristais de quartzo, o germanato de titânio e o galato de lítio. Ao mesmo tempo que demonstram boa estabilidade, alta resistência mecânica e alta performance de isolamento, esses materiais são caros e possuem coeficientes piezelétricos menores que os das cerâmicas piezelétricas, sendo então reservados para usos de alta precisão (DONG *et al.*, 2024).

2.2.2 Cerâmicas Piezelétricas (Materiais Policristalinos)

Esses materiais também são inorgânicos, porém são obtidos pela mistura e moldagem de matérias-primas sob sinterização em alta temperatura. Em geral, as cerâmicas possuem tempos de resposta curtos e são bastante sensíveis, porém são frágeis, possuem baixa resistência a deformações e fadiga com facilidade, limitando seu uso em superfícies curvas (DONG *et al.*, 2024).

As cerâmicas com estrutura de perovskitas possuem destaque adicional por serem mais abundantes, econômicas e eficientes em conversão eletromecânica. Pode-se classificar as cerâmicas mais utilizadas como pertencentes a 3 grupos: Titanato-Zirconato de Chumbo (PZT), Titanato de Bário (BTO) e Nióbato de Potássio-Sódio (KNN), com destaque ao PZT por sua elevada constante piezelétrica, sendo o principal motivo da sua ampla utilização para fins medicinais (ZHU, 2024).

2.2.3 Polímeros Piezelétricos

Os polímeros piezelétricos são materiais orgânicos que obtêm suas características piezelétricas a partir de seu arranjo molecular. Dentre suas vantagens, situam-se sua flexibilidade, baixa densidade, baixa impedância e altas constantes de tensão elétrica. Já suas desvantagens se encontram em suas constantes de tensão mecânica, fraco sinal de saída e limites em suas aplicações em certas temperaturas a fim de não interferir com a cadeia polimérica. São aplicados em sensores de pressão, sistemas de ultrassonografia hidroacústica e dispositivos de ignição e detonação (DONG *et al.*, 2024).

Entre os polímeros mais estudados, destaca-se o Poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF), empregado devido a sua processabilidade e boa compatibilidade com outros materiais piezelétricos. Devido à sua baixa constante piezelétrica, esse polímero passa por uma modificação, sendo adicionado trifluoretileno (TrFE) com o Fluoreto de Vinilideno (VDF) formando P(VDF-TrFE), causando um aumento da performance piezelétrica do polímero quando exposto a condições de pressão e temperatura adequadas. Esse processo de modificação confere maior versatilidade aos polímeros, possibilitando serem combinados com outros materiais, como PZT (PZT/PVDF), a fim de aprimorar certas características de desempenho do polímero (ZHU, 2024)

3 APLICAÇÕES MÉDICAS

Com os desenvolvimentos mencionados anteriormente, é possível notar uma grande presença da piezeletricidade quando se trata de avanços tecnológicos. O surgimento de novos materiais e os avanços em design de produtos possibilitou a expansão do uso de transdutores piezelétricos na área da medicina, como na ultrassonografia, terapia médica, nas áreas de sensoriamento e monitoramento e na bioengenharia e engenharia de tecidos.

Após a descoberta do efeito piezelétrico pelos irmãos Curie, avanços significativos na área da ultrassonografia foram feitos. Em 1912, tentativas foram feitas de utilizar ondas sonoras para a detecção do navio Titanic; na 1ª Guerra Mundial, o físico francês Paul Langevin realizou pesquisas utilizando ondas para detectar navios alemães, servindo como base para a invenção do sistema de Sound Navigation and Ranging (SONAR) americano; em 1940 apareceram os primeiros usos de técnicas de reflexão sonora, acompanhado pelo desenvolvimento de um transdutor capaz de transmitir e receber ondas ultrassônicas, em 1944; até que em 1956 o ultrassom foi introduzido na medicina e na área de diagnósticos por Ian Donald, utilizando o método de imagem modo A, seguido por métodos de formação de imagem mais sofisticados (NADRLJANSKI *et al.*, 2010).

A partir da introdução desse fenômeno na área médica, surgiram estudos voltados à compreensão da propriedade piezelétrica presente em tecidos biológicos, campo denominado biopiezeletricidade (KAPAT *et al.*, 2020). Em termos de fisionomia celular, a presença de campos elétricos endógenos é crucial para a manutenção de processos vitais como proliferação, expressão dos genes e migração, fazendo com que a estimulação elétrica demonstre elevado potencial nas áreas de regeneração de tecidos, neuromodulação e tratamento de câncer (MIRGHAFARI *et al.*, 2025).

Em sensoriamento e monitoramento, a presença de nanogeradores piezelétricos possibilitou a existência de dispositivos eletrônicos flexíveis e dobráveis, promovendo o desenvolvimento de sensores medicinais inteligentes miniaturizados capazes de envio de informações sem fio (CHOUDHRY *et al.*, 2020).

3.1 ULTRASSONOGRAFIA

O ultrassom é um tipo de radiação não ionizante, utilizado para adquirir imagens de tecidos em tempo real. O som é uma onda que é emitida e que se propaga-se através de diferentes meios materiais, interagindo com as partículas do meio, transmitindo energia sem causar o seu deslocamento de matéria. Esse fenômeno possui características físicas como comprimento de onda, amplitude, frequências, picos e vales. Esses parâmetros são importantes para determinar a instrumentação utilizada. A imagem do ultrassom ocorre por conta de cristais piezelétricos, responsáveis pela transformação de energia elétrica em energia mecânica na geração de ondas acústicas que se propagam pelo meio, se refletem e voltam aos cristais, responsáveis por transformar a energia acústica refletida em energia elétrica, formando a imagem. Cada tecido pode ser caracterizado por um meio distinto, com diferentes propriedades acústicas e impedâncias. Tais impedâncias criam atenuações, que são perdas de energia que ocorrem ao longo da propagação da onda sonora no tecido.

Os principais fatores que criam tais atenuações são: refração, dispersão, absorção, reflexão e o caminho de volta das ondas refletidas (POGGI; PALAVENCINO, 2024).

De acordo com Moran e Thomson (2020), as imagens de ultrassonografia podem ser dos seguintes tipos:

- Imagem modo B 2D: São imagens geradas em tempo real em uma tela, as quais um transdutor atua bifásicamente, inicialmente como emissor de pulsos e então como receptor de pulsos refletidos. Esse método retorna uma imagem de escala cinza, a qual estruturas altamente refletivas retornam ecos mais claros e as menos refletivas retornam mais escuras;
- Imagem modo M: Método utilizado para analisar estruturas em movimento rápido. Utiliza somente uma linha de uma imagem modo B que esteja interceptando uma região de interesse e adquire somente as imagens referentes a região dessa linha, providenciando uma maior resolução temporal;

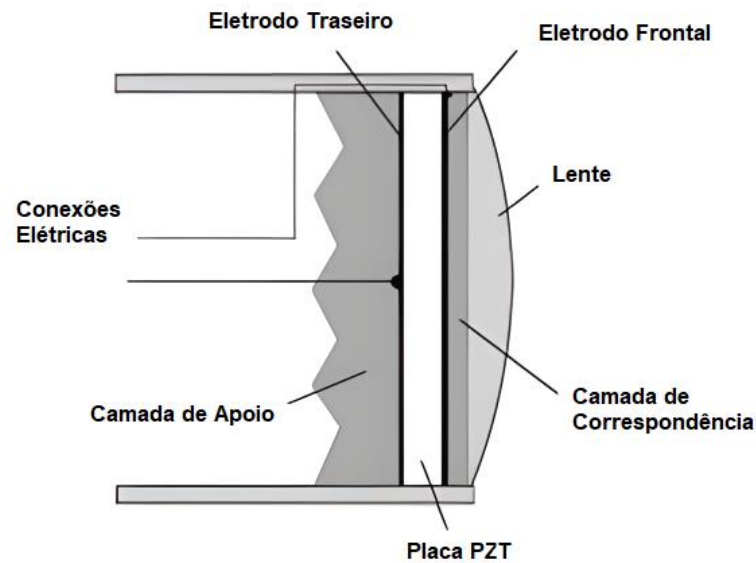
- **Imagens 3D e 4D:** Imagens 3D são adquiridas quando múltiplas imagens modo B 2D são tiradas consecutivamente em pequenos intervalos predefinidos ao longo de um certo trajeto. As imagens 4D são obtidas pelo mesmo processo ao longo de um determinado período;
- **Imagens Doppler:** As imagens por efeito Doppler funcionam a partir do princípio de que a diferença entre a frequência de ondas transmitidas e recebidas está relacionada a velocidade do elemento dispersor (geralmente células sanguíneas).

3.1.1 Transdutores Piezelétricos na Ultrassonografia

De acordo com Hoskins (2010), todo transdutor piezelétrico é composto pelos mesmos componentes básicos, demonstrados na Figura 2:

- a) **Placa Piezelétrica:** Componente responsável pela geração e detecção de som, geralmente composto por PZT.
- b) **Camada de apoio:** Camada de material capaz de absorver ultrassom e com alta impedância acústica localizada atrás da placa piezelétrica, com o objetivo de diminuir as perdas causadas pela impedância acústica elevada do PZT em relação a camada de pele.
- c) **Camada de correspondência acústica:** Camada localizada na frente da placa piezelétrica, com a função de equalizar a impedância entre a camada de PZT e a pele do paciente a fim de reduzir a perda de potência da onda.
- d) **Lente:** Incorporada após a camada de correspondência, seu formato pode auxiliar a análise de certos planos a serem escaneados dependendo do transdutor utilizado.

Figura 2 - Elementos básicos de um transdutor ultrassônico gerador de imagem



Fonte: adaptado de (HOSKINS, 2010)

Existem diversos tipos de transdutores ultrassônicos empregados em diferentes áreas da medicina, variando conforme a posição anatômica, o tamanho e as propriedades acústicas das estruturas a serem analisadas.

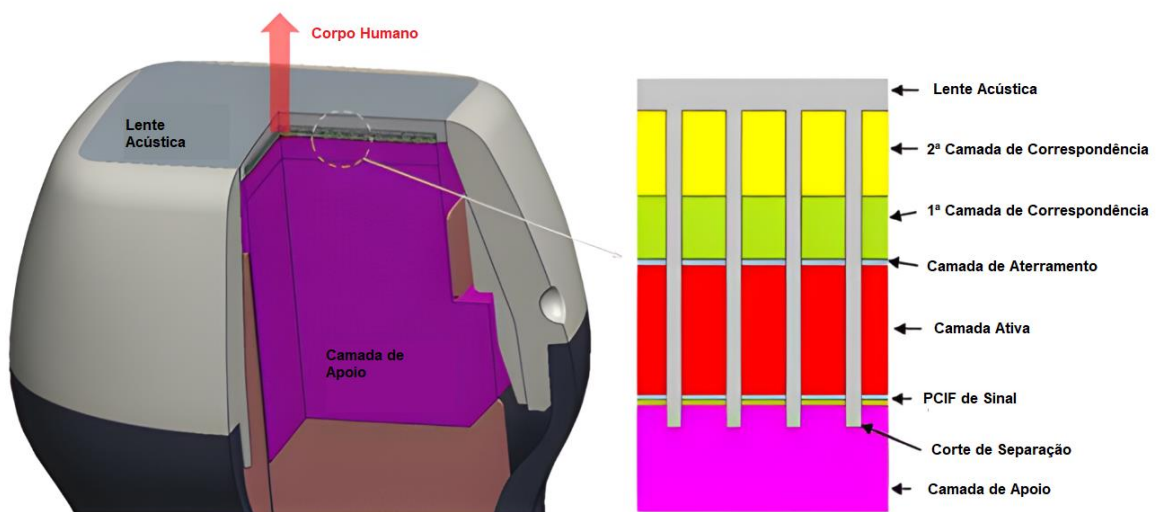
De acordo com Lee e Roh (2017), os transdutores são classificados, de maneira abrangente, em transdutores com arranjo linear unidimensional, bidimensional e de oscilação mecânica. O primeiro é composto por vários elementos piezelétricos dispostos linearmente, gerando uma imagem 2D plana. Já o bidimensional emite um feixe piramidal que permite a aquisição de imagens volumétricas tridimensionais. Finalmente o transdutor com oscilação mecânica é capaz de formar imagens 3D por meio da combinação de múltiplas imagens bidimensionais adquiridas sequencialmente.

Segundo Lee e Roh (2017), esses elementos podem ser utilizados com as seguintes finalidades:

- Transdutores para imagens 2D de seção transversal

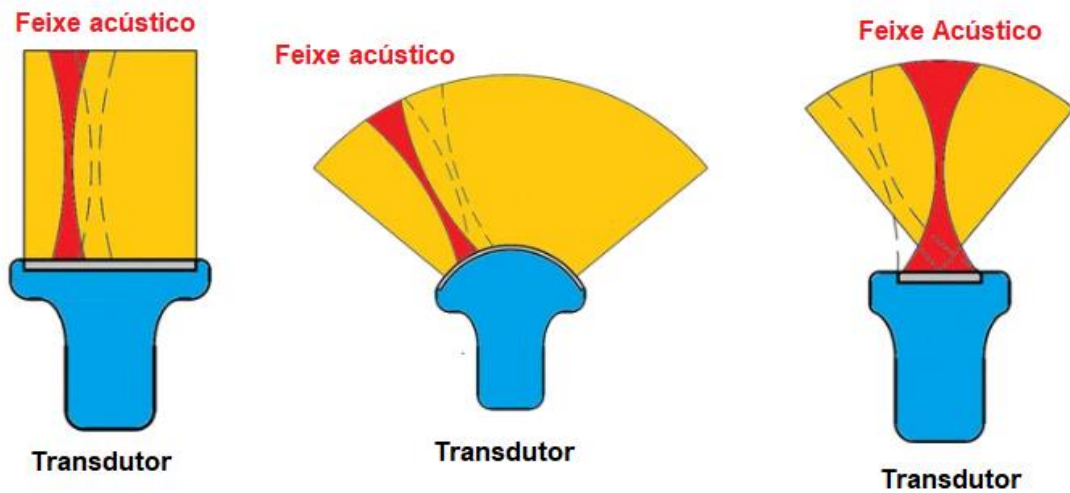
Imagens 2D de seção transversal são geradas a partir do uso de transdutores de arranjo unidimensional, cuja estrutura interna (incluindo lente, camadas de apoio, camadas de correspondência e placa piezelétrica) pode ser visualizada a partir da Figura 3. Esse arranjo consiste na disposição de elementos piezelétricos que geram o feixe ultrassônico que tomará forma correspondente à disposição que se encontra e de acordo com o controle do número de elementos a serem operados. Como demonstrado na Figura 4, os feixes desses transdutores podem ser dispostos de maneira linear, gerando um feixe retangular, faseada, gerando um feixe em formato de cone e convexa, gerando um feixe em formato de leque. Com isso, cada disposição acaba por exercer uma função específica: o arranjo linear é utilizado para imagens de precisão, sendo operadas a frequências mais elevadas; o arranjo convexo é utilizado para varrer uma área mais vasta e profunda à custa de resolução; enquanto o arranjo faseado é utilizado quando o alvo está coberto por obstáculos, já que a operação sequencial dos elementos do arranjo faz com que o transdutor seja capaz de direcionar o feixe.

Figura 3 - Esquemático de um transdutor de arranjo linear unidimensional.



Fonte: adaptado de (LEE; ROH, 2017)

Figura 4 - Feixe do arranjo linear, feixe do arranjo convexo e feixe do arranjo faseado

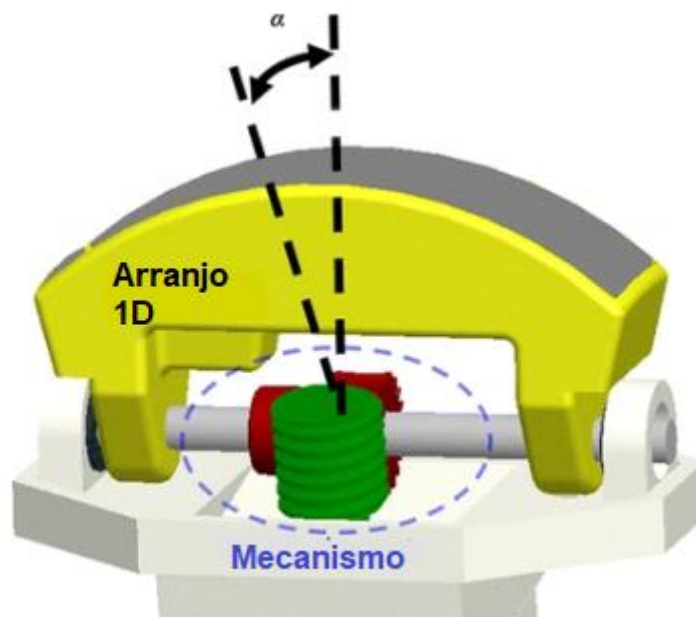


Fonte: adaptado de (LEE; ROH, 2017)

- Transdutores para imagens 3D

Imagens 3D são geradas a partir de duas maneiras: a partir de um transdutor de oscilador mecânico, cujo mecanismo de oscilação é apresentado na Figura 5, capaz de gerar a imagem a partir da combinação de uma série de imagens 2D do arranjo unidimensional; ou por meio de um transdutor de arranjo 2D, com milhares de elementos piezelétricos responsáveis por emitir um feixe em formato piramidal.

Figura 5 - Esquemático de um transdutor de oscilação mecânica



Fonte: adaptado de (LEE; ROH, 2017)

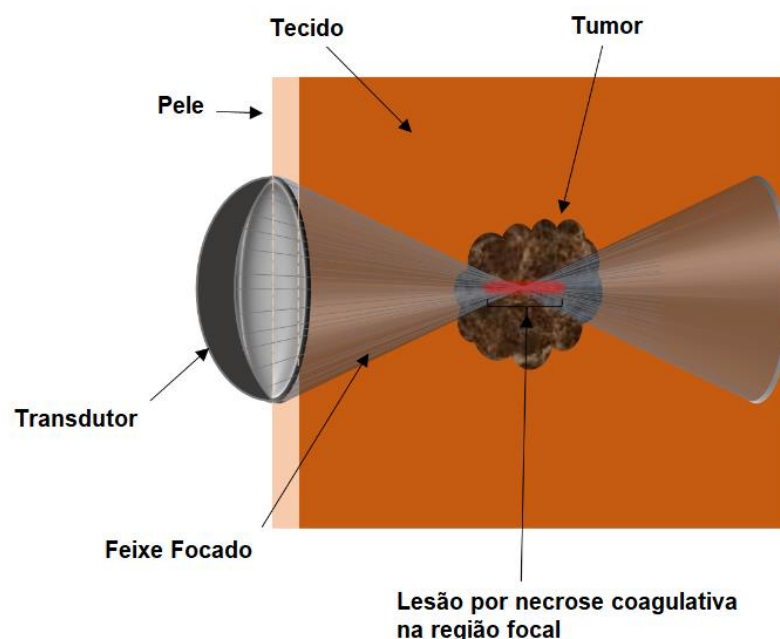
3.2 TERAPIA MÉDICA

Diferentemente da ultrassonografia diagnóstica, que utiliza os sensores para captar imagens de uma área do corpo, a utilização de transdutores piezelétricos na terapia serve para o tratamento de regiões específicas no corpo. A aplicação consiste na emissão de ondas em uma pequena região para o tratamento de lesões sem comprometer o tecido humano ao redor (BAI *et al.*, 2024).

3.2.1 Remoção de Tumores

Quando usadas em remoção de tumores, ondas de ultrassom são emitidas passando pela pele e tecido humano a fim de chegar na região onde se encontram as células cancerígenas, formando uma região de alta energia que acaba por destruir tais células, fenômeno demonstrado na Figura 6. Dentre suas vantagens, destaca-se o fato de ser um procedimento não invasivo, além de se apresentar como uma alternativa para pacientes que aguardam operação. O principal tipo de transdutor utilizado para essa função é classificado como *High Intensity Focused Ultrasound* (HIFU). Esses são transdutores de ultrassom focal, possuindo formato de tigela, o que permite a formação de um feixe acústico estreito e altamente focalizado (BAI *et al.*, 2024).

Figura 6 - Esquemático da utilização de HIFU em remoção de tumores



Fonte: adaptado de (IZADIFAR *et al.*, 2020)

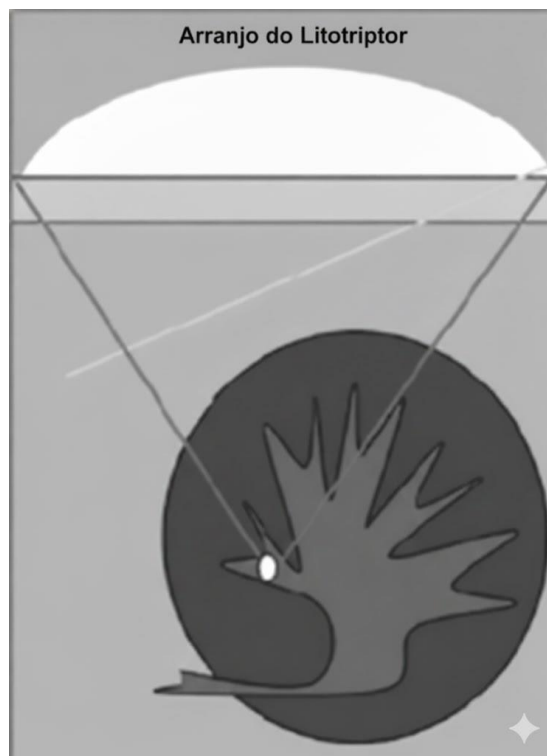
3.2.2 Fisioterapia

Para fins fisioterapêuticos, transdutores piezelétricos podem ser utilizados na *Extracorporeal Shockwave Therapy* (ESWT). Baseado no efeito piezelétrico reverso, essa terapia envolve múltiplos elementos piezelétricos acoplados em configuração esférica, aplicado em uma cavidade contendo fluido, que então recebe um estímulo elétrico, fazendo com que ela retorne um estímulo mecânico similar a uma onda de choque, responsável por induzir o processo de regeneração celular (WANG, 2012).

3.2.3 Litotripsia

No caso da litotripsia, o estímulo causado pelo transdutor será utilizado na remoção de cálculos, seguindo o método de *Extracorporeal Shockwave Lithotripsy* (ESWL). O princípio desse método, apresentado na Figura 7, consiste na emissão de ondas acústicas para gerar uma onda de choque de alta energia responsável pela fragmentação do cálculo. O transdutor em questão é um litotriptor piezelétrico, composto por piezo cerâmicas dispostas em configuração cônica (EL HAMSHARY *et al.*, 2023).

Figura 7 - Diagrama de configuração de ESWL com litotriptor focado no cálculo renal



Fonte: adaptado de (SORENSEN *et al.*, 2012)

3.2.4 Terapia Sonodinâmica

A terapia Sonodinâmica é um método utilizado no combate ao câncer, sendo um método não invasivo e de simples execução. Ela utiliza a ação mecânica das ondas de ultrassom com agentes sonossensibilizadores, promovendo a geração de substâncias classificadas como *Reactive Oxygen Species* (ROS), que acabam por oxidar estruturas internas de células causando danos e induzindo a morte seletiva de células tumorais (BAI *et al.*, 2025).

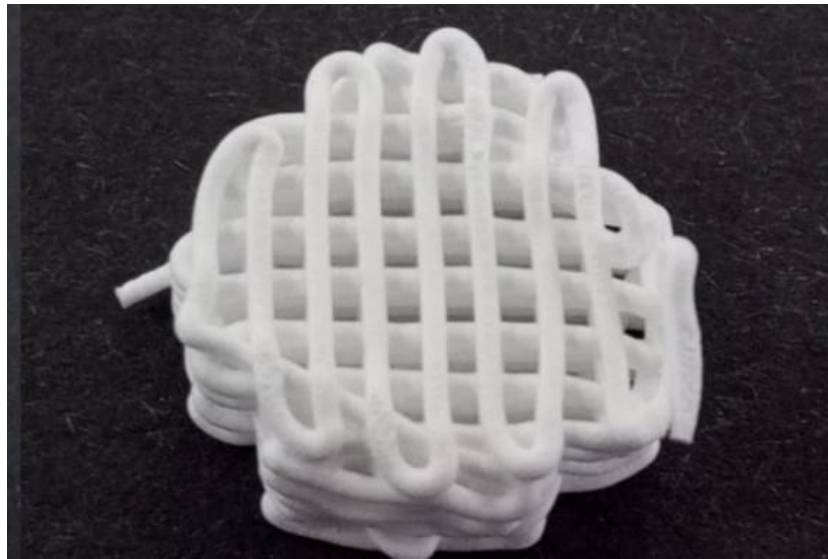
3.3 BIOENGENHARIA E ENGENHARIA DE TECIDOS

Transdutores piezelétricos utilizados para bioengenharia e engenharia de tecidos tem como foco principal o estímulo a regeneração celular e serve de auxílio ao transporte de medicamentos.

3.3.1 Regeneração de Tecidos

Transdutores piezelétricos podem ser usados indiretamente na regeneração de tecidos por meio de emissão de ultrassom. Especificamente no estímulo de Scaffolds piezelétricos (apresentados na Figura 8). A ideia do uso de Scaffolds é de promover a atividade de regeneração de tecidos no local onde é utilizado. São feitos de materiais biocompatíveis com a região que são utilizados e capazes de ser estimulados por sinais elétricos de baixa intensidade. Portanto, o uso de um transdutor de ultrassom se demonstra necessário para essa aplicação, sendo útil, por exemplo, para o estímulo de regeneração de tecido ósseo (MIRGHAFARI *et al.*, 2025).

Figura 8 - Scaffolds produzidos via impressão 3D



Fonte: adaptado de (ALVES *et al.*, 2023)

3.3.2 Liberação de Fármacos

Com a utilização de materiais piezelétricos biocompatíveis, é possível desenvolver transdutores piezelétricos de ultrassom sem fio, ultrasensíveis, capazes de auxiliar na entrega de compostos ativos de fármacos através da barreira sanguínea-cerebral, através da emissão de ondas sonoras de baixa intensidade bastante focalizadas na região desejada. Esses transdutores, tradicionalmente, utilizam materiais como PZT, Óxido de Zinco (ZnO) e PVDF (CURRY *et al.*, 2019).

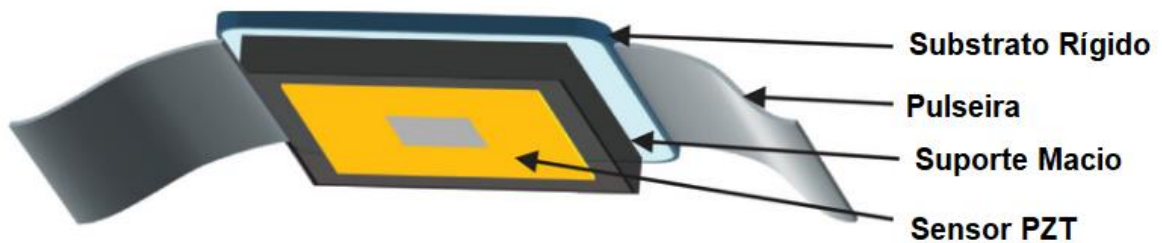
3.4 MONITORAMENTO E SENSORIAMENTO

Os transdutores piezelétricos utilizados nestas áreas são primariamente utilizados para fornecer dados sobre o funcionamento de sistemas específicos do corpo humano, fornecendo indicadores de performance que auxiliam na tomada de decisões e no processo diagnóstico.

3.4.1 Monitoramento Cardiovascular

Nesta aplicação, os transdutores piezelétricos são utilizados para medição pressão sanguínea e medição de pulso. O método mais comum na medição de pressão consiste na fixação de sensores de pressão piezelétricos acima da artéria radial por meio de fitas médicas. Na Figura 9, observa-se um acessório com um sensor piezelétrico a base de PZT, que se veste no pulso com o objetivo de medição de pressão sanguínea (LI *et al.*, 2025).

Figura 9 - Diagrama ilustrativo de um dispositivo fixador de um sensor PZT para medição de pressão arterial



Fonte: adaptado de (LI *et al.*, 2025)

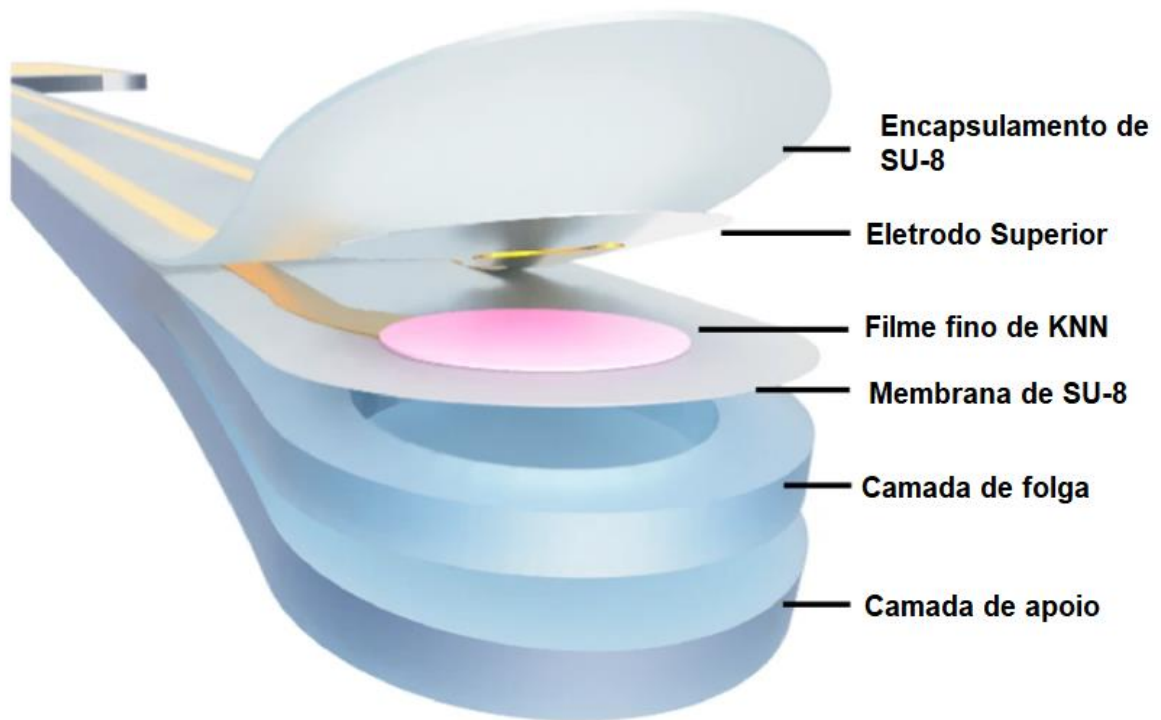
3.4.2 Monitoramento Respiratório

Quando utilizados para monitorar indicadores respiratórios, sensores piezelétricos são geralmente integrados em acessórios ou em adesivos. Ao medir a frequência de respiração, sua sensibilidade aos estímulos mecânicos demonstram ser tanto uma vantagem, por detectar alterações sutis nos movimentos abdominais ou peitorais, como uma desvantagem, por ser capaz de detectar outros movimentos não relacionados ao processo respiratório (VITAZKOVA *et al.*, 2024).

3.4.3 Monitoramento Neural

Para fins de monitoramento Neural, os transdutores piezelétricos são utilizados para identificação de distúrbios neurológicos. O uso de transdutores emissores de ultrassom é capaz de varrer uma vasta área de análise, porém encontram obstáculos como a elevada espessura óssea e dos tecidos presentes no crânio. A Figura 10 mostra um esquema da composição interna de um acessório de monitoramento neural, onde é utilizado um sensor piezelétrico a base de um filme fino de KNN (HOU *et al.*, 2024).

Figura 10: Diagrama ilustrativo das camadas de um transdutor ultrassônico para monitoramento neural



Fonte: adaptado de (HOU *et al.*, 2024)

3.4.4 Monitoramento Metabólico

Sendo usados para monitoramento metabólico, transdutores piezelétricos são responsáveis por fornecer informações referentes aos níveis glicêmicos do organismo por meio da alteração na frequência de oscilação de seus cristais no momento que interagem com a molécula de interesse. Nesse caso, gotas de saliva são utilizadas em um sensor piezelétrico que reage a presença de glicose. Para esse fim, são utilizados materiais piezelétricos de sua alta sensibilidade e alta seletividade, sendo essa a característica de compatibilidade correspondente somente com a do alvo que se deseja ser analisado (SAFARKHANI *et al.*, 2023).

3.4.5 Acessórios

A fim de desenvolver tecnologias capazes de serem accessorizadas, são necessários biossensores piezelétricos flexíveis, capazes de serem acoplados na pele. Dependendo do material a ser utilizado, da estrutura do transdutor, de sua compatibilidade, seletividade e sensibilidade, pode-se desenvolver um sensor capaz de medir diversos indicadores, relevantes para o monitoramento cardiovascular, neural e respiratórios (WANG *et al.*, 2022).

4 AVANÇOS TECNOLÓGICOS E TENDÊNCIAS

Atualmente, estudos são realizados a fim de expandir a aplicabilidade de transdutores piezelétricos. A procura por sensores menos invasivos e mais acessíveis, bem como materiais piezelétricos com mais elevada biocompatibilidade são exemplos de como são implementadas melhorias aos transdutores já utilizados. Paralelamente, também há uma crescente busca por novas áreas em que esse recurso possa ser usado de maneira auxiliar.

4.1 MINIATURIZAÇÃO E INTEGRAÇÃO COM DISPOSITIVOS VESTÍVEIS

Estudos realizados sobre engenharia de design e engenharia de materiais são os principais responsáveis pela ampliação do uso de tecnologias piezelétricas em diferentes áreas da medicina. A tendência é de desenvolver biossensores cada vez mais compatíveis com as características biológicas do corpo humano, com maior flexibilidade e menor tamanho, tendo em vista o conforto do usuário, e a compatibilidade dos wearables com a pele humana.

Como evidenciado em Chen (2024), podendo assumir a forma de filmes ultrafinos, peles eletrônicas, e-tattoos e adesivos, wearables piezelétricos tem elevado potencial nas áreas de monitoramento de saúde e interfaces homem e máquina:

4.1.1 Monitoramento de saúde

Na área de monitoramento de saúde, os *wearables* piezelétricos são tecnologias promissoras nas áreas de prevenção de doenças, medicina diagnóstica e tratamentos. Chen (2024) menciona estudos focados na parametrização da resposta piezelétrica de uma onda causada por pulsos arteriais, no advento de sensores não invasivos para monitoramento de pressão sanguínea sem a necessidade de uma função de transferência entre sinal elétrico e pressão sanguínea e no uso de um bracelete fino possuindo um arranjo de sensores, um sistema de pressão adaptável e um módulo de processamento de sinais. Esses estudos acabam por demonstrar um possível avanço no uso de *wearables* para monitoramento de pressão sanguínea. Além desses, são apresentados estudos sobre o uso de sistemas de monitoramento sem fio utilizando um único sensor piezelétrico para a identificação de casos de

hipertensão. Finalmente, também são mencionados estudos sobre a pesquisa de fabricação de materiais piezelétricos para instrumentos de monitoramento de movimentos corporais de alta precisão para assistência na recuperação física de pacientes, e estudos sobre sistemas de monitoramento de marcha a fim de identificar sinais da doença de Parkinson.

4.1.2 Interfaces Homem-Máquina

O interesse na área de tecnologias voltadas as interfaces homem-máquina vieram com o crescimento de áreas como a robótica, entretenimento e próteses inteligentes. A aplicação de transdutores piezelétricos nessa área se encontra na percepção de fenômenos externos e no envio dessas informações ao sistema em que se encontra. Além disso eles podem ser fabricados de maneira a ser miniaturizados e integrados em estruturas ultrafinas. Além de descrever suas vantagens, Chen (2024) também menciona áreas em que os transdutores piezelétricos localizados em interfaces homem-máquina se destacam: na área de próteses inteligentes, atuando como sensores de estímulos externos ligados ao tato; na identificação no perfil de força aplicado por regiões amputadas, a fim de auxiliar na previsão do movimento realizado pela prótese inteligente; na área de manipulação robótica, sendo os transdutores utilizados para capturar movimentos humanos e enviando os dados desses movimentos para serem replicados por um membro robótico.

4.2 NOVOS MATERIAIS

4.2.1 Materiais Piezelétricos livres de Chumbo

Como mencionado anteriormente, o PZT é um dos materiais piezelétricos mais atrativos por conta de suas elevadas constantes piezelétricas, porém, com a presença de chumbo em sua composição, preocupações em relação ao seu impacto na saúde e no ambiente passaram a ser levantadas. Por isso, estudos sobre a pesquisa de materiais livres de chumbo ganharam bastante relevância, utilizando métodos para modificação de sistemas cerâmicos existentes, doping e manipulação de estruturas cristalinas (MORIANA; ZHANG, 2018).

4.2.2 Materiais Piezelétricos Flexíveis

Como dito em Xue (2025), a emergência de materiais piezelétricos flexíveis foi responsável pelo desenvolvimento na área de sensores wearables, revolucionando a área de sensoriamento, e na área transdutores de ultrassom flexíveis. Os materiais com maior destaque para aplicações em transdutores, de acordo com Xue (2025) são os polímeros piezelétricos flexíveis, cerâmicas revestidas por polímeros e os compósitos de matriz polimérica:

- Polímeros Piezelétricos Flexíveis

São materiais com baixa impedância acústica, flexibilidade permanente e uma ampla largura de banda cujas funcionalidades são atrativas na área de desenvolvimento de transdutores flexíveis, utilizando materiais como PVDF e PVDF-TrFE, e na área de implantes médicos: por meio de nanofibras piezelétricas biodegradáveis a base de Poli (ácido L-láctico) (PLLA); por meio de nanofibras a base de aminoácidos cristalinos embutidos em nanofibras a base de Poli (ϵ -caprolactona) (PCL).

- Cerâmicas piezelétricas revestidas por polímeros

Esses materiais se apresentaram como uma solução ao problema de excesso de rigidez de materiais piezelétricos a granel (como cristais e cerâmicas). Para isso, esses materiais são cobertos por filmes finos constituídos de AlN (Nitreto de Alumínio, ZnO ou PZT. Atualmente, direcionam-se pesquisas a fim de reduzir problemas como o de baixa durabilidade, de baixo coeficiente de acoplamento eletromecânico e de incompatibilidade de impedância acústica.

- Compósitos de Matriz Polimérica Piezelétrica

Utilizando polímeros flexíveis em conjunto com materiais piezelétricos não flexíveis, é possível criar compósitos cujos atributos podem ser ajustados. Estudos feitos com materiais a base de PZT tipos 5A e 5H (PZT-5A e PZT-5H) e Niobato de Magnésio e Chumbo–Titanato de Chumbo (PMN-PT), demonstram que, quando combinados com polímeros flexíveis, podem servir como base de desenvolvimento para transdutores de ultrassom, apresentando menor flexibilidade do que materiais puramente poliméricos, porém com uma grande largura de banda, sensibilidade e flexibilidade relativamente elevada.

4.2.3 *Microelectromechanical Systems (MEMS)*

Os avanços feitos em miniaturização eletrônica levaram ao surgimento de uma nova categoria de dispositivos, os Microelectromechanical Systems (MEMS). De acordo com Chircov e Grumezescu (2022), seu mecanismo de funcionamento é baseado na transdução de energia e envolve a transferência de informações da unidade sensorial até o controlador. Esses dispositivos são compostos por uma série de componentes sensoriais: microbombas, micro válvulas, microagulhas e micro mixadores. Dentre esses, as microbombas podem ser feitas de materiais piezelétricos (geralmente PZT), cujo funcionamento depende da deformação do canal de bombeamento. Além disso, as micro válvulas possuem mecanismos que funcionam a partir de efeito piezelétrico.

4.3 TECNOLOGIAS DE TRANSDUTORES PARA IMAGEM

4.3.1 Transdutores CMUT e PMUT

A presença de transdutores piezelétricos em MEMS na medicina se demonstra de maneira acentuada nos dispositivos denominados Micromachined Ultrasonic Transducers (MUTs). Dentre os principais, tem-se os MUTs capacitivos (CMUTs), que utilizam dois eletrodos com uma cavidade entre ambos, sendo capazes de armazenar campo elétrico quando uma diferença de potência é aplicada entre eles; e piezelétricos (PMUTs), que utilizam do efeito piezelétrico para operarem como atuadores ou sensores. Estudos sobre suas aplicações se encontram vastamente na área de geração de imagem ultrassonográfica, demonstrando vantagens ao levar em conta a facilidade na criação de arranjos de elementos sensoriais comparados aos transdutores a base de PZT; e na área de imagens fotoacústicas (MOISELLO *et al.*, 2024).

4.3.2 Teranóstico em 3D e 4D

Uma prática emergente na área da ultrassonografia consiste na utilização de um mesmo transdutor de ultrassom para gerar imagens para diagnósticos e para aplicações terapêuticas. Em Bendjador (2022), estuda-se a possibilidade de usar agentes de contraste em forma de microbolhas para realizar terapia ao mesmo tempo em que gera uma imagem volumétrica de uma grande área, chegando a um design de um transdutor de ultrassom capaz de realizar ambos.

4.4 ENERGIA AUTOALIMENTADA

O advento de sensores multifuncionais flexíveis tem como parte vital um componente de autogeração de energia. Esse pode tomar a forma de um dispositivo chamado piezoelectric nanogenerator (PENG). Constituídos por uma camada piezelétrica isolada entre duas camadas de condutores o efeito piezelétrico ocorre após uma pressão mecânica é exercida, formando dipolos entre as cargas gerando corrente.

Com isso, é uma tendência utilizar esses transdutores tanto como coletores de energia, coletando energia mecânica e convertendo em energia elétrica a fim de alimentar um sensor multifuncional, assim como pode-se utilizá-los como um sensor com objetivo de monitorar algum estímulo corporal, além de suas aplicações em interfaces homem-máquina, pele eletrônica, realidade virtual e acessórios eletrônicos (YANG *et al.*, 2021).

4.5 APLICAÇÕES EMERGENTES

4.5.1 Terapia Sonodinâmica e Imunoterapia

Em conjunto com a terapia Sonodinâmica, a imunoterapia vem sendo usada no combate ao câncer. A imunoterapia consiste em gerar uma resposta autoimune ao tecido cancerígeno, tendo como principal método a utilização de inibidores de checkpoints imunológicos, que são substâncias responsáveis pela inibição de proteínas produzidas por células cancerígenas com a finalidade de camuflagem contra células do sistema imune. A combinação das duas é uma atual área de estudo que se torna promissora ao se observar, com base em Bai *et al* (2025), que a terapia Sonodinâmica serve de auxílio para os inibidores de checkpoints imunológicos, facilitando sua atuação em células cancerígenas que não produzam quantidades significativas de proteínas, aumentando a eficiência do tratamento.

4.5.2 Scaffolds em tecidos neurais

Como mencionado anteriormente, Scaffolds são materiais piezelétricos inseridos em tecidos, responsáveis por estimular regeneração celular quando estimulados por ultrassom. Enquanto o uso deste recurso se encontra bem consolidado na área de regeneração de tecido ósseo, como visto em Mirghaffari *et al* (2025), atualmente estudos são realizados para aplicar essa tecnologia em tecidos neurais.

Baseado em Bryan (2023), Scaffolds feitos com base de PVDF-TrFE, quando estimulados por ondas classificadas como Low Intensity Pulsed Ultrasound (LIPUS), são responsáveis por melhorar a atividade metabólica em células, demonstrando um comportamento promissor quando se trata de reparos em tecidos nervosos.

5 DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Tendo em vista todas as áreas em que a piezeletricidade pode ser usada por meio de atuadores ou sensores na medicina além das emergentes aplicações que vem sendo estudadas, existem certas limitações encontradas por essa tecnologia que devem ser analisadas para que progresso seja feito em sua implementação ou em seu aprimoramento. Tendo em vista as aplicações atuais da tecnologia e suas aplicações emergentes nos capítulos anteriores, é possível identificar algumas áreas onde se encontram possibilidades de pesquisa: materiais e performance, qualidade de imagem e aplicações clínicas, fabricação e escalabilidade e engenharia e design de transdutores.

5.1 MATERIAIS E PERFORMANCE

Como discutido anteriormente, a busca por materiais que possuam qualidades piezelétricas mais elevadas ao mesmo tempo que sejam biocompatíveis com os tecidos corporais e que possuam estabilidade a longo termo é de suma importância para a aplicação de transdutores na área medicinal.

Em Dong *et al* (2024), é explicitada a necessidade de desenvolver materiais piezelétricos biocompatíveis livres de chumbo, tendo em vista sua alta toxicidade e volatilidade a temperaturas altas, demonstrando-se um perigo ao meio ambiente e ao usuário do equipamento. Atualmente são estudadas cerâmicas e polímeros capazes de se aproximar das elevadas características piezelétricas de materiais a base de chumbo, como PZT, porém sem sua toxicidade, tendo como desafio a melhoria de características mecânicas, piezelétricas, estabilidade a elevadas temperaturas e resistência a fadiga.

Expandindo sobre essa ideia, Xue *et al* (2024) explica a importância da seleção de materiais biocompatíveis, bio-funcionais e que induzam mínima atividade autoimune para seu uso em transdutores de ultrassom. Pesquisas devem ser realizadas a fim de melhorar características como flexibilidade, biodegradação, vida útil quando usado em aplicações de uso prolongado e são apontadas áreas com potencial para materiais inteligentes, capazes de reagir a estímulos fisiológicos.

5.2 QUALIDADE DE IMAGEM E APLICAÇÕES CLÍNICAS

Uma grande parte das aplicações e dos estudos emergentes voltados para o uso de transdutores piezelétricos na medicina se encontra voltada na geração de imagem e para aplicações terapêuticas. A busca pela produção de uma imagem de maior qualidade e a busca por mais aplicações de transdutores piezelétricos para tratamento de pacientes se demonstra ser uma tendência emergente.

Em questão de geração de imagem, transdutores piezelétricos possuem limitações nos seguintes aspectos: largura de banda, sendo a principal responsável por impossibilitar que o transdutor seja capaz de gerar imagens de alta qualidade em uma certa faixa de frequências; sensibilidade a estímulos exteriores, responsáveis pela alteração da performance do transdutor; consumo de energia; miniaturização, para aplicações que necessitem de imagens de alta qualidade de espaços confinados; acoplamento do transdutor com o meio a ser analisado; razão sinal ruído (SNR), para aplicações onde a imagem a ser analisada se encontra a uma distância maior do transdutor; durabilidade e longevidade em ambientes hostis (EUREKA, 2025). Esses são pontos de foco na pesquisa para otimização de geração de imagem emergentes.

Finalmente, para aplicações clínicas na área de remoção de tumores, Bai *et al* (2024) aponta desafios significativos na aplicação clínica de transdutores de ultrassom focados, sendo ligados principalmente aos materiais utilizados pelos elementos piezelétricos dos transdutores; técnicas de fabricação e integração com tecnologias emergentes. Para fins de sonoterapia, Bai *et al* (2025) aponta limitações em relação a atuação dos transdutores dentro do corpo humano, biocompatibilidade dos materiais e a capacidade de limitar sua área de atuação somente à área desejada.

5.3 FABRICAÇÃO E ESCALABILIDADE

Com o advento da miniaturização e integração de transdutores piezelétricos em aparelhos cada vez menores e que desempenham uma vasta gama de funções, são necessários avanços na forma de confecção dessas novas tecnologias, a fim de diminuir custos e possibilitar produção em larga escala.

Quando mencionados os PMUTs, dificuldades são encontradas em relação ao custo de fabricação, sendo necessários métodos e maquinário bastante sofisticados para sua fabricação; além da dificuldade inerente do processo de fabricação que dificulta a produção de matrizes de transdutores de alta frequência. Em questão desses transdutores em específico, os estudos mais atuais são voltados a metodologias de fabricação simples, custo efetivas e confiáveis de matrizes com alta densidade de elementos piezelétricos com tolerâncias baixas (HE *et al.*, 2022).

5.4 ENGENHARIA E DESIGN DE TRANSDUTORES

Finalmente, tem-se a questão do design e engenharia de transdutores já existentes. A otimização da estrutura dos aparelhos tem como objetivos garantir a eficiência acústica e adequação de sua aplicação.

De acordo com Lee e Roh (2017), dentre os desafios encontrados por transdutores ultrassônicos convencionais, estão envolvidas: limitações estruturais dos transdutores unidimensionais, sendo incapazes de realizar diferentes métodos de escaneamento sem a substituição do transdutor; e, para transdutores 3D, são necessárias otimizações nos métodos de escaneamento, na sua confiabilidade quando utilizada a longo termo e melhor performance do transdutor.

6 CONCLUSÃO

No decorrer desta revisão, foram apresentadas as principais áreas em que são utilizados transdutores piezelétricos para fins medicinais, assim como áreas de pesquisa para implementações, melhorias e identificação de pontos de interesse de melhora na tecnologia. Observou-se uma ampla utilidade desses aparelhos na área da ultrassonografia, seja em geração de imagens de ultrassom, como na terapia médica com finalidades na Sonodinâmica e remoção de tumores, assim como na engenharia de tecidos humanos e transporte de fármacos.

Além disso, foram pontuadas diversas aplicações desses transdutores para monitoramento e sensoriamento.

A análise feita indica que a tendência emergente no uso de transdutores piezelétricos é a melhoria na sua versatilidade, ou seja, utilizar da engenharia de materiais, engenharia de design e métodos de utilização que possibilitem a ampliação das possibilidades de diagnóstico que esses possam trazer além da transmissão de informações em tempo real. Com isso, limitações como biocompatibilidade, vida útil de utilização, métodos de fabricação e integração com sistemas de processamentos de dados são pontos de melhora que devem ser analisados.

Perspectivas futuras indicam que, com a melhoria da eficiência dos materiais, sua capacidade de miniaturização assim como biodegradabilidade, os transdutores piezelétricos serão elementos centrais para dispositivos de fornecimento contínuo de dados sobre a saúde do paciente, sem comprometer sua saúde ou o meio ambiente, com a capacidade de autoalimentação e com elevada precisão.

Em suma, transdutores piezelétricos são elementos de engenharia promissores na área da medicina, tornando possível a integração, precisão acessibilidade entre as áreas de diagnóstico, imagem e tratamento.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. P. N. *et al.* 3D -printed β -TCP / S53P4 bioactive glass scaffolds coated with tea tree oil: Coating optimization, in vitro bioactivity and antibacterial properties. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, v. 111, n. 4, p. 881–894, abr. 2023.

BAI, X. *et al.* Design and micromanufacturing technologies of focused piezoelectric ultrasound transducers for biomedical applications. **International Journal of Extreme Manufacturing**, v. 6, n. 6, p. 062001, 1 dez. 2024.

BAI, Y. *et al.* Ultrasound-triggered piezoelectric biomaterials for enhanced cancer sonodynamic immunotherapy. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 119, p. 107402, ago. 2025.

BENDJADOR, H. *et al.* A theranostic 3D ultrasound imaging system for high resolution image-guided therapy. **Theranostics**, v. 12, n. 11, p. 4949–4964, 2022.

BRYAN, A. E. *et al.* Ultrasound-Activated Piezoelectric Polyvinylidene Fluoride–Trifluoroethylene Scaffolds for Tissue Engineering Applications. **Military Medicine**, v. 188, n. Supplement_6, p. 61–66, 8 nov. 2023.

CHEN-GLASSER, M. *et al.* Piezoelectric Materials for Medical Applications. Em: VASSILIADIS, S. G.; MATSOUKA, D. (Eds.). *Piezoelectricity - Organic and Inorganic Materials and Applications*. [s.l.] InTech, 2018.

CHEN, Y.; ZHANG, X.; LU, C. Flexible piezoelectric materials and strain sensors for wearable electronics and artificial intelligence applications. **Chemical Science**, v. 15, n. 40, p. 16436–16466, 2024.

CHIRCOV, C.; GRUMEZESCU, A. M. Microelectromechanical Systems (MEMS) for Biomedical Applications. **Micromachines**, v. 13, n. 2, p. 164, 22 jan. 2022.

CHOUDHRY, I.; KHALID, H. R.; LEE, H.-K. Flexible Piezoelectric Transducers for Energy Harvesting and Sensing from Human Kinematics. **ACS Applied Electronic Materials**, v. 2, n. 10, p. 3346–3357, 27 out. 2020.

CURRY, E. J. *et al.* Biodegradable nanofiber-based piezoelectric transducer. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 1, p. 214–220, 7 jan. 2020.

DONG, H. *et al.* Piezoelectric Composites: State-of-the-Art and Future Prospects. **JOM**, v. 76, n. 1, p. 340–352, jan. 2024.

EL HAMSHARY, S. *et al.* The impact of changing the focus size of piezoelectric lithotripsy on renal stone disintegration: A prospective randomized study. **Benha Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 6, p. 27–36, 28 jun. 2023.

EUREKA. *Research on piezoelectric transducers in subsurface imaging.* Eureka (site), 17 jul. 2025. Disponível em: <https://eureka.patsnap.com/report-research-on-piezoelectric-transducers-in-subsurface-imaging>. Acesso em: 28 out. 2025.

HE, Y. *et al.* Piezoelectric Micromachined Ultrasound Transducer Technology: Recent Advances and Applications. **Biosensors**, v. 13, n. 1, p. 55, 29 dez. 2022.

HEYWANG, W. Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2008.

HONG, C.-H. *et al.* Lead-free piezoceramics – Where to move on? **Journal of Materiomics**, v. 2, n. 1, p. 1–24, mar. 2016.

HOSKINS, P. (ED.). **Diagnostic ultrasound: physics and equipment.** 2. ed., 1. publ ed. Cambridge: Univ. Press, 2010.

HOU, J. F. *et al.* An implantable piezoelectric ultrasound stimulator (ImPULS) for deep brain activation. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 4601, 4 jun. 2024

IZADIFAR, Z. *et al.* An Introduction to High Intensity Focused Ultrasound: Systematic Review on Principles, Devices, and Clinical Applications. **Journal of Clinical Medicine**, v. 9, n. 2, p. 460, 7 fev. 2020.

KAPAT, K. *et al.* Piezoelectric Nano-Biomaterials for Biomedicine and Tissue Regeneration. **Advanced Functional Materials**, v. 30, n. 44, p. 1909045, out. 2020.

LEE, W.; ROH, Y. Ultrasonic transducers for medical diagnostic imaging. **Biomedical Engineering Letters**, v. 7, n. 2, p. 91–97, maio 2017.

LI, M. *et al.* Wearable PZT Piezoelectric Sensor Device for Accurate Arterial Pressure Pulse Waveform Measurement. **Advanced Electronic Materials**, v. 11, n. 9, p. 2400852, jun. 2025.

MENG, Y.; CHEN, G.; HUANG, M. Piezoelectric Materials: Properties, Advancements, and Design Strategies for High-Temperature Applications. **Nanomaterials**, v. 12, n. 7, p. 1171, 1 abr. 2022.

MIRGHAFFARI, M. *et al.* Electro-spun piezoelectric PLLA smart composites as a scaffold on bone fracture: A review. **Regenerative Therapy**, v. 28, p. 591–605, mar. 2025.

MOISELLO, E. *et al.* PMUT and CMUT Devices for Biomedical Applications: A Review. **IEEE Access**, v. 12, p. 18640–18657, 2024.

MORAN, C. M.; THOMSON, A. J. W. Preclinical Ultrasound Imaging—A Review of Techniques and Imaging Applications. **Frontiers in Physics**, v. 8, p. 124, 5 maio 2020.

MORIANA, A. D.; ZHANG, S. Lead-free textured piezoceramics using tape casting: A review. **Journal of Materiomics**, v. 4, n. 4, p. 277–303, dez. 2018.

NADRLJANSKI, M.; CULPO, G.; MURPHY, A. History of ultrasound in medicine. Em: **Radiopaedia.org**. [s.l.] Radiopaedia.org, 2010.

POGGI, C.; PALAVECINO, M. Ultrasound principles and instrumentation. **Surgery Open Science**, v. 18, p. 123–128, mar. 2024.

SAFARKHANI, M. *et al.* Nanomaterial-assisted wearable glucose biosensors for noninvasive real-time monitoring: Pioneering point-of-care and beyond. **Nano Materials Science**, v. 6, n. 3, p. 263–283, jun. 2024.

SHIGUE, Carlos; ABEL, Ana Maria da Silva; LUIZ, Sandro Galisteu. *Sensores e atuadores piezoelétricos*. Lorena, 2010. Trabalho acadêmico – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena

SILVA, Matheus Henrique Ferreira. Utilização de transdutores piezoelétricos na indústria. 2020. 32p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Norte do Paraná, Londrina-PR, 2020.

SORENSEN, M. D. *et al.* Quantitative Assessment of Shockwave Lithotripsy Accuracy and the Effect of Respiratory Motion. **Journal of Endourology**, v. 26, n. 8, p. 1070–1074, ago. 2012.

TICHÝ, J. *et al.* **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

VITAZKOVA, D. *et al.* Advances in Respiratory Monitoring: A Comprehensive Review of Wearable and Remote Technologies. **Biosensors**, v. 14, n. 2, p. 90, 6 fev. 2024.

WANG, Y. *et al.* Self-Powered Wearable Piezoelectric Monitoring of Human Motion and Physiological Signals for the Postpandemic Era: A Review. **Advanced Materials Technologies**, v. 7, n. 12, p. 2200318, dez. 2022.

WANG, Zhong Lin; KANG, Zhen Chuan. *Functional and smart materials: structural evolution and structure analysis*. New York: Plenum Press, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5367-0>. ISBN 978-1-4613-7449-7.

XUE, X. *et al.* Flexible Ultrasonic Transducers for Wearable Biomedical Applications: A Review on Advanced Materials, Structural Designs, and Future Prospects. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 71, n. 7, p. 786–810, jul. 2024.

YANG, Z. *et al.* Recent Advances in Self-Powered Piezoelectric and Triboelectric Sensors: From Material and Structure Design to Frontier Applications of Artificial Intelligence. **Sensors**, v. 21, n. 24, p. 8422, 17 dez. 2021.

ZHU, J. Research progress on piezoelectric acoustic transducers: Principles, materials, performance, and applications. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2786, n. 1, p. 012016, 1 jun. 2024.