ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
EVENTO ON-LINE
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Geração de Energia Triboelétrica: Princípios, Aplicações e Perspectivas Tecnológicas

Rogério Rodrigues Lima de Araujo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UTFPR
Ângelo Marcelo Tusset
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UTFPR

Resumo: A geração de energia triboelétrica tem se destacado como alternativa para o aproveitamento de movimentos mecânicos de baixa frequência em sistemas eletrônicos de pequena potência. Este estudo teve como objetivo analisar os princípios de funcionamento, as principais aplicações e as perspectivas tecnológicas dos nanogeradores triboelétricos. Trata-se de uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa, descritiva e analítica, baseada em artigos científicos publicados entre 2017 e 2026 em bases e plataformas acadêmicas internacionais. Foram considerados estudos sobre mecanismos de triboeletrificação, materiais, estruturas, sensores autossustentáveis, dispositivos vestíveis e aproveitamento de energia ambiental. Os resultados indicaram que o desempenho dos TENGs depende da combinação entre propriedades dos materiais, área de contato, configuração estrutural, condições ambientais e estratégias de gerenciamento elétrico. Também foram identificados avanços no uso de grafeno, materiais biodegradáveis, estruturas flexíveis e aplicações em monitoramento humano e energia das ondas. Apesar do potencial, persistem limitações relacionadas à durabilidade, estabilidade, umidade, padronização e escalabilidade. Conclui-se que os nanogeradores triboelétricos apresentam maior viabilidade como tecnologia complementar para sensores e dispositivos autônomos de baixa potência, com perspectivas favoráveis de expansão à medida que sejam superados os desafios de eficiência, confiabilidade e integração tecnológica.

Palavras-chave: Nanogeradores triboelétricos. Colheita de energia. Triboeletricidade. Sensores autossustentáveis.

Triboelectric Energy Generation: Principles, Applications, and Technological Perspectives

Abstract: Triboelectric energy generation has emerged as a promising alternative for harvesting low-frequency mechanical motion in low-power electronic systems. This study aimed to analyze the operating principles, main applications, and technological perspectives of triboelectric nanogenerators. It consists of a qualitative, descriptive, and analytical bibliographic review based on scientific articles published between 2017 and 2026 in international academic databases and platforms. The selected studies addressed triboelectrification mechanisms, materials, device structures, self-powered sensors, wearable electronics, and environmental energy harvesting. The results indicated that TENG performance depends on the combination of material properties, contact area, structural configuration, environmental conditions, and electrical management strategies. Advances were also identified in the use of graphene, biodegradable materials, flexible structures, human-motion monitoring, and ocean-wave energy harvesting. Despite their potential, limitations remain regarding durability, stability, humidity sensitivity, standardization, and scalability. It is

concluded that triboelectric nanogenerators are more viable as complementary technologies for low-power sensors and autonomous devices, with favorable prospects for expansion as challenges related to efficiency, reliability, and technological integration are progressively overcome.

Keywords: Triboelectric nanogenerators. Energy harvesting. Triboelectricity. Self-powered sensors.

1. Introdução

A busca por formas alternativas de geração de energia tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de aproveitar fontes mecânicas disponíveis no ambiente, especialmente aquelas de baixa intensidade e frequência. Nesse contexto, os nanogeradores triboelétricos (TENG), destacam-se por converter movimentos, vibrações, contato e separação entre superfícies em energia elétrica por meio da combinação entre eletrificação por contato e indução eletrostática (Wang; Yang; Wang, 2017; Zhou et al., 2020).

O avanço recente da geração triboelétrica também está associado à evolução dos materiais empregados na fabricação dos dispositivos e à ampliação de suas possibilidades de aplicação. Polímeros, materiais biodegradáveis, tecidos, grafeno e estruturas híbridas têm sido estudados com o objetivo de elevar a densidade de carga, melhorar a durabilidade e adaptar os nanogeradores a diferentes condições de uso. Essas características permitem considerar aplicações em dispositivos vestíveis, monitoramento de movimentos humanos, sensores inteligentes, sistemas autossustentáveis e aproveitamento da energia produzida por ondas, vibrações e outras fontes mecânicas dispersas (Kim et al., 2020; Choi et al., 2023).

Apesar desses avanços, a consolidação dos nanogeradores triboelétricos como tecnologia de geração energética ainda enfrenta limitações relacionadas à estabilidade da produção elétrica, ao desgaste das superfícies, à influência da umidade e da temperatura, à durabilidade dos materiais e à dificuldade de manter desempenho elevado sob condições ambientais variáveis. Diante desse cenário, estabelece-se a seguinte questão de pesquisa: quais princípios físicos, aplicações atuais e desafios tecnológicos condicionam o desenvolvimento e a expansão da geração de energia triboelétrica?

O objetivo geral deste estudo é analisar os princípios de funcionamento, as principais aplicações e as perspectivas tecnológicas relacionadas à geração de energia triboelétrica, com ênfase nos nanogeradores triboelétricos. Como objetivos específicos, pretende-se: a) descrever os mecanismos físicos envolvidos na conversão da energia mecânica em energia elétrica e os principais modos de funcionamento dos TENGs; b) examinar materiais, configurações e aplicações empregadas atualmente em sistemas de colheita de energia e sensores autossustentáveis; e c) discutir desafios de eficiência, durabilidade, sustentabilidade e escalabilidade que influenciam a evolução dessa tecnologia.

A realização deste estudo justifica-se pela necessidade de ampliar a compreensão sobre tecnologias capazes de recuperar pequenas parcelas de energia mecânica que normalmente seriam dissipadas no ambiente. O interesse por sistemas autônomos, dispositivos vestíveis, internet das coisas e sensores de baixo consumo aumenta a importância de fontes energéticas compactas e adaptáveis, enquanto pesquisas com materiais biodegradáveis e de origem biológica também indicam caminhos para reduzir impactos associados ao descarte de componentes eletrônicosCandido et al., 2023; Khandelwal et al., 2019).

2. Fundamentação Teórica

A geração de energia triboelétrica baseia-se na conversão de energia mecânica em energia elétrica a partir do contato, separação ou deslizamento entre materiais com

diferentes tendências de adquirir ou ceder cargas elétricas. Esse processo está associado à eletrificação por contato e à indução eletrostática, fenômenos que permitem o surgimento de diferença de potencial quando duas superfícies interagem mecanicamente. Nos nanogeradores triboelétricos, essa dinâmica é organizada em estruturas capazes de conduzir as cargas produzidas para um circuito externo, transformando movimentos de baixa frequência em sinais elétricos aproveitáveis (Zhou et al., 2020; Kim et al., 2021).

A eficiência desse processo depende diretamente das condições de contato entre as superfícies e das propriedades dos materiais envolvidos. Rugosidade, área efetiva de contato, pressão, velocidade de movimento e características dielétricas influenciam a quantidade de carga gerada durante a operação do dispositivo. Os fundamentos de mecânica do contato ajudam a compreender por que pequenas alterações na interface podem produzir diferenças importantes no desempenho elétrico. Por essa razão, o estudo das superfícies e de sua interação física constitui uma base importante para o desenvolvimento de TENGs mais eficientes e estáveis (Duarte, 2016; Duarte Júnior; Teixeira, 2023).

Os nanogeradores triboelétricos podem operar em diferentes configurações estruturais, desenvolvidas para aproveitar movimentos específicos. Entre os modos mais estudados estão contato-separação vertical, deslizamento lateral, eletrodo único e camada triboelétrica independente. Cada configuração apresenta vantagens e limitações relacionadas à geometria do dispositivo, frequência do movimento, desgaste dos materiais e forma de coleta da carga. Essa diversidade permite adaptar os TENGs a diferentes fontes mecânicas, desde movimentos corporais e vibrações até oscilações de estruturas e ondas do mar (Wang; Yang; Wang, 2017; Wu et al., 2019).

A geração triboelétrica também vem sendo investigada para o aproveitamento de fontes mecânicas ambientais de maior escala, sobretudo movimentos irregulares e de baixa frequência. As ondas oceânicas representam um exemplo importante porque apresentam grande disponibilidade energética, mas características variáveis que dificultam sua conversão eficiente. Estudos recentes mostram que ajustes estruturais e adaptação ao estado do mar podem elevar a produção elétrica dos TENGs. Essa possibilidade demonstra que a tecnologia não se limita a pequenos sensores, podendo integrar sistemas híbridos de recuperação energética em ambientes externos e condições operacionais complexas (Gonçalves; Rodrigues; Ventura, 2024; Callaty; Rodrigues; Ventura, 2025).

3. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa, com caráter descritivo e analítico, direcionada à compreensão dos fundamentos, aplicações e perspectivas tecnológicas da geração de energia triboelétrica. A escolha desse método permitiu reunir diferentes contribuições científicas sobre nanogeradores triboelétricos, materiais empregados em sua fabricação, mecanismos de conversão energética e possibilidades de aplicação em sistemas autossustentáveis, sensores e dispositivos de baixa potência.

O levantamento bibliográfico considerou publicações científicas compreendidas entre 2017 e 2026, priorizando artigos indexados e diretamente relacionados ao tema. As buscas foram direcionadas a bases e plataformas acadêmicas como ScienceDirect, SpringerLink, Nature, ACS Publications, Wiley Online Library, Frontiers e MDPI, utilizando combinações de descritores em inglês, entre eles *triboelectric nanogenerator*, *triboelectric energy harvesting*, *triboelectric materials*, *self-powered sensors*, *wearable electronics* e *mechanical energy harvesting*. Também foram consideradas duas obras em português para apoio conceitual na fundamentação teórica.

Como critérios de inclusão, foram selecionados estudos que abordassem diretamente princípios físicos da triboeletricidade, desenvolvimento de TENGs,

desempenho de materiais, arquiteturas de dispositivos, geração de energia mecânica convertida em eletricidade, aplicações em sensores autônomos e perspectivas de uso tecnológico. Foram excluídos trabalhos duplicados, estudos sem acesso suficiente às informações metodológicas, publicações fora do período delimitado e pesquisas que mencionassem triboeletricidade apenas de forma secundária.

Tabela 1: Artigos incluídos na revisão

Autor e ano	Título	Objetivos	Metodologia	Resultados	Conclusão
Callaty, Rodrigues e Ventura (2025)	*Triboelectric nanogenerators in harsh conditions: a critical review*	Analisar criticamente o desempenho de nanogeradores triboelétricos submetidos a condições ambientais severas e identificar estratégias para aumentar sua resistência e estabilidade.	Revisão crítica da literatura sobre TENGs operando sob condições adversas, considerando temperatura, umidade, pressão e ambientes agressivos.	A literatura demonstra que fatores ambientais podem reduzir a estabilidade das cargas e o desempenho dos dispositivos, enquanto encapsulamento, escolha adequada de materiais e modificações estruturais aumentam sua resistência.	O avanço dos TENGs para aplicações externas depende do desenvolvimento de materiais e arquiteturas capazes de manter desempenho confiável em diferentes condições ambientais.
Candido et al. (2023)	*PVA-silk fibroin bio-based triboelectric nanogenerator*	Desenvolver um nanogerador triboelétrico baseado em materiais de origem biológica, explorando PVA e fibroína da seda para geração de energia.	Estudo experimental envolvendo preparação e caracterização de filmes de PVA e fibroína da seda, montagem do TENG e avaliação de suas propriedades elétricas e mecânicas.	O dispositivo demonstrou capacidade de converter estímulos mecânicos em sinais elétricos, evidenciando a viabilidade de materiais biológicos na fabricação de TENGs.	Materiais derivados da seda associados a polímeros apresentam potencial para dispositivos triboelétricos mais sustentáveis e compatíveis com aplicações flexíveis.
Choi et al. (2023)	*Recent advances in triboelectric nanogenerators: from technological progress to commercial applications*	Examinar os avanços recentes dos TENGs, desde materiais e estruturas até aplicações e possibilidades de comercialização.	Revisão abrangente da literatura científica sobre materiais triboelétricos, estruturas, melhoria do desempenho, aplicações e desenvolvimento comercial.	Foram identificados progressos expressivos em materiais, engenharia de superfícies, sensores autossustentáveis, eletrônicos flexíveis e sistemas de colheita de energia.	A tecnologia apresenta elevado potencial de aplicação, mas sua comercialização em larga escala exige maior confiabilidade, estabilidade e padronização de desempenho.
Domingos et al. (2021)	*Graphene based triboelectric nanogenerators using*	Desenvolver TENGs utilizando grafeno esfoliado	Pesquisa experimental com esfoliação do grafite em água, produção de	O dispositivo baseado em grafeno alcançou aproximadamente 233 V de tensão	O grafeno processado em solução pode substituir materiais

	water based solution process	como eletrodo e camada triboelétrica, empregando processo simples e de baixo custo baseado em solução aquosa.	filmes de grafeno, fabricação de TENGs SEG/PDMS e comparação com dispositivos Al/PDMS mediante ensaios elétricos.	em circuito aberto, 731 nA de corrente e densidade máxima de potência de 13,14 μW/cm².	metálicos em TENGs e favorecer dispositivos de baixo custo voltados a aplicações portáteis e vestíveis.
Gołąbek e Strankowski (2024)	*A review of recent advances in human-motion energy harvesting nanogenerators, self-powering smart sensors and self-charging electronics*	Sistematizar os avanços na conversão da energia proveniente dos movimentos humanos por nanogeradores e suas aplicações em sensores e eletrônicos autossustentáveis.	Revisão da literatura recente sobre nanogeradores triboelétricos, piezoelétricos e outras tecnologias aplicadas à recuperação de energia biomecânica.	Os estudos demonstram possibilidades de aproveitamento de caminhada, flexão, pressão e outros movimentos corporais para alimentar sensores e pequenos dispositivos eletrônicos.	Nanogeradores flexíveis apresentam elevado potencial para sistemas vestíveis e autônomos, embora melhorias de potência, conforto, durabilidade e integração ainda sejam necessárias.
Gonçalves, Rodrigues e Ventura (2024)	*Sea state adaptation enhances power output of triboelectric nanogenerators for tailored ocean wave energy harvesting*	Investigar como a adaptação dos TENGs às características do estado do mar pode aumentar a recuperação de energia das ondas oceânicas.	Estudo experimental com avaliação do comportamento e da resposta elétrica de TENGs submetidos a condições representativas de diferentes estados de ondas.	A adaptação do sistema às características das ondas favoreceu maior produção energética e demonstrou a importância de ajustar a configuração do dispositivo.	O desempenho dos TENGs oceânicos pode ser elevado por projetos adaptativos, aumentando seu potencial para o aproveitamento de energia mecânica de baixa frequência.
Khandelwal et al. (2019)	*All edible materials derived biocompatible and biodegradable triboelectric nanogenerator*	Desenvolver um TENG composto por materiais comestíveis, biocompatíveis e biodegradáveis, reduzindo problemas relacionados a resíduos eletrônicos.	Pesquisa experimental baseada na seleção de materiais naturais/comestíveis, fabricação do dispositivo triboelétrico e caracterização de sua resposta elétrica.	O sistema conseguiu produzir eletricidade por triboeletrificação utilizando materiais ambientalmente compatíveis, demonstrando viabilidade para dispositivos temporários e biodegradáveis.	Materiais naturais podem constituir uma alternativa sustentável para TENGs, especialmente em aplicações nas quais biodegradabilidade e biocompatibilidade são requisitos relevantes.
Kim et al. (2020)	*Material aspects of triboelectric energy generation and sensors*	Analisar o papel das propriedades dos materiais no desempenho da geração triboelétrica e	Artigo de revisão sobre mecanismos de eletrificação por contato, seleção de materiais, modificação de superfícies e	Os autores identificaram que composição química, afinidade eletrônica, área superficial, rugosidade e propriedades	A engenharia de materiais e superfícies constitui uma das principais estratégias para aumentar a eficiência e

		de sensores baseados nesse fenômeno.	propriedades que influenciam o desempenho dos dispositivos.	dielétricas influenciam a geração e transferência de cargas.	ampliar as aplicações dos sistemas triboelétricos.
Kim et al. (2021)	*Triboelectric nanogenerator: structure, mechanism, and applications*	Sistematizar os princípios de funcionamento, estruturas e principais aplicações dos nanogeradores triboelétricos.	Revisão científica dos mecanismos físicos, modos operacionais, materiais, configurações estruturais e aplicações tecnológicas dos TENGs.	A análise demonstrou grande diversidade estrutural e capacidade de aproveitamento de movimentos humanos, vibrações, vento, água e outras fontes mecânicas.	Os TENGs constituem tecnologia promissora para geração distribuída e sensores autossustentáveis, embora eficiência, estabilidade e integração continuem sendo desafios.
Liu et al. (2019)	*Integrated charge excitation triboelectric nanogenerator*	Desenvolver um sistema de excitação de carga capaz de aumentar e estabilizar a densidade de carga e a saída elétrica dos TENGs.	Estudo experimental com projeto de circuitos multiplicadores de tensão, sistemas de excitação externa e autoexcitação e avaliação de fatores como materiais, frequência, espessura e umidade.	O sistema alcançou densidade de carga superior a 1,25 mC/m² e apresentou rápida acumulação de carga, atingindo saturação em aproximadamente 50 segundos a 1 Hz.	A autoexcitação integrada é uma estratégia eficiente para obter saídas elétricas mais elevadas e estáveis, contribuindo para aplicações práticas de maior potência.
Paosangthong, Torah e Beeby (2019)	*Recent progress on textile-based triboelectric nanogenerators*	Analisar o desenvolvimento dos nanogeradores triboelétricos baseados em materiais têxteis e suas aplicações em dispositivos vestíveis.	Revisão da literatura sobre materiais, configurações, métodos de fabricação e desempenho de TENGs incorporados a tecidos, fibras e estruturas flexíveis.	Os sistemas têxteis apresentam vantagens como flexibilidade, baixo peso, conformabilidade e capacidade de recuperar energia dos movimentos corporais.	TENGs têxteis apresentam elevado potencial para eletrônicos vestíveis, desde que sejam aprimoradas resistência mecânica, estabilidade elétrica e integração aos tecidos.
Wu et al. (2019)	*Triboelectric nanogenerator: a foundation of the energy for the new era*	Apresentar os fundamentos, avanços e campos de aplicação dos TENGs e discutir seu potencial como tecnologia energética para sistemas inteligentes.	Revisão abrangente da teoria, resultados experimentais e aplicações, organizada em quatro áreas principais: micro/nanofontes, sensores autossustentáveis, energia oceânica e fontes diretas de alta tensão.	A literatura evidencia que os TENGs podem aproveitar diferentes formas de energia mecânica e atuar tanto na produção elétrica.	Os autores apontam os TENGs como tecnologia estratégica para IoT e sistemas distribuídos, destacando a necessidade de avanços que favoreçam sua futura comercialização.

Zhao et al. (2021)	*Selection rules of triboelectric materials for direct-current triboelectric nanogenerator*	Investigar critérios para selecionar pares de materiais capazes de melhorar o desempenho de nanogeradores triboelétricos de corrente contínua.	Pesquisa experimental e comparativa envolvendo diferentes combinações de materiais triboelétricos e avaliação de seu comportamento na produção direta de corrente.	Os resultados demonstraram que a escolha dos materiais e suas propriedades interfaciais interferem fortemente na direção e na intensidade da transferência de cargas.	A definição de regras de seleção de materiais contribui para tornar o projeto de TENGs de corrente contínua mais previsível e eficiente.
Zhou et al. (2020)	*Triboelectric nanogenerators: fundamental physics and potential applications*	Apresentar os fundamentos físicos dos TENGs e sistematizar suas possibilidades de aplicação tecnológica.	Revisão teórica e tecnológica sobre triboeletrificação, indução eletrostática, modos de funcionamento, desempenho e aplicações dos nanogeradores.	Os estudos revisados demonstraram capacidade para recuperar energia mecânica de diferentes.	A evolução da compreensão dos mecanismos físicos, associada ao aprimoramento de materiais e estruturas, tende a ampliar a eficiência e a utilização prática dos TENGs.

Fonte: o autor (2026).

Após a seleção, os artigos foram submetidos a leitura exploratória e, posteriormente, a uma análise temática comparativa. As informações foram organizadas em três eixos principais: princípios de funcionamento e mecanismos de geração triboelétrica; materiais, configurações e aplicações tecnológicas; e limitações, desempenho e perspectivas futuras dos nanogeradores triboelétricos. Essa organização permitiu comparar diferentes abordagens experimentais e identificar tendências recorrentes na evolução dos TENGs ao longo do período analisado.

4. Resultados E Discussão

A análise dos artigos selecionados permitiu identificar três núcleos principais para compreender o desenvolvimento recente da geração triboelétrica: os fundamentos físicos e os fatores que determinam o desempenho dos nanogeradores; a evolução dos materiais, estruturas e aplicações; e os desafios que ainda limitam sua consolidação em sistemas energéticos e eletrônicos de uso mais amplo.

4.1 Princípios de funcionamento e fatores que influenciam o desempenho dos nanogeradores triboelétricos

Os resultados dos estudos teóricos e experimentais confirmam que o funcionamento dos nanogeradores triboelétricos depende da associação entre eletrificação por contato e indução eletrostática. Quando materiais distintos entram em contato e posteriormente se separam ou deslizam, ocorre redistribuição de cargas elétricas nas superfícies, formando uma diferença de potencial capaz de produzir corrente em um circuito externo. Essa característica permite transformar movimentos mecânicos relativamente simples em sinais elétricos úteis. Zhou et al. (2020) e Kim et al. (2021) destacam que o desempenho desse

processo depende tanto das propriedades dos materiais quanto da geometria, frequência e modo de operação do dispositivo (Zhou et al., 2020; Kim et al., 2021).

A diversidade de modos operacionais representa uma das principais vantagens dessa tecnologia. Estruturas de contato-separação vertical, deslizamento lateral, eletrodo único e camada triboelétrica independente podem ser ajustadas conforme a fonte mecânica disponível. Essa flexibilidade é particularmente importante em aplicações nas quais o movimento não ocorre de maneira uniforme ou contínua, como em sistemas vestíveis ou na captação de energia ambiental. Wang, Yang e Wang (2017) mostram que arquiteturas flexíveis aumentam a capacidade de adaptação dos TENGs a diferentes superfícies, enquanto Wu et al. (2019) destacam que a escolha da configuração influencia diretamente a eficiência da conversão energética (Wang; Yang; Wang, 2017; Wu et al., 2019).

A seleção do par triboelétrico também se mostrou determinante para o desempenho dos dispositivos. Materiais com maior diferença de afinidade eletrônica tendem a apresentar maior capacidade de separação de cargas quando colocados em contato. Zhao et al. (2021) demonstram que a definição de critérios para escolha desses materiais pode melhorar previsibilidade e eficiência, sobretudo em nanogeradores de corrente contínua. Esse resultado é importante porque reduz a dependência de abordagens exclusivamente empíricas e aponta para uma etapa de maior racionalização no projeto de TENGs, em que propriedades físico-químicas passam a orientar a combinação das superfícies utilizadas (Zhao et al., 2021).

A intensidade da carga superficial também pode ser aumentada por estratégias de excitação elétrica. Liu et al. (2019) demonstraram que sistemas integrados de excitação de carga são capazes de elevar e estabilizar a densidade de carga produzida pelo TENG. Esse tipo de abordagem amplia significativamente a saída elétrica sem exigir apenas mudanças nos materiais ou na geometria do dispositivo. O resultado sugere que a otimização dos nanogeradores depende não somente da interface mecânica, mas também de soluções eletrônicas capazes de controlar e aproveitar de maneira mais eficiente o comportamento das cargas geradas durante os ciclos de operação (Liu et al., 2019).

A estabilidade mecânica também deve ser considerada porque muitos TENGs dependem de contato e separação repetitivos entre superfícies. Ciclos prolongados de atrito podem provocar desgaste, alteração da rugosidade e perda de propriedades triboelétricas, afetando a produção elétrica ao longo do tempo. Choi et al. (2023) ressaltam que a durabilidade é um dos principais obstáculos à transição entre protótipos laboratoriais e produtos comerciais. Esse aspecto exige projetos que equilibrem área de contato suficiente para maximizar a geração e redução do desgaste necessário para manter a vida útil do dispositivo (Choi et al., 2023).

Os resultados também indicam que a avaliação do desempenho precisa considerar mais do que valores máximos de tensão. Parâmetros como corrente, densidade de potência, estabilidade ao longo do tempo, frequência do movimento e carga conectada ao dispositivo são essenciais para comparar diferentes propostas. A ausência de critérios completamente uniformes entre estudos dificulta a comparação direta de resultados e pode levar a interpretações superestimadas sobre determinadas arquiteturas. Choi et al. (2023) chamam atenção para a necessidade de métodos mais padronizados, especialmente quando se pretende avaliar a maturidade tecnológica e a viabilidade de aplicações comerciais (Choi et al., 2023).

Em conjunto, os estudos deste eixo demonstram que a geração triboelétrica resulta da interação entre fenômenos físicos, propriedades de materiais, arquitetura dos dispositivos e condições de operação. Não existe um único fator responsável por elevar a eficiência; o desempenho emerge da combinação adequada entre superfície, geometria, movimento e controle elétrico. Isso explica por que diferentes trabalhos adotam estratégias distintas para alcançar melhores resultados. A tendência atual é integrar engenharia de

materiais, otimização mecânica e gerenciamento eletrônico, buscando sistemas mais estáveis, previsíveis e adaptados ao uso real (Kim et al., 2020; Wu et al., 2019).

4.2 Materiais, configurações e aplicações tecnológicas da geração triboelétrica

A evolução dos materiais empregados nos TENGs aparece como um dos aspectos mais relevantes da literatura recente. Inicialmente, grande parte dos dispositivos utilizava combinações relativamente simples entre metais e polímeros, mas os estudos mais atuais exploram grafeno, compósitos, fibras, materiais biológicos e superfícies nanoestruturadas. Essa diversificação busca não apenas aumentar a densidade de carga, mas também melhorar flexibilidade, leveza, biocompatibilidade e sustentabilidade. Kim et al. (2020) mostram que a escolha dos materiais influencia diretamente a eficiência, enquanto Domingos et al. (2021) demonstram que materiais à base de grafeno podem ser incorporados a soluções triboelétricas funcionais (Kim et al., 2020; Domingos et al., 2021).

O uso do grafeno representa um exemplo importante dessa transformação. Domingos et al. (2021) demonstraram que estruturas produzidas a partir de grafeno processado em solução aquosa podem atuar em nanogeradores triboelétricos com desempenho relevante. A possibilidade de utilizar métodos de fabricação relativamente simples e compatíveis com processos de baixo custo amplia o interesse desse material para aplicações flexíveis e portáteis. Além de sua elevada condutividade, o grafeno pode contribuir para reduzir peso e espessura do dispositivo, características desejáveis em sistemas destinados à integração com eletrônicos compactos (Domingos et al., 2021).

A incorporação de materiais biodegradáveis constitui outra frente de desenvolvimento. Pan et al. (2018) mostraram a viabilidade de nanogeradores baseados em ácido polilático e gelatina nanoestruturada, demonstrando que a geração triboelétrica pode ser realizada com materiais capazes de se degradar em condições adequadas. Esse resultado é relevante diante do crescimento de dispositivos eletrônicos descartáveis e sensores de curta duração. A possibilidade de conciliar desempenho funcional com menor persistência ambiental amplia o campo de aplicação dos TENGs e aproxima a tecnologia de estratégias voltadas à redução de resíduos eletrônicos (Pan et al., 2018).

Khandelwal et al. (2019) avançam nessa mesma direção ao desenvolverem nanogeradores utilizando materiais comestíveis, biocompatíveis e biodegradáveis. O estudo demonstra que a triboeletricidade não depende exclusivamente de materiais sintéticos convencionais e pode ser explorada em estruturas ambientalmente mais compatíveis. Essa perspectiva abre espaço para aplicações em dispositivos temporários, embalagens inteligentes, sistemas biomédicos e sensores descartáveis. Embora esses materiais apresentem desafios de estabilidade e durabilidade, eles reforçam a ideia de que a sustentabilidade pode ser incorporada ao projeto desde a escolha dos componentes (Khandelwal et al., 2019).

O uso de materiais de origem biológica também aparece no trabalho de Candido et al. (2023), que desenvolveram um TENG baseado em PVA e fibroína da seda. A combinação entre polímero e biomaterial possibilitou a obtenção de um sistema capaz de converter estímulos mecânicos em eletricidade, mantendo características relevantes para estruturas flexíveis. Esse resultado mostra que materiais naturais podem oferecer propriedades adequadas para dispositivos energéticos e sensores de nova geração. Além da questão ambiental, a flexibilidade e compatibilidade desses materiais podem favorecer aplicações em superfícies curvas, sistemas vestíveis e interfaces com o corpo humano (Candido et al., 2023).

As aplicações vestíveis constituem, de fato, um dos campos mais promissores. Paosangthong, Torah e Beeby (2019) destacam o crescimento dos TENGs integrados a tecidos, fibras e estruturas flexíveis capazes de aproveitar movimentos cotidianos. Caminhar, dobrar articulações, pressionar superfícies ou movimentar roupas pode produzir

energia suficiente para alimentar sensores de baixa potência ou gerar sinais utilizados diretamente para monitoramento. A principal vantagem está na capacidade de transformar movimentos inevitáveis do corpo em fonte energética local, reduzindo dependência de baterias em sistemas eletrônicos portáteis (Paosangthong; Torah; Beeby, 2019).

Gołąbek e Strankowski (2024) também mostram que a colheita de energia associada ao movimento humano vem sendo integrada a sensores inteligentes e dispositivos autossustentáveis. Esse tipo de aplicação é particularmente relevante para saúde digital, monitoramento físico, esportes e interfaces homem-máquina. Em vez de apenas gerar energia, muitos TENGs podem utilizar o próprio sinal elétrico produzido pelo movimento como informação de sensoriamento. Essa dupla função, geração e detecção, representa uma vantagem significativa porque reduz o número de componentes necessários em sistemas compactos (Gołąbek; Strankowski, 2024).

4.3 Limitações, eficiência e perspectivas tecnológicas dos TENGs

Embora os resultados experimentais sejam promissores, os estudos apontam que a principal barreira para adoção ampla dos TENGs está na diferença entre desempenho de laboratório e funcionamento contínuo em condições reais. Variações ambientais, desgaste e instabilidade elétrica podem reduzir a eficiência ao longo do tempo. Callaty, Rodrigues e Ventura (2025) destacam que dispositivos destinados a ambientes severos precisam lidar com umidade, temperatura e condições mecânicas variáveis. Essa limitação reforça a necessidade de projetos mais robustos, especialmente em aplicações externas, industriais e marítimas, nas quais o controle ambiental é praticamente inexistente (Callaty; Rodrigues; Ventura, 2025).

A durabilidade das interfaces permanece como outro desafio importante. Como muitos TENGs dependem de contato repetido, superfícies podem sofrer desgaste progressivo, alterando a rugosidade e a distribuição de carga. Choi et al. (2023) apontam que esse problema influencia diretamente a confiabilidade e a comercialização. Estratégias como revestimentos protetores, redução do contato abrasivo e uso de configurações com menor atrito podem ampliar a vida útil, mas frequentemente introduzem compromissos entre resistência e desempenho. O desenvolvimento futuro exige, portanto, equilíbrio entre eficiência inicial e manutenção da geração durante milhares ou milhões de ciclos (Choi et al., 2023).

Outro ponto crítico é a densidade de potência disponível para alimentar dispositivos reais. Embora TENGs possam produzir tensões elevadas, a corrente disponível tende a ser limitada em várias configurações. Isso significa que altos valores de tensão não correspondem necessariamente a capacidade suficiente para alimentar sistemas de maior consumo. Liu et al. (2019) mostram que técnicas de excitação integrada podem elevar significativamente a densidade de carga e melhorar a saída do dispositivo. Avanços semelhantes serão fundamentais para reduzir a distância entre demonstrações experimentais e aplicações que exigem fornecimento energético mais estável (Liu et al., 2019).

A integração com circuitos de gerenciamento e armazenamento também representa uma etapa indispensável. A energia produzida por TENGs pode ser pulsante, variável e dependente do movimento disponível, o que dificulta sua utilização direta por circuitos eletrônicos convencionais. Para tornar o sistema funcional, normalmente são necessários retificação, condicionamento, armazenamento e controle da energia gerada. Wu et al. (2019) destacam que o desenvolvimento dos TENGs precisa ser acompanhado por sistemas eletrônicos capazes de converter sua produção irregular em alimentação útil e confiável para sensores e dispositivos conectados (Wu et al., 2019).

A sustentabilidade dos materiais também tende a ganhar maior importância à medida que os TENGs se aproximam de aplicações em larga escala. O uso de polímeros

convencionais pode gerar impactos ambientais semelhantes aos observados em outros componentes eletrônicos, especialmente quando os dispositivos são descartáveis. Trabalhos como os de Pan et al. (2018) e Khandelwal et al. (2019) demonstram alternativas biodegradáveis e biocompatíveis, mas ainda existem desafios relacionados à estabilidade, desempenho e resistência desses materiais. O avanço dessa linha poderá contribuir para desenvolver sistemas energéticos pequenos sem ampliar significativamente a geração de resíduos eletrônicos (Pan et al., 2018; Khandelwal et al., 2019).

De modo geral, os estudos sugerem que os nanogeradores triboelétricos apresentam perspectivas mais imediatas em aplicações específicas do que como substitutos de fontes energéticas convencionais. Seu maior potencial está em aproveitar energia mecânica dispersa e de baixa frequência para alimentar sensores, eletrônicos vestíveis e sistemas autônomos, especialmente onde o uso de baterias é inconveniente ou limitado. A consolidação tecnológica dependerá do avanço simultâneo em materiais, estabilidade, padronização, gerenciamento energético e produção escalável. Assim, os TENGs tendem a ocupar papel complementar no cenário energético, com relevância crescente em sistemas inteligentes e distribuídos (Choi et al., 2023; Kim et al., 2021).

5. Considerações Finais

A análise realizada permitiu compreender que a geração de energia triboelétrica apresenta bases físicas consolidadas e um campo tecnológico em rápida expansão, especialmente por sua capacidade de converter movimentos mecânicos de baixa frequência em energia elétrica. Os nanogeradores triboelétricos demonstram versatilidade estrutural, possibilidade de miniaturização e compatibilidade com diferentes materiais, favorecendo aplicações em sensores, dispositivos vestíveis e sistemas autônomos de baixa potência.

Os resultados também evidenciaram que o desempenho dos TENGs depende diretamente da escolha dos materiais, da configuração do dispositivo, das condições de contato e do ambiente de operação. Embora existam avanços importantes em materiais biodegradáveis, grafeno, estruturas flexíveis e sistemas de excitação de carga, ainda permanecem limitações relacionadas ao desgaste, à estabilidade elétrica, à umidade, à padronização dos ensaios e ao gerenciamento da energia produzida.

Conclui-se que os nanogeradores triboelétricos possuem maior potencial como tecnologia complementar de colheita de energia do que como substitutos diretos das fontes convencionais. Sua aplicação tende a crescer principalmente em sistemas que demandam pequenas quantidades de energia e funcionamento autônomo. O avanço da área dependerá do desenvolvimento de dispositivos mais duráveis, eficientes, sustentáveis e adaptáveis, capazes de manter desempenho confiável fora das condições controladas de laboratório.

Referências

CALLATY, Carlos; RODRIGUES, Cátia; VENTURA, João. Triboelectric nanogenerators in harsh conditions: a critical review. *Nano Energy*, v. 135, 110661, 2025.

CANDIDO, Iuri C. M. et al. PVA-silk fibroin bio-based triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, v. 105, 108035, 2023.

CHOI, Dongwhi et al. Recent advances in triboelectric nanogenerators: from technological progress to commercial applications. *ACS Nano*, v. 17, n. 12, p. 11087-11219, 2023.

DOMINGOS, Ismael; NEVES, Ana I. S.; CRACIUN, Monica F.; ALVES, Helena. Graphene based triboelectric nanogenerators using water based solution process. *Frontiers in Physics*, v. 9, 742563, 2021.

DUARTE JÚNIOR, Durval; TEIXEIRA, Giovanni. *Tribologia, lubrificação e mancais de deslizamento*. 2. ed. rev. e ampl. [S. l.]: Ciência Moderna, 2023.

DUARTE, Écio Naves. *Mecânica do contato entre corpos revestidos*. São Paulo: Blucher, 2016. 104 p. ISBN 978-85-8039-199-2.

GOŁĄBEK, Jakub; STRANKOWSKI, Michał. A review of recent advances in human-motion energy harvesting nanogenerators, self-powering smart sensors and self-charging electronics. *Sensors*, v. 24, n. 4, 1069, 2024.

GONÇALVES, Isabel; RODRIGUES, Cátia; VENTURA, João. Sea state adaptation enhances power output of triboelectric nanogenerators for tailored ocean wave energy harvesting. *Advanced Energy Materials*, v. 14, n. 2, 2302627, 2024.

KHANDELWAL, Gaurav et al. All edible materials derived biocompatible and biodegradable triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, v. 65, 104016, 2019.

KIM, Dong Won et al. Material aspects of triboelectric energy generation and sensors. *NPG Asia Materials*, v. 12, art. 6, 2020.

KIM, Won-Guk et al. Triboelectric nanogenerator: structure, mechanism, and applications. *ACS Nano*, v. 15, n. 1, p. 258-287, 2021.

LIU, Wenbo et al. Integrated charge excitation triboelectric nanogenerator. *Nature Communications*, v. 10, art. 1426, 2019.

PAN, Ranran et al. Fully biodegradable triboelectric nanogenerators based on electrospun polylactic acid and nanostructured gelatin. *Nano Energy*, v. 45, p. 193-202, 2018.

PAOSANGTHONG, Worawat; WAGGONER, Sarah; DAS, Rajarshi. Recent progress on textile-based triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, v. 66, 104148, 2019.

WANG, Yan; YANG, Ya; WANG, Zhong Lin. Triboelectric nanogenerators as flexible power sources. *npj Flexible Electronics*, v. 1, art. 10, 2017.

WU, Changsheng; WANG, Aurelia Chi; DING, Wei; GUO, Haofei; WANG, Zhong Lin. Triboelectric nanogenerator: a foundation of the energy for the new era. *Advanced Energy Materials*, v. 9, n. 1, 1802906, 2019.

ZHAO, Ziming et al. Selection rules of triboelectric materials for direct-current triboelectric nanogenerator. *Nature Communications*, v. 12, art. 4686, 2021.

ZHOU, Long et al. Triboelectric nanogenerators: fundamental physics and potential applications. *Friction*, v. 8, p. 481-506, 2020.