

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

ISAQUE DANIEL CHAVES

**PIEZOELÉTRICO COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA PARA
CIDADES INTELIGENTES: UMA PESQUISA EXPLORATÓRIA**

PROJETO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2021

ISAQUE DANIEL CHAVES

**PIEZOELÉTRICO COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA PARA
CIDADES INTELIGENTES: UMA PESQUISA EXPLORATÓRIA**

**Piezoelectric as an Alternative Source of Energy for Smart Cities: an
Exploratory Research**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof. Dra. Regina Negri Pagani

Coorientadora: Ma. Angelica Duarte Lima

PONTA GROSSA



2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;">Ministério da Educação UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ CÂMPUS PONTA GROSSA Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção</p> |  |
|---|--|---|

TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

PIEZOELÉTRICO COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA PARA CIDADES INTELIGENTES: UMA PESQUISA EXPLORATÓRIA

por

ISAQUE DANIEL CHAVES

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 04 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr(a). Regina Negri Pagani
Profa. Orientadora

Profa. Ms. Angelica Duarte Lima
Membro titular

Prof. Dra. Eliane Fernandes Pietrovski
Membro titular

Prof. Ms. Alana Corsi
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à Gabriela Bulhões,
pelo acolhimento e seus sábios
conselhos.

AGRADECIMENTOS

A universidade é mais que uma graduação, mais do que uma instituição, mais do que salas de aulas e laboratórios. A UTFPR não me propiciou apenas o conhecimento, me proporcionou experiências. Algumas boas, outras ruins, mas cada uma delas cercado de inúmeras pessoas que gostaria de deixar meus sinceros agradecimentos.

Agradeço primeiramente a Deus pelo privilégio da vida.

Aos meus pais por batalharem e poderem me proporcionar o estudo.

A minha orientadora querida Prof. Dr. Regina Pagani por sempre me atender com prontidão e de forma atenciosa, confiando em meu potencial para desafios cada vez maiores.

A família Asas Negras que trouxe histórias que ficarão marcadas em minha vida para sempre

A Atlético XV de Outubro por trazer aprendizados que sala de aula alguma poderia proporcionar.

A minha psicóloga, Fernanda Lopes, por me ajudar nos momentos mais difíceis.

A Luane Gonçalves, por ser uma pessoa doce, gentil e bondosa.

Enfim a todas as demais pessoas que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

CHAVES, Isaque Daniel. **Piezoelétrico como fonte alternativa de energia para Cidades Inteligentes: uma pesquisa exploratória**. 2021. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

O debate sobre meio ambiente, novas tecnologias e desenvolvimento sustentável, expõe o quão necessário é a busca por soluções inteligentes para problemas da sociedade. Dentre esses problemas, a energia elétrica se apresenta como um dos maiores custos para uma cidade, além de ser fundamental no uso de dispositivos eletroeletrônicos, que fazem parte do dia a dia da maioria dos cidadãos. Nesse cenário de utilização intensa de energia elétrica, cujo fornecimento pode ser um dos maiores gargalos para indústrias, o piezoelétrico figura como uma alternativa para geração de energia e criação de sistemas autoalimentados em diversos espaços, tais como rodovias, calçadas, parques e demais espaços públicos, viabilizando a implementação das diretrizes de uma cidade inteligente. O objetivo deste trabalho é explorar como os estudos relacionados à materiais piezoelétricos podem se relacionar com os conceitos de *Smart City*. Para alcançar este objetivo, foi realizada uma revisão sistemática de literatura utilizando-se a metodologia Methodi Ordinatio. Os resultados apontam que esses materiais contribuem com o urbanismo, a sustentabilidade, o monitoramento em tempo real, em áreas da saúde, com o conforto da população, com a mobilidade urbana, e em outras diversas áreas que ajudam a tornar uma cidade mais inteligente.

Palavras-chave: Piezoelétrico. Cidades Inteligentes. Geração de Energia. Sustentabilidade.

ABSTRACT

CHAVES, Isaque Daniel. **Piezoelectric as an alternative source of energy for Smart Cities: an exploratory research**. 55 p. Work of Conclusion Course Graduation in Industrial Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2021.

The growing debates on the environment, new technologies and sustainable development, exposes how necessary the search for intelligent solutions to society's problems has become. Among these problems, electric energy represents one of the biggest costs for a city, but it is fundamental for the use of electronic devices that are part of the daily life of a good part of society. In this scenario of intense use of electric energy, whose supply can be one of the biggest bottlenecks for industries, the piezoelectric appears as an alternative for generating energy and creating self-powered systems in different spaces, such as highways, sidewalks, parks and other spaces public, enabling the implementation of the guidelines of a smart city. The aim of this work is to explore how studies related to piezoelectric materials can relate to the concepts of smart cities. To achieve this goal, a systematic literature review was carried out using the Methodi Ordinatio methodology. The results show that these materials contribute to urbanism, sustainability, real-time monitoring, in health areas, with the comfort of the population, with urban mobility, and in countless other areas that help make a city smarter.

Keywords: Piezoelectric. Smart Cities. Energy Generation. Sustainability.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA | 9 |
| 1.2 OBJETIVOS | 9 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 9 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 10 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 10 |
| 1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO | 12 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 13 |
| 2.1 FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVA E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL | 13 |
| 2.2 PIEZOELÉTRICO | 15 |
| 2.3 FORMAS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS | 17 |
| 2.3.1 Captação de Energia da Superfície do Solo | 17 |
| 2.3.2 Captação da Energia Proveniente de Vibrações | 18 |
| 2.3.3 Captação de Energia de Vias de Tráfego | 19 |
| 2.3.4 Outras Formas de Captação de Energia e Demais Utilizações | 20 |
| 2.4 CARACTERÍSTICAS DE <i>SMART CITY</i> NA LITERATURA | 21 |
| 3 METODOLOGIA | 22 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DO TEMA E PALAVRAS-CHAVE | 23 |
| 3.2 REALIZAÇÃO DA PESQUISA | 24 |
| 3.3 PROCEDIMENTOS DE FILTRAGEM | 24 |
| 3.4 IDENTIFICAR O FATOR DE IMPACTO, NÚMERO DE CITAÇÕES E ANO DE PUBLICAÇÃO | 25 |
| 3.4.1 Ordenação Segundo a Equação InOrdinatio | 25 |
| 3.4.2 Encontrar as Publicações e Realizar a Leitura Sistemática | 26 |
| 3.5 DEFINIÇÃO DE PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE | 26 |
| 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS | 28 |
| 4.1 ANÁLISE DE PORTFÓLIO | 28 |
| 4.1.1 Áreas Do Conhecimento | 28 |
| 4.1.2 Países De Atuação | 30 |
| 4.1.3 Principais Revistas do Portfólio | 32 |
| 4.1.4 Instituições | 34 |
| 4.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO | 34 |
| 4.2.2 Objetivos dos artigos | 35 |
| 4.2.3 Metodologias Empregadas | 36 |
| 4.2.4 Materiais Citados no Portfólio | 36 |
| 4.2.5 Problemas e Soluções | 37 |
| 4.3 DISCUSSÕES | 38 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 42 |
| 5.1 CONTRIBUIÇÕES DO ARTIGO | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2 LIMITAÇÕES..... | 43 |
| 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 43 |
| REFERÊNCIAS..... | 44 |

1 INTRODUÇÃO

O planejamento na construção de cidades não é algo novo. Há centenas de anos já se tem registros de cidades construídas de modo a propiciar o conforto e mobilidade da população. À medida que o tempo passa, a tecnologia avança e o estilo de vida das pessoas muda, novos pontos passam a ser levados em consideração (MACKE; SARATE; MOSCHEN, 2019). Assim, no século XXI, o conceito de *Smart City*, que surgiu em meados de 1991, ganhou grande notoriedade, bem como diversas definições. Pagani et al. (2019) definem *Smart Cities* como:

Uma concentração de pessoas vivendo em uma determinada área geográfica, provida de recursos naturais e tecnológicos, gerida de forma a proporcionar a satisfação das necessidades humanas de modo eficiente e sustentável, bem como proporcionar qualidade de vida a todos os moradores, reduzindo gradualmente os impactos negativos no meio ambiente, na terra ou na água (PAGANI et al., 2019).

Este conceito é completamente relacionado com o décimo primeiro (11º) Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apresentado pela ONU (2015), que trata sobre cidades e comunidades sustentáveis, além de se relacionar com o sétimo ODS (7º) sobre garantir o acesso à energia sustentável a um preço acessível, bem como com o nono ODS (9º) que se refere sobre promover a indústria e fomentar a inovação. É nesse quadro que se encaixa o piezoelétrico.

Anton e Sodano (2007) relatam que os piezoelétricos, que inicialmente tinham seu uso limitado à sensores, microfones e semicondutores, passaram a receber mais atenção no início de 2000, quando deu-se início à estudos com o intuito de converter a energia de vibrações em energia elétrica. Zhu *et al.* (2017) relatam que a partir de 2007 o piezoelétrico ganhou mais notoriedade com os estudos de Zhong Lin Wang.

Segundo Wang, Jasin e Chen (2018), um piezoelétrico é um material capaz de converter a tensão mecânica em energia elétrica. Os piezoelétricos podem ter diferentes arranjos, formas e até composição, dependendo de sua finalidade. Além disso, podem apresentar diferentes níveis de geração de energia (ANTON; SODANO, 2007). Eles podem se apresentar de três formas: Cerâmicos, como o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT); Polímeros, como o fluoreto de polivinilideno (PVDF); e compósitos, materiais mais complexos (WANG; JASIN; CHEN, 2018).

A partir da abordagem dos principais conceitos que envolvem o presente estudo, foi estabelecido seu objetivo, que é explorar como os estudos relacionados à materiais piezoelétricos podem se relacionar com os conceitos de *Smart City*. Assim, para que esse objetivo fosse atingido, o presente trabalho é dividido em seis seções buscando reunir informações sobre piezoelétricos em termos de geração de energia relacionando com as diretrizes de *Smart City*.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Os recentes avanços da tecnologia trazem consigo novas necessidades de soluções. Ao pensar na implantação de uma *Smart City*, é necessário não somente planejar a urbanização de forma inteligente, como também garantir o bem-estar da sociedade de forma sustentável. Em termos energéticos, observa-se que atualmente surgem cada vez mais novos dispositivos eletrônicos, que, por sua vez, demandam baterias menores e com maior autonomia (LEE et al., 2016).

A busca por eficiência energética incentiva o estudo de diferentes formas de obtenção de energia limpa e sustentável. Com essa premissa, a finalidade desse trabalho é explorar o que aborda a literatura, permitindo responder a seguinte pergunta: **Como os estudos sobre materiais piezoelétricos se relacionam com os conceitos de *Smart City*?**

1.2 OBJETIVOS

Nesta subseção, busca-se elencar os objetivos, geral e específicos, permitindo responder ao problema de pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é explorar, através de uma revisão sistemática de literatura, se os estudos relacionados à materiais piezoelétricos podem se relacionar com os conceitos de *Smart City*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- OE1: Revisar meios de colheita de energia na literatura com ênfase em piezoeletrecidade;
- OE2: Levantar dados sobre as publicações acerca de piezoelétricos e *Smart Cities*;
- OE3: Correlacionar o uso de piezoelétricos para fins que atendam aos requisitos de uma *Smart City*.

1.3 JUSTIFICATIVA

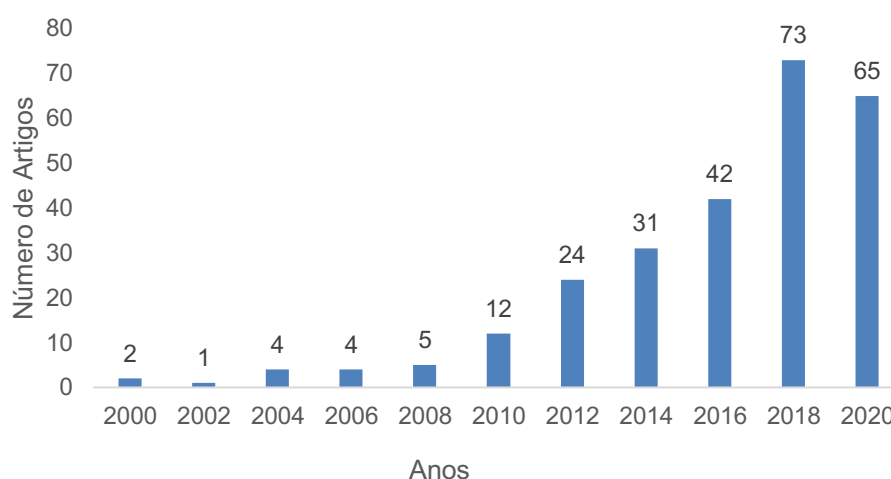
Segundo a Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO), cabe a um engenheiro de produção desempenhar ações que visem a melhoria dos sistemas produtivos além da sua manutenção, seja envolvendo pessoas, materiais, tecnologias, informações e até mesmo energia. O portal ABEPRO ainda destaca a importância de critérios como eficiência e custos no momento da produção, além de outros fatores que atendam as dez áreas de atuação da engenharia de produção. A pesquisa acerca de novos meios alternativos de energia está relacionada a pelo menos cinco subáreas da engenharia de produção que são: gestão da inovação, gestão da tecnologia, gestão de recursos naturais e energéticos, produção mais limpa e ecoeficiência e desenvolvimento sustentável. Se essa pesquisa levar em consideração aspectos como viabilidade econômica, riscos, projeto para implantação ou desenvolvimento de um novo produto, atende ainda mais subáreas, mostrando-se assim um ramo interessante para pesquisas.

Com a industrialização e o crescimento desenfreado da população, bem como da acelerada urbanização, mais do que nunca o debate sobre a utilização de recursos naturais faz-se importante. Nesse contexto, o crescimento da tecnologia acompanha essa tendência de crescimento, surgindo cada vez mais tecnologias capazes de suprir novos problemas da sociedade. A partir do século XXI, os meios alternativos de geração de energia vêm ganhando mais destaque, e as pessoas vêm buscando, cada vez mais, soluções que gerem menor impacto ao meio ambiente (LEE et al., 2016).

Nesse contexto, a pesquisa de piezoelétricos teve crescimento exponencial nos últimos 20 anos. Desse modo, o que anteriormente teria uso limitado e preço

elevado, no decorrer do século XXI passou a ser uma alternativa energética atrativa. O Gráfico 1 demonstra o crescimento do número de publicações abordando piezoelétricos entre 2000 e 2020, utilizando o portfólio de artigos definidos na Seção de Materiais e Métodos desta pesquisa.

Gráfico 1 – Tendência de publicação do tema piezoelétricos



Fonte: Autoria Própria (2021)

Como observado no Gráfico 1, existe uma tendência de crescimento de publicação acerca da temática, já que cerca de 68% das principais obras foram publicadas a partir de 2016, demonstrando que existe interesse acadêmico nessa alternativa de energia, justificando assim o presente estudo.

A tecnologia do piezoelétrico correlacionada com o tema *Smart City*, torna-se ainda mais interessante, já que, quando abordada com as *Smart Cities* trata sobre a otimização dos recursos, aproveitamento dos espaços urbanos, *Internet of Things* (IoT), entre outros. Ao realizar a pesquisa com combinações de palavras-chave relacionadas a piezoelétrico e *Smart City* em diferentes bases de dados, houve casos em que os resultados das buscas apresentaram poucas obras ou nenhuma.

Essa lacuna demonstra que há muito o que se explorar acerca desses temas, evidenciando também sua importância para o meio acadêmico, visto que existe o interesse científico nessa alternativa de energia. Em vista disso, o presente trabalho se justifica no âmbito acadêmico, pois serve como um banco de referências confiável,

já que através da revisão sistemática de literatura, por meio da *Methodi Ordinatio*, resulta em um portfólio de artigos com relevância científica. Equitativamente, este trabalho também se justifica para a sociedade, trazendo à discussão um tema ainda pouco explorado no Brasil, mostrando alternativas que podem atender necessidades, gerar conforto e até economia.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Visto que as aplicações de um material piezoelétrico são bastante vastas e definições a respeito de *Smart Cities* são deveras abrangentes, esse estudo irá limitar-se em termos de aplicação com fins de geração de energia limpa e sustentável, em meios híbridos ou plenos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A preocupação ambiental não é algo recente. No século XX já aconteciam algumas conferências com a temática de meio ambiente, quando os conceitos de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável começaram a ser debatidos. No século XXI, com o aumento desenfreado da população e desenvolvimento tecnológico, faz-se necessário buscar alternativas que atendam às necessidades humanas e, ao mesmo tempo, respeitando os limites do meio ambiente (GLAVIČ; LUKMAN, 2007). Um dos problemas ambientais enfrentados pela sociedade está ligado à emissão de CO₂, causada principalmente pela queima de combustíveis fósseis, que representa mais de 80% da demanda de energia primária, gerando, ao mesmo tempo, outro problema que é a probabilidade de esgotamento desses recursos naturais (AHMED et al., 2017).

Nesse contexto, estudos sobre a geração e meios alternativos de captação de energia, visando a degradação mínima do ambiente, passaram a ser mais comuns. Mas, além da visão ambiental, outros aspectos devem ser considerados, como à necessidade de melhoria da eficiência e autonomia energética para fins tecnológicos, medicinais, segurança pública, entre outros (AHMED et al., 2017). Este fato é observado ao olhar para a quantidade de novos dispositivos eletrônicos que vem surgindo nos últimos anos que demandam de baterias de longa duração (LEE et al., 2016).

Este capítulo fará uma revisão de literatura trazendo conceitos e definições sobre piezoelétricos, sendo uma fonte alternativa de energia, além de discorrer a respeito de *Smart Cities* e a correlação entre as duas temáticas.

2.1 FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVA E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O número de fontes de energia existentes cresce cada vez mais com os novos estudos e pesquisas ao longo dos anos. Desde a descoberta do fogo ao uso de nanogeradores, o uso da energia está atrelado ao conforto e bem-estar pessoal. Porém, o uso desenfreado de recursos para a geração de energia vem causando alterações significativas no clima, na fauna e flora (SONG et al., 2016).

Glavič e Lukman (2007) mostram que a partir da década de 1980, emergiram questionamentos sobre o estilo de vida americano e europeu, e as preocupações com o legado para as futuras gerações. Foi então que o termo “sustentabilidade” entrou em uso, dando origem a ações para planejar um desenvolvimento sustentável, que, conforme os autores: “ênfatizando a evolução da sociedade de modo economicamente responsável e em acordo com os processos naturais e ambientais”. Segundo Brundtland et al. (1987), pode-se conceituar desenvolvimento sustentável como: “...o desenvolvimento que atenda às necessidades presentes sem comprometer a capacidade que as futuras gerações tenham para atender às suas próprias necessidades.”

Dentre as ações para promover o Desenvolvimento Sustentável, estão os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pelas Nações Unidas (ONU). Os ODS foram acordados em 2015 com mais de 150 líderes mundiais, fazendo parte da agenda 2030. Estes objetivos não só garantem uma melhora na qualidade de vida das pessoas e do planeta (em termos ambientais), como também podem ajudar a reduzir desperdícios, e conseqüentemente custos. Midilli, Dincer e Ay (2006) apontam o quão interligado está uma fonte de energia sustentável com o desenvolvimento sustentável, uma vez que os diferentes tipos de energia também englobam aspectos econômicos, tecnológicos e sociais, todos auxiliando no cumprimento dos ODS, propostos pela ONU.

Song et al. (2016) mostram que, com as mudanças climáticas, os combustíveis fósseis tendem a perder popularidade, deste modo o foco de pesquisa passa a ser mais voltado aos meios solares, eólicos, geotérmicos e até mesmo o piezoelétrico. Mas substituir o tão utilizado combustível fóssil não é uma tarefa simples, é justamente essa complexidade que desafia pesquisadores a explorar novos métodos de geração de energia através de meios alternativos, sejam eles meios renováveis, sustentáveis e energia verde (LEE et al., 2016). Conforme Midilli, Dincer e Ay (2006), uma fonte alternativa e sustentável ao mesmo tempo, é aquela que tem zero ou mínimo impacto ambiental e é proveniente de fontes renováveis.

Atualmente, não é somente a geração de energia sustentável que está em foco, mas o debate ainda abrange métodos híbridos de captação, passando a dar mais atenção para termos como cogeração e reciclagem de energia (WANG; JASIM; CHEN, 2018). A reciclagem de energia é uma expressão utilizada em termos de

eficiência e perdas, nesse cenário, busca-se aproveitar a energia dissipada em um método de geração através de outro método. É importante salientar que, assim como o conceito de reciclagem convencional, primeiramente, busca-se reduzir o consumo, bem como a sua reutilização (GLAVIČ; LUKMAN, 2007).

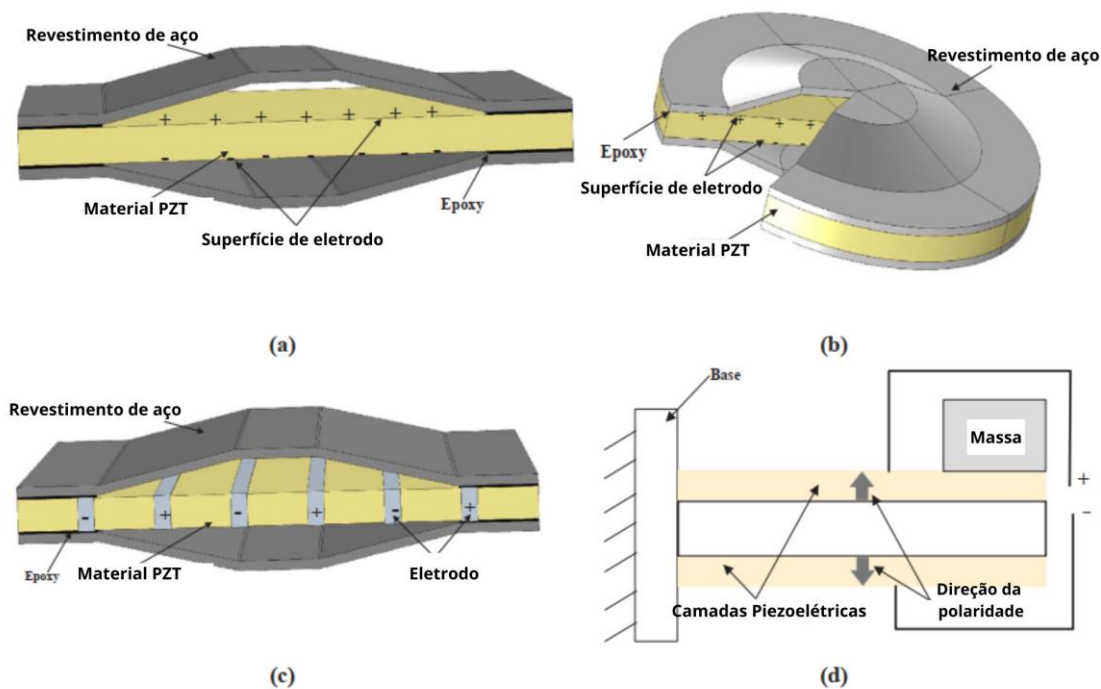
A partir desses conceitos é mostrado o quão importante é a discussão acerca de fontes de energia sustentáveis, e a escolha de materiais piezoelétricos, foco do presente estudo, podem ser uma boa alternativa.

2.2 PIEZOELÉTRICO

O nome “Piezoelétrico” vem do grego e significa “eletricidade por pressão”. Hannan et al. (2012) relatam que esse tipo de material foi descoberto pelos físicos franceses Pierre e Jacques Currie, em 1880. Segundo Lee et al. (2015), um piezoelétrico é caracterizado por ser um material que, quando submetido à força mecânica, responde ficando eletricamente polarizado. Devido à característica de acúmulo de carga elétrica gerada pela tensão mecânica, os piezoelétricos se tornam uma alternativa para a geração de energia. Atualmente, a literatura aponta que seu principal uso é para geração em pequena escala, também chamada de microgeração, ou seja, para alimentar sensores, *LEDs* e similares (IBN-MOHAMMED et al., 2016).

Os materiais Piezoelétricos podem ser encontrados na forma de cristais, como por exemplo o sulfeto de zinco (ZnS), clorato de sódio (NaClO₃), além de um dos mais utilizados, como o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), mas eles também podem ser produzidos em forma de polímero, como é o caso do Polivinilo de Flúor (PVDF). Suas diferentes propriedades físicas também contam com diferentes aplicações, por exemplo, as cerâmicas são mais rígidas sendo melhores para uso com maiores variações de temperatura e mais resistentes à abrasão, enquanto os polímeros contam com maior flexibilidade o que faz com que se quebrem com maior dificuldade (WANG; JASIM; CHEN, 2018). A Figura 1 mostra alguns modelos de piezoelétricos.

Figura 1 – Modelos de Piezoelétricos

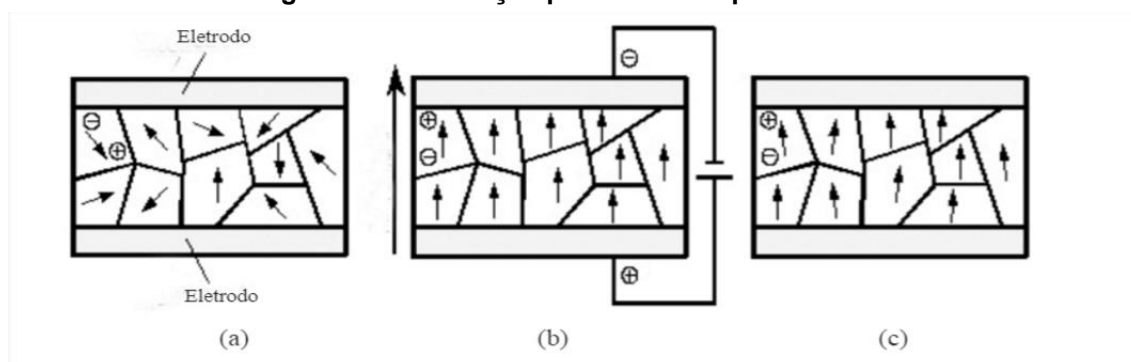


Fonte: Wang, Jasim e Chen (2018)

A Figura (1a) mostra o modelo mais comum de piezoelétrico, retangular com revestimento em aço saliente, onde ocorre a tensão. A Figura (1b) mostra um piezoelétrico em forma de címbalo ou prato. A Figura (1c) mostra um piezoelétrico retangular, com a configuração do eletrodo em série. Por fim, o modelo da Figura (1d) é uma viga saliente e flexível em que a massa atua na ponta (WANG, JASIM e CHEN, 2018).

Segundo Ferreira (2017), quando se aplica um campo elétrico sob um material seguido pela remoção, os dipolos elétricos permanecem orientados e essa polarização gera um piezoelétrico permanente. Esse processo pode ser melhor ilustrado a partir da Figura 2.

Figura 2 – Polarização para obter um piezoelétrico



Fonte: Savil; Oliveira (2013)

A Figura (2a) mostra o início desse processo com um eletrodo com orientação polar aleatória. Na Figura (2b), o material é submetido a um campo elétrico em que ocorre a polarização por meio de corrente contínua. Por fim, na Figura (2c), depois da remoção do campo elétrico, o material mantém a ordenação de uma polarização permanente.

2.3 FORMAS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Uma das características dos materiais piezoelétricos é poder gerar energia através do esforço mecânico, além disso, o seu uso e aplicações são bastante amplos. Nessa Seção serão citados alguns exemplos de empregos de piezoelétrico encontrados na literatura.

2.3.1 Captação de Energia da Superfície do Solo

Uma das aplicações de piezoelétrico para a geração de energia é a captação do movimento dos pedestres na calçada. A tensão gerada por cada passo de uma pessoa em uma superfície revestida por uma camada de piezoelétrico pode ser convertida em energia elétrica, com fins, desde alimentação de sensores, envio de informações sobre o estado da via, ou até conectividade com *smartphones* (KATHPALIA et al., 2017).

Song et al. (2019) também retrata um sistema de calçadas com captação da energia do movimento das pessoas por blocos de piezoelétrico similares aos blocos

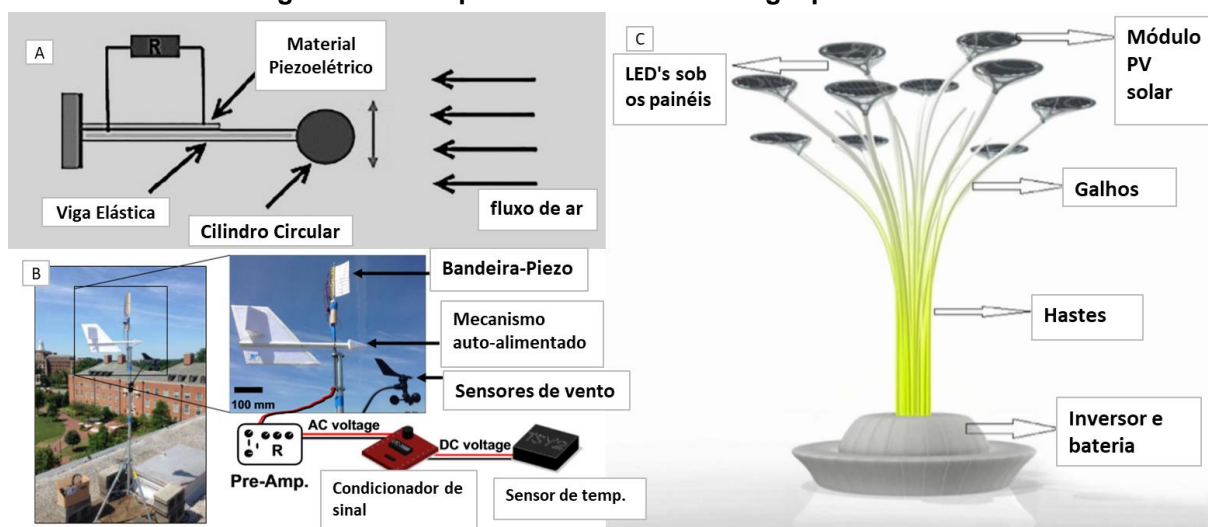
comuns usados em Seul, na Coreia do Sul. Esses blocos possuem várias camadas de piezoelétrico podendo assim, otimizar a captação da vibração gerada pelo movimento, servindo para alimentar *LEDs*, tais como semáforo. O trabalho desses pesquisadores ainda leva em conta as condições reais do dia a dia, como: clima, temperatura, diferença de massa dos pedestres, além de outros fatores. Outro benefício, é que como os blocos são das mesmas dimensões dos blocos mais comuns de Seul, o custo para a troca e implementação do sistema piezoelétrico seria menor.

Seguindo a mesma ideia da aplicação em calçadas, ainda é possível aplicar esse material para um piso ou “tapete” e usá-los em lugares internos com movimentação de pessoas. Li e Strezov (2014), mostram casos de captação de energia potencial oriunda da movimentação de pedestres em uma universidade, que acaba sendo transformada em energia elétrica. Segundo De Souza et al. (2015), a empresa *Sustainable Dance Club* (SDC) foi a responsável por abrir uma boate em Roterdã, na Holanda, onde a pressão exercida pelo movimento das pessoas na pista de dança era capaz de gerar a eletricidade que mantinha as luzes do local em funcionamento. Cramm et al., (2011) mostram o caso da *PAVEGEN* que fabrica placas de material piezoelétrico, podendo ser usadas desde calçadas a locais fechados como, por exemplo, shoppings centers e alegam poder gerar de 4 a 8 Watts de eletricidade por pisada.

2.3.2 Captação da Energia Proveniente de Vibrações

A cogeração é apontada por muitos pesquisadores como o futuro da geração de energia. Combinar diferentes formas de obtenção é otimizar o potencial de geração e causar menores danos ao meio ambiente. Se tratando de novas tecnologias, a cogeração é uma forma de aumentar a autonomia de baterias. Anton e Sodano (2007) citam o uso de piezoelétricos em hastes que captam a vibração de hélices de geradores eólicos, assim, além da energia do vento de fato, pode-se usar a energia proveniente da vibração do equipamento. A mesma ideia ainda pode ser aplicada a outras áreas, como a vibração causada por movimento de fluidos, existem modelos de coletores de energia em formato de hastes, bandeiras e até mesmo árvores. Esses modelos são exemplificados na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo de coletores de energia piezoelétrica



Fonte: Compilação do Autor¹

O exemplo (A) mostra uma haste coletora de energia, utilizando o vento como o fluido, no exemplo (B) o coletor de vibração do vento é em formato de uma bandeira flexível, já no exemplo (C) é um caso mais complexo captação híbrida em forma de árvore, utilizando hastes que captam vibrações e painéis solares nas extremidades.

2.3.3 Captação de Energia de Vias de Tráfego

Piezoelétricos também podem ser empregados para a captação de energia através do seu uso em ruas, rodovias e estradas, onde há considerável tráfego de veículos. Dessa forma, a força exercida pelo movimento dos carros sobre a via é capaz de gerar energia elétrica. Visto que a malha rodoviária de diversos países é extremamente extensa, é interessante pensar que é possível aproveitar parte desse espaço para a geração de energia sustentável (ZHAO, XIANG; SHI, 2019).

Existem diversos estudos propondo formatos e ordenação para piezoelétricos em vias de tráfego. Wang, Jasim e Chen (2018) citam, entre outros, o piezoelétrico em formato de prato, capaz de gerar aproximadamente 0,06J de energia por passagem de veículo. Um estudo de Cao et al. (2020) mostra que em 100 metros de pavimento com um transdutor piezoelétrico pode produzir até 963,99J de energia em

¹ Montagem a partir de figuras dos trabalhos de A. (HAMLEHDAR; KASAEIAN; SAFAEI; 2019); B. (ORREGO et al., 2017). C. (HYDER et al., 2017);

um dia com tráfego médio normal, o que é suficiente para carregar a bateria de aproximadamente 35 celulares. Essa energia gerada nas vias pode ser utilizada para manter o funcionamento de um semáforo, como Ferreira (2017) mostra em seu estudo, ou ainda para iluminação pública, além de manter sensores e radares. O ponto negativo para essa aplicação seria em questão de durabilidade, já que para gerar eletricidade, o piezoelétrico necessita de uma deformação e então voltar ao seu estado inicial (DE SOUZA et al., 2015).

2.3.4 Outras Formas de Captação de Energia e Demais Utilizações

O piezoelétrico pode alimentar sensores que monitoram a condição física da pessoa, dispensando o uso de baterias pesadas (ANTON; SODANO; 2007). Apesar deste tópico não se tratar exatamente de geração de energia em macro escala, é deveras importante, uma vez que está ligado a áreas da saúde.

Khuang et al (2016) denotam o uso desse material acoplado ao joelho de seres humanos, permitindo captar a energia proveniente do movimento da pessoa ao caminhar. É importante salientar que, para aplicações relacionadas ao corpo humano, normalmente utiliza-se piezoelétricos sintetizados a partir de polímeros flexíveis e até mesmo nanotecnologia, tendo seu uso destinado a pequenas demandas de energia.

Zhong Lin Wang pode ser considerado um dos precursores dos nanogeradores piezoelétricos e piezo-eletrônicos. Em 2007, ele passou a se aprofundar nesse segmento de estudos, e ano após ano vem publicando suas novas descobertas (LEE; GUPTA; KIM, 2015). Wang (2012) propõe que os nanogeradores devam ser cada vez menores e com um potencial de geração cada vez maior, sendo fundamental para aplicações de sistemas inteligentes e autoalimentados.

Lee et al. (2016) também trazem conceitos de combinação de coletores de energia. Como exemplo, pode-se apontar um coletor térmico e mecânico ao mesmo tempo, utilizando nanotecnologia como o grafeno. Ahmed et al. (2019) traz outro emprego combinando piezoelétricos e painéis fotovoltaicos em formato de árvores, a principal diferença com Hyder et al. (2017) é que o modelo deste primeiro também conta com turbina de vento.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE *SMART CITY* NA LITERATURA

Uma característica de *Smart City* é conciliar o uso da tecnologia para propiciar um perímetro urbano eficiente, resultando em bem-estar e comodidade à sua população, de maneira sustentável (MACKE; SARATE; MOSCHEN, 2019). Caragliu, Bo e Nijkamp (2011) acrescentam que uma *Smart City* deve procurar reduzir as distâncias, criar sistemas integrados, promover uma economia sustentável, garantir o acesso ao lazer entre inúmeros outros fatores.

Se tratando de uma *Smart City*, é inevitável não abordar temas como *Internet of Things (IoT)*, *Smart Homes*, sensores e controladores. Chan et al. (2008) citam o gerenciamento remoto, onde a pessoa pode ter o controle, em tempo real, de suas despesas (energia elétrica, água e gás), além de sensores em diversos lugares da casa a fim de garantir a economia energética e praticidade. Alvi et al. (2015) afirmam que a vantagem da *IoT* é fazer com que a integração e conexão entre as coisas seja rápida e sem fio, permitindo melhorias de comunicação e monitoramento, principalmente. A *IoT* também pode propiciar estacionamentos inteligentes. Segundo Al-Turjman e Malekloo (2019), sensores com tecnologia 5G são capazes de mostrar vagas de estacionamento livres pela cidade, fazendo com que o tempo necessário para achar uma vaga vazia fosse reduzido, melhorando o tráfego e a mobilidade urbana.

Macke, Sarate e Moschen (2019) destacam que além das soluções tecnológicas e inovadoras, uma *Smart City* depende essencialmente do fator humano. É necessário adquirir um senso de comunidade e menos tecnocêntrico, afinal uma *Smart City* só é viabilizada através da participação ativa da população em debates políticos, científicos e culturais. Pagani et al. (2019) traz uma revisão sistemática de literatura, com a combinação dos conceitos de *Smart City* com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, propostos pela ONU (2015), já que ambos têm por objetivo o bem-estar do planeta e das pessoas.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os procedimentos metodológicos, ferramentas e materiais utilizados no desenvolvimento do estudo.

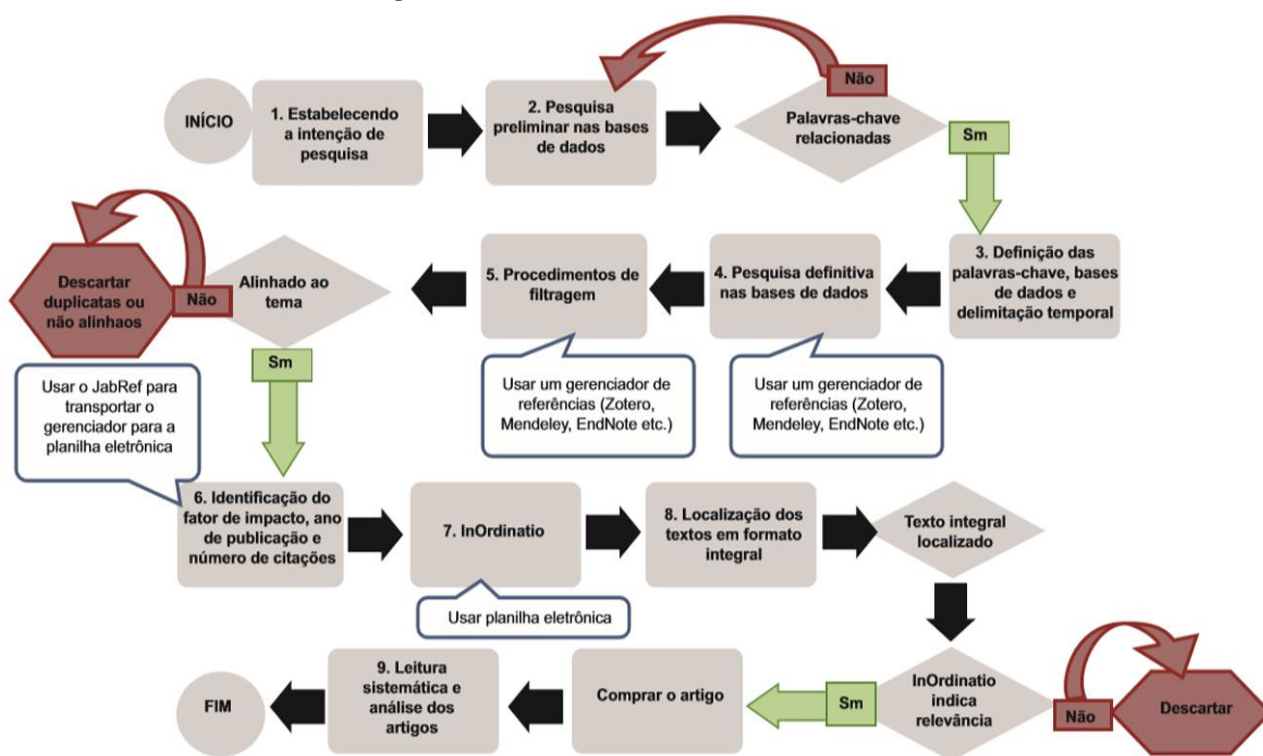
Por se tratar de uma pesquisa com o objetivo de reunir maiores informações a respeito de um tema, pode ser classificada como exploratória (Munaretto, Luiz Corrêa e Cunha, 2013). Para Gil (2019), uma pesquisa exploratória é aquela aplicada para modificar, esclarecer ou desenvolver melhor uma ideia ou tema, levantando hipóteses deixadas para estudos futuros.

A reprodutibilidade é um fator de extrema importância na pesquisa científica, segundo Pagani, Kovalski e Resende (2018), é necessário que pesquisadores cheguem às mesmas conclusões quando replicam um método científico. Mais do que uma revisão simples ou aleatória, a revisão sistemática segue padrões e etapas como aponta Gil (2019), e pode utilizar de métodos de análise multicritério dependendo de sua finalidade.

Existem diversas metodologias de revisão sistemática de literatura. Desde a década de 1970, autores vêm publicando suas metodologias, cada um atendendo a determinadas demandas (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2018). Com base nessa informação, a *Methodi Ordinatio* foi criada para auxiliar na qualificação de artigos acadêmicos. Essa metodologia leva em conta três fatores: ano de publicação, fator de impacto e número de citações (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015).

A *Methodi Ordinatio* se divide em 9 fases: estabelecer intenção de pesquisa; fazer pesquisa exploratória com as palavras-chaves nas bases de dados; definir e combinar palavras-chave nas bases de dados de interesse; realizar a pesquisa definitiva; filtrar os resultados; identificar o fator de impacto, número de citações e ano de publicação; classificar de acordo com a equação *InOrdinatio*; encontrar as publicações disponíveis em formato original e por fim, fazer a leitura sistemática (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015). As nove fases desta metodologia foram ilustradas na Figura 4:

Figura 4 – Fases da Methodi Ordinatio



Fonte: Pagani, Kovaleski e Resende (2018)

As nove etapas propostas por Pagani, Kovaleski e Resende (2018) foram seguidas no presente trabalho para gerar o portfólio de artigos presentes no Apêndice A, feito isso, foi determinado quais análises seriam feitas para gerar as discussões e resultados.

3.1 DEFINIÇÃO DO TEMA E PALAVRAS-CHAVE

Antes de realizar a pesquisa sistemática propriamente dita, foi necessário um estudo prévio a fim de escolher o melhor caminho a ser traçado, quais bases de dados utilizar, como pesquisar, quais seriam as macro e micro áreas e quais palavras-chave usar. Nesse passo, inicialmente foram lidos materiais de diversas fontes, obtidas aleatoriamente, a respeito de *Smart Cities*. A partir disso, optou-se por pesquisar de forma aprofundada a respeito de piezoelétricos, mais especificamente em termos de geração de energia dentro de uma *Smart City*. Para isso, foram elaboradas pesquisas exploratórias nas bases de dados *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*, utilizando a combinação de palavras-chave: “*Piezoelectric* AND energy*”, escolhidas pois,

segundo Pagani, Kovaleski e Resende (2018) são uma rica fonte com acesso disponível à materiais da área de engenharia. Foram lidos os 10 resultados mais recentes e os 10 mais relevantes de acordo com a classificação de cada base e assim, foi possível fazer mais combinações de palavras-chave.

3.2 REALIZAÇÃO DA PESQUISA

Feita a pesquisa preliminar, entrou-se nas bases de dados para exportar todos os resultados em formato *BibTex* para o gerenciador de referências *JabRef*. Segundo Pagani, Kovaleski e Resende (2015) essa fase é importante para gerar um portfólio, eliminar as duplicatas e exportar para uma planilha eletrônica nos próximos passos. Para essa etapa se utilizou das combinações de palavras-chave descritas no Quadro 1.

Quadro 1: Combinações de Palavras-Chave para análise

| Nº da combinação* | Combinações |
|-------------------|-------------------------------------|
| 1 | "piezoelectric*" AND "smart cities" |
| 2 | "piezoelectric*" AND "park*" |
| 3 | "piezoelectric*" AND sustainability |
| 4 | "piezoelectric*" AND "solar energy" |
| 5 | "piezoelectric*" AND "green energy" |

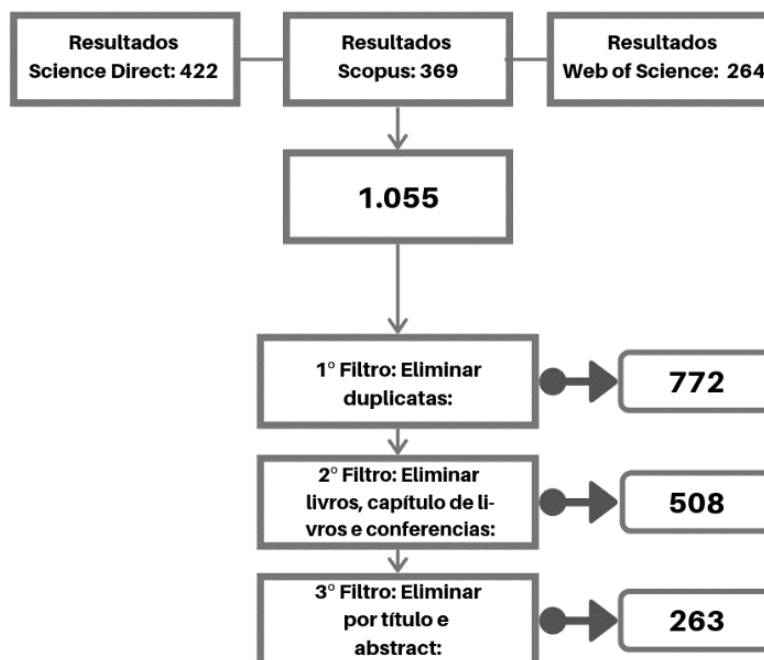
Fonte: Autoria Própria (2021)

Foram também utilizadas outras palavras-chave, mas estas foram descartadas uma vez que eram muito amplas e traziam milhares de resultados, dificultando a análise ou eram irrelevantes trazendo pouquíssimos ou até mesmo nenhum resultado.

3.3 PROCEDIMENTOS DE FILTRAGEM

Foi necessário reduzir os 1.055 artigos obtidos até essa fase, permitindo a realização da leitura sistemática. Para isso, foram utilizados 3 filtros: Eliminar duplicatas, eliminar livros, capítulos de livros e trabalhos de conferência, e eliminar artigos não relacionados com a temática, por meio da leitura do título e resumo. A Figura 5 ilustra o processo de filtragem:

Figura 5 – Passo a passo da fase de aplicação de filtros



Fonte: Autoria própria (2021)

Após o processo de filtragem, foram exportados os resultados para uma planilha eletrônica para realizar os passos seguintes.

3.4 IDENTIFICAR O FATOR DE IMPACTO, NÚMERO DE CITAÇÕES E ANO DE PUBLICAÇÃO

O intuito deste passo é colher informações necessárias para a aplicação da equação InOrdinatio, que permite ordenar o portfólio em relevância científica. Para coletar o número de citação dos artigos, Google Acadêmico (<https://scholar.google.com>) foi utilizado. Já para o Fator de Impacto a métrica escolhida foi JCR de 2018, por ser a métrica prevalente entre os artigos do portfólio. Por fim, a informação do Ano de Publicação conta nos próprios artigos.

3.4.1 Ordenação Segundo a Equação InOrdinatio

Essa fase tem como objetivo ordenar o portfólio de artigos, seguindo os critérios da Methodi Ordinatio. A equação InOrdinatio (1) é dada por:

$$\text{InOrdinatio} = (\text{IF}/1000) + \alpha \times [10 - (\text{AnoPesq} - \text{AnoPub})] + (\text{Ci}) \quad (1)$$

Onde: IF é o fator de impacto, α é um peso de 0 a 10 escolhido pelo pesquisador de acordo com a relevância que ele dá ao ano da publicação, AnoPesq é o ano em que a pesquisa está sendo feita pelo pesquisador, AnoPub é o ano de publicação da obra utilizada e Ci é o número de citações do artigo em questão (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015). Neste trabalho, o α escolhido foi um valor igual a 10, dado que se trata de um tema bastante atual e o ano de pesquisa foi 2019.

Aplicada à equação para o portfólio de artigos, obteve-se o portfólio mostrado no Apêndice A, ordenado por relevância científica.

3.4.2 Encontrar as Publicações e Realizar a Leitura Sistemática

Finalizando a metodologia *Methodi Ordinatio*, foi feita a localização dos 50 primeiros artigos no Google Acadêmico (<https://scholar.google.com>) e feito o *download* dos disponíveis gratuitamente, para que assim fosse possível realizar a leitura sistemática, sendo a fundação para o referencial teórico.

3.5 DEFINIÇÃO DE PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE

Para analisar os artigos à ponto de poder gerar discussão e elucidar resultados, optou-se por dois tipos de análises: Análise de Portfólio e Análise de Conteúdo. Na Análise de Portfólio, com as combinações de palavras-chave descritas no quadro um, baixou-se informações e gráficos direto das bases de dados sobre essas obras, agrupando as informações mais relevantes. Nessa etapa utilizou-se apenas as bases Scopus e Web of Science, uma vez que os dados apresentados nessas duas bases eram mais padronizados de forma à poder comparar ambas. Os dados obtidos na base Science Direct foram utilizados para o referencial teórico.

Utilizou-se do *software* Microsoft Office Excel para gerar tabelas agrupando informações sobre os artigos, possibilitando análises qualitativa e quantitativa, além de poder gerar gráficos facilitando o entendimento. Por fim utilizou-se de quadros e tabelas para correlacionar as definições de *Smart City* com os benefícios e características de piezoelétricos.

Após a entrega do projeto de Trabalho de Conclusão de Curso 1, no dia 02 de dezembro de 2019, iniciou-se a coleta de dados e análise, compreendidas por: desenvolvimento, discussão e resultados e considerações finais. Nesta etapa:

- Analisou-se o conteúdo dos artigos;
- Agrupou-se informações relevantes para elaboração de gráficos e tabelas através de *softwares* como Microsoft Office Excel e VOSViewer;
- Analisou-se as informações disponíveis nas bases de dados com a busca das palavras-chave;
- Realizou-se a discussão e elucidação dos fatos.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A realização dos procedimentos metodológicos possibilitou o armazenamento de informações importantes sobre as áreas de conhecimentos das publicações, os países de atuação e seus autores. Os resultados serão apresentados em duas etapas. A primeira etapa, a análise de portfólio, que busca dados bibliométricos e quantitativos e na segunda etapa a análise de conteúdo de forma qualitativa.

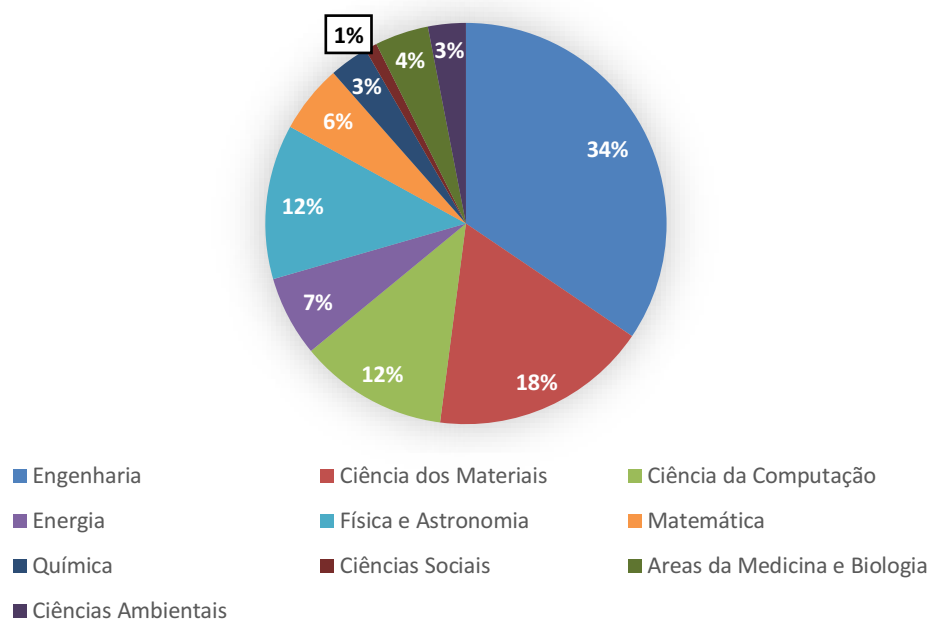
4.1 ANÁLISE DE PORTFÓLIO

Nesta seção, serão analisados os resultados das buscas provenientes das bases de dados Scopus e Web of Science, bem como a elucidação dos fatos. Sendo assim, foram analisadas apenas as publicações destas duas bases de dados em questão, devido às ferramentas dos próprios *sites* que possibilitavam o feito.

4.1.1 Áreas Do Conhecimento

Dado que os tópicos abordados tratam de temas envolvendo piezoelétricos, sustentabilidade, energia, desenvolvimento, *Smart City*, entre outros, e que as bases de dados utilizadas foram escolhidas por serem um acervo rico em materiais de engenharia, já era esperado que as principais áreas do conhecimento apontadas pela análise de resultados seriam envolvendo as engenharias e ciências exatas. Utilizando a soma de todos os materiais com cada uma das combinações de palavras-chave na base de dados *Scopus*, pode-se elaborar o Gráfico 2, mostrando o percentual dos resultados de acordo com as áreas do conhecimento.

Gráfico 2 – Publicações por Áreas do Conhecimento: Scopus

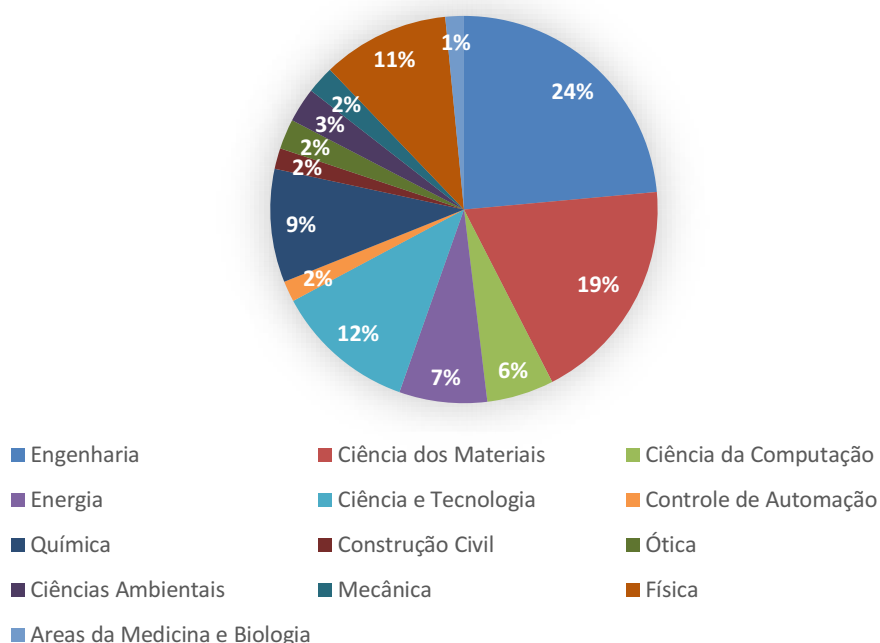


Fonte: Autoria própria (2021)

Como já esperado, a maior quantidade de publicações é relacionada às engenharias. Ademais, há também um número elevado da área de Ciência dos Materiais, devido aos estudos relacionados às propriedades do piezoelétrico, sua estrutura e obtenção. Não menos importante, vale notar que apesar de um percentual pequeno, foram obtidos resultados nas áreas das ciências sociais, medicina e biologia, mostrando a versatilidade das relações com piezoelétrico.

Com a mesma premissa do gráfico anterior, pode-se elaborar o Gráfico 3, com a diferença que a base de dados utilizada foi a *Web of Science*.

Gráfico 3 – Publicações por Áreas do Conhecimento: *Web of Science*



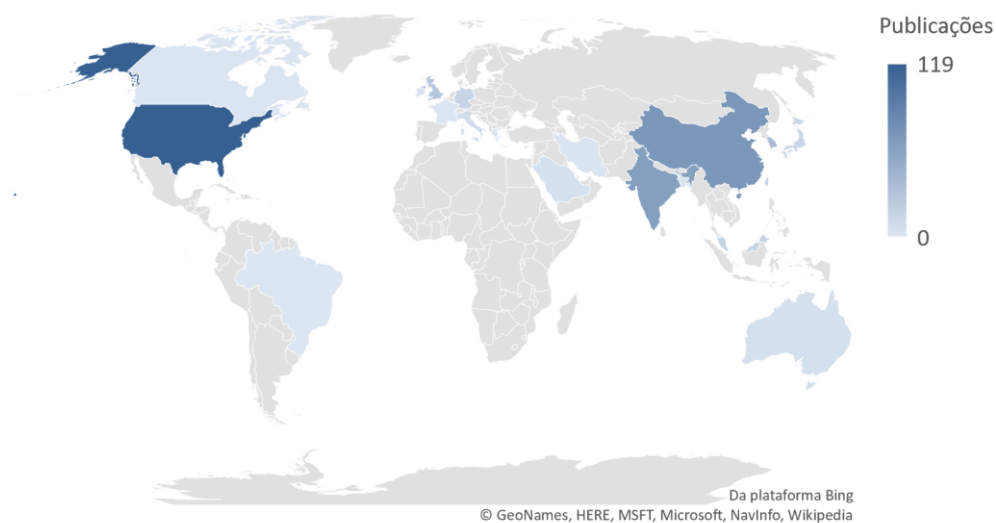
Fonte: Autoria própria (2021)

Os maiores resultados ainda se dão nas áreas das Engenharias e Ciência dos Materiais, a principal diferença entre as decorrências das duas bases de dados se dá na diversidade de áreas apresentadas em cada uma delas. A base de dados *Web of Science*, apesar de demonstrar um menor número de resultados brutos, mostrou uma maior diversidade de áreas.

4.1.2 Países De Atuação

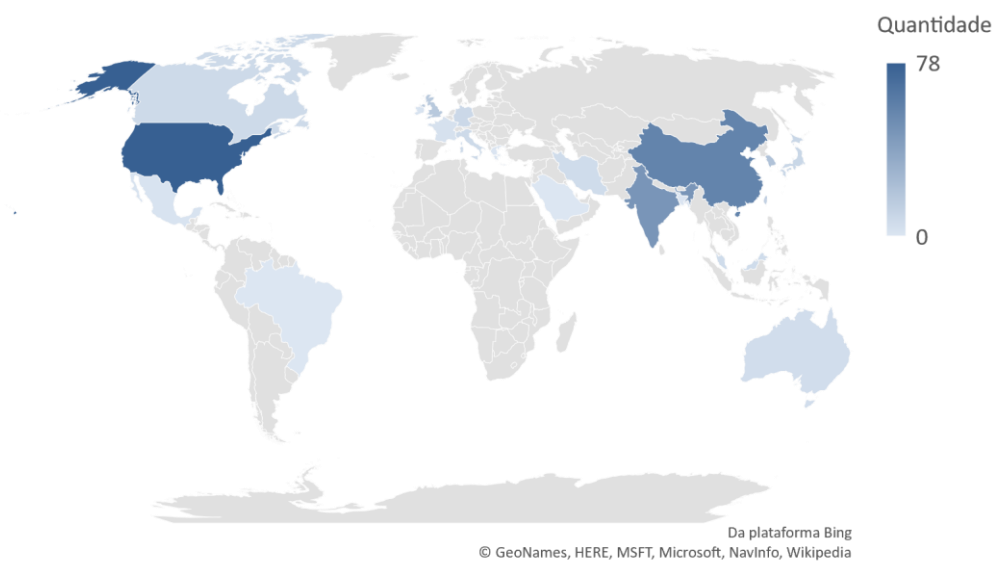
Nesse tópico, é possível identificar quais são os países com os maiores números de publicações sobre os temas. Além disso, foi possível realizar comparações entre os resultados obtidos nas duas bases de dados, a fim de saber se apresentam diferenças significativas.

A Figura 6 é um mapa *mundi* gerado pelo *software* Microsoft Office Excel, mostrando em destaque os países com maior percentual de resultados obtidos na base de dados Scopus.

Figura 6 – Número de publicações por país: Scopus

Fonte: Autoria própria (2021)

A maior concentração de resultados encontra-se nos Estados Unidos da América (119), seguido por China (70) e Índia (63). Em termos continentais, o maior número de publicações encontra-se na Ásia. Já a Figura 7 mostra um mapa *mundi* gerado pelo *software* Microsoft Office Excel, com destaque nos países com maior percentual de resultados obtidos na base de dados Web of Science.

Figura 7 – Número de publicações por país: Web of Science

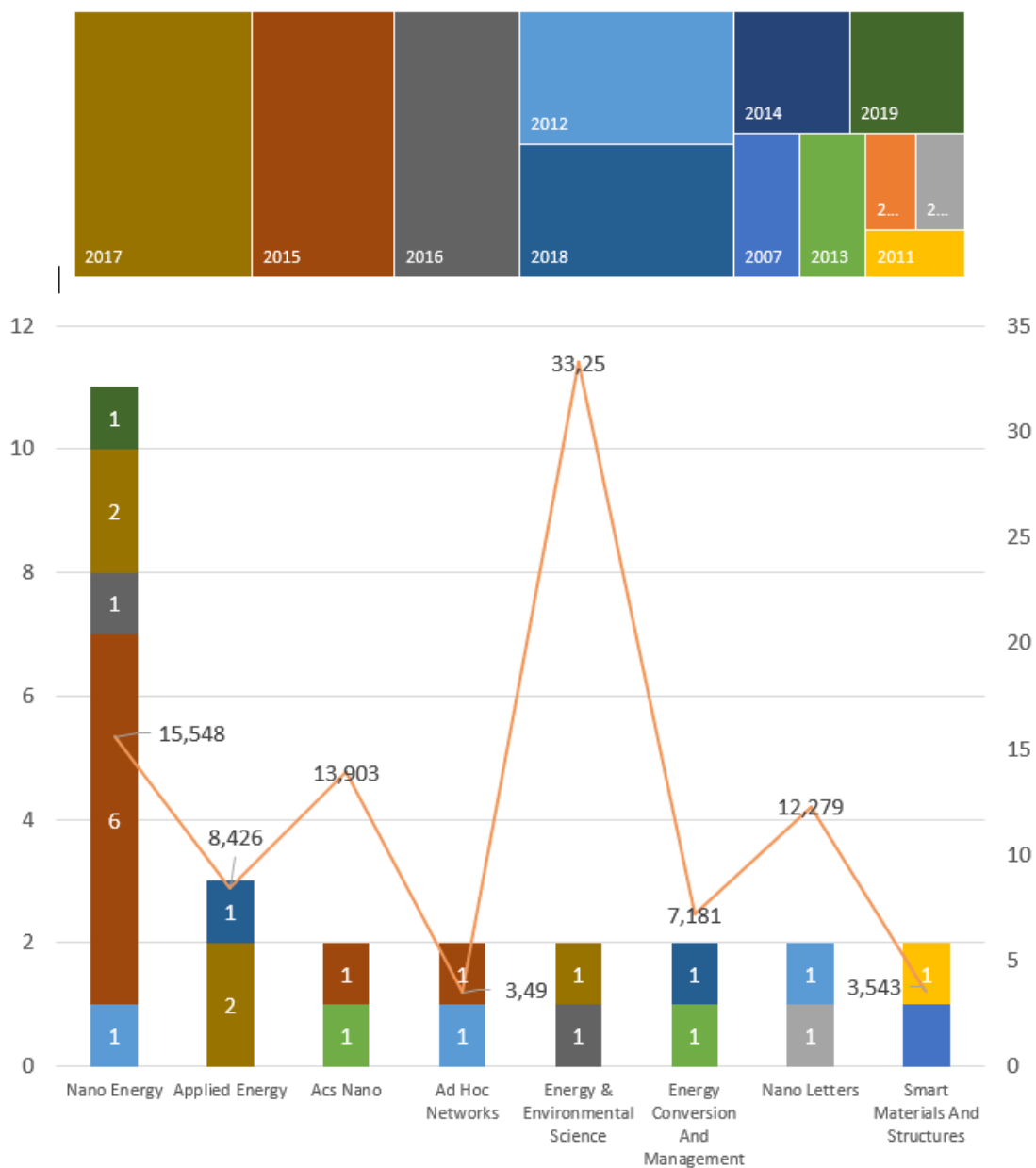
Fonte: Autoria própria (2021)

Apesar de uma menor quantidade de resultados em comparação com Scopus, a base Web of Science continua mostrando os Estados Unidos da América com a maior concentração de publicações (78), seguido por China (57) e Índia (47), porém aqui a diferença entre estes 3 países é menor.

4.1.3 Principais Revistas do Portfólio

A Figura 8 apresenta um gráfico da quantidade de publicações por ano e o Fator de Impacto dos periódicos que tiveram mais de dois artigos considerado neste estudo, também exibe a quantidade de artigos por ano.

Figura 8 – Publicações por ano e Fator de Impacto

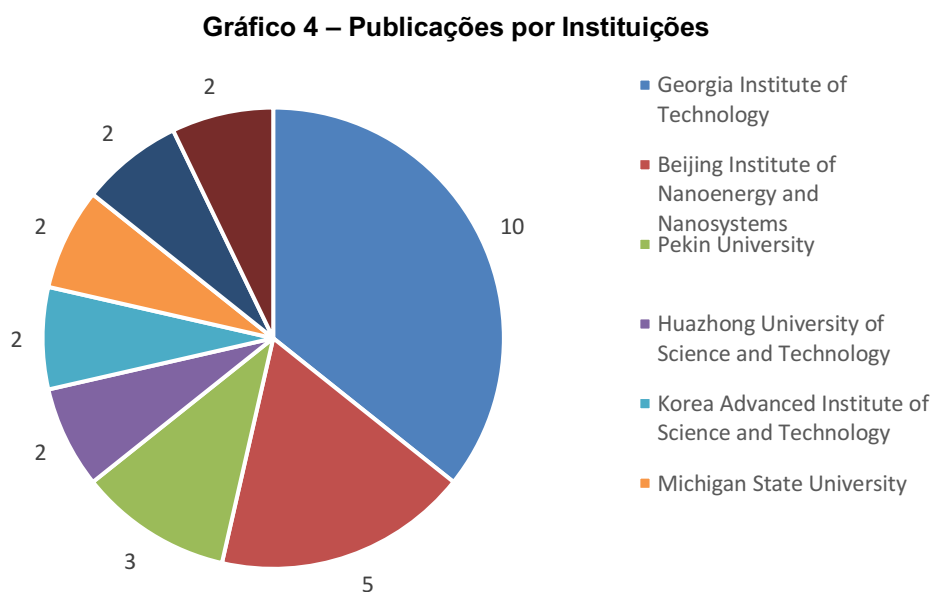


Fonte: Autoria própria (2021)

As revistas com mais artigos foram a Nano Energy com 11 publicações e a Applied Energy com 3 artigos. Já a de maior prestígio foi a Energy & Environmental Science, que tem o Fator de Impacto 33,25 mostrando que esse tema é de interesse e relevância científica

4.1.4 Instituições

Pesquisadores ligados a inúmeras instituições produzem artigos científicos sobre piezoelétricos, *Smart Cities*, internet das coisas, geração de energia e áreas correlatas. As instituições que estiveram presentes em pelo menos 2 artigos dentre os 50 primeiros do ranking adotado pelo atual estudo são mostradas no Gráfico 4.



Fonte: Autoria própria (2021)

O Instituto de Tecnologia da Geórgia (*Georgia Institute of Technology*, em tradução livre) lidera entre as instituições com publicações acerca de piezoelétricos, contendo 10 artigos do total de 50, ou seja, 20% dos artigos do portfólio foram realizados nessa instituição, seguida por *Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems* com um total de 5 artigos, contabilizando 10% do total. Por fim, as instituições que não estão ilustradas no Gráfico 4, não apresentam mais do que uma obra cada, somando todas juntas 22 publicações.

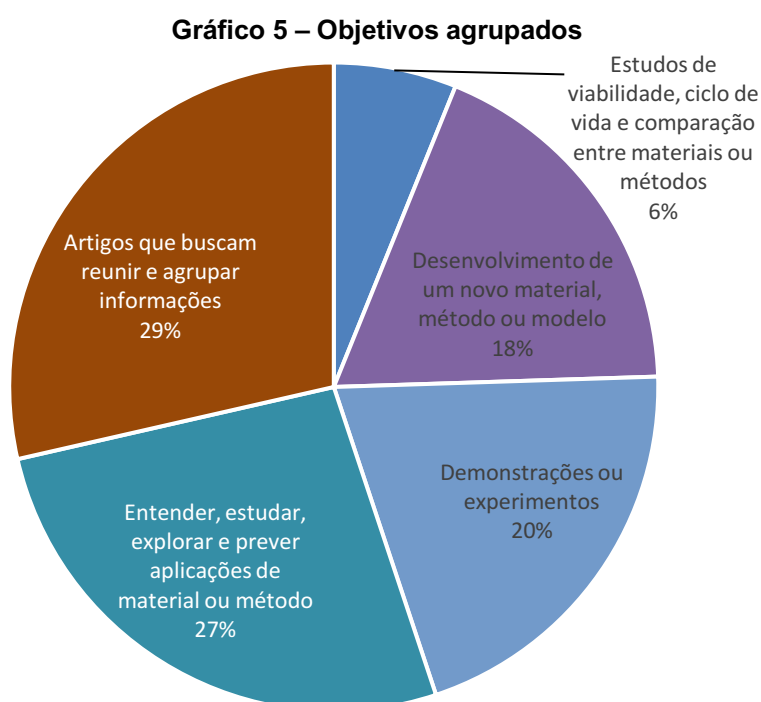
4.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO

Nesta seção será mostrado o tratamento dos resultados obtidos através da análise do conteúdo dos artigos e agrupamento das informações importantes. Para

esta etapa, restringiu-se aos 50 primeiros artigos do *ranking da Methodi Ordinatio* e foi possível gerar gráficos mostrando os objetivos dos artigos, as metodologias, os materiais, e os problemas e soluções encontrados.

4.2.2 Objetivos dos artigos

Cada artigo apresenta seu objetivo, como demonstrar um material através de um experimento ou reunir informações sobre determinado tema. A partir das análises dos objetivos dos artigos do portfólio, foi possível agrupar as obras em cinco grupos principais de acordo com as similaridades dos objetivos. O resultado obtido foi, conforme ilustrado no Gráfico 5.

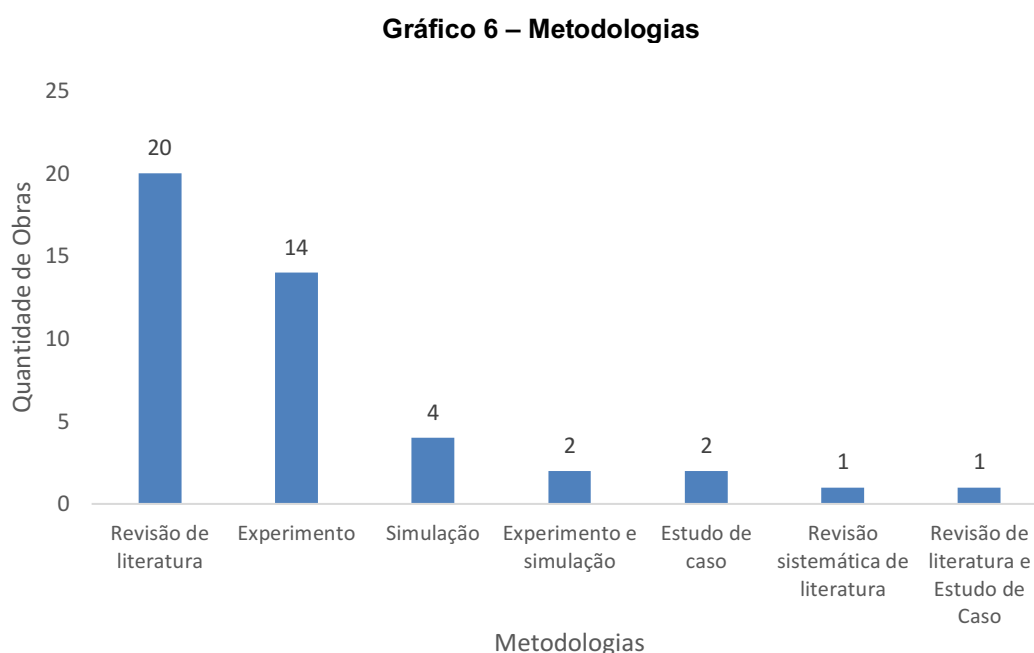


Fonte: Autoria própria (2021)

A maioria dos artigos selecionados (29%) tem como objetivo reunir e agrupar informações sobre materiais piezoelétricos, coleta de energia e *smart cities*, enquanto apenas 6% tem por objetivo estudar a viabilidade, ciclo de vida ou comparar materiais ou métodos.

4.2.3 Metodologias Empregadas

Outra informação importante coletada nos artigos é a metodologia empregada. Assim, as metodologias empregadas foram, conforme Gráfico 6.



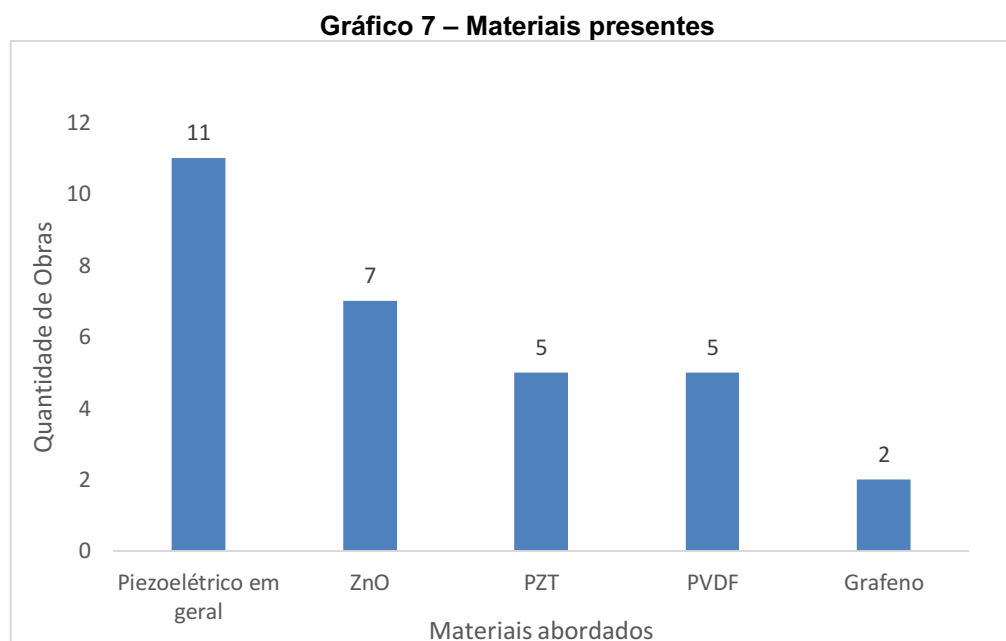
Fonte: Autoria própria (2021)

O Gráfico 6 mostra que a maioria dos artigos são revisões de literatura simples, e apenas uma revisão sistemática de literatura. O grande número de revisões de literatura está diretamente relacionado com as demonstrações do Gráfico 5, coincidindo com o objetivo “reunir e agrupar informações”. Experimentos também são muito frequentes, também aplicado em conjunto com simulação. Isso se deve principalmente pelo fato de que a maioria dos pesquisadores são das áreas das engenharias e ciência dos materiais, nas quais estes tópicos são bastante abordados.

4.2.4 Materiais Citados no Portfólio

Existem inúmeros tipos de piezoelétricos. Alguns autores tratam de um material em específico, outros de mais de um tipo, abordando piezoelétricos em geral, e há aqueles que tratam de outros materiais. Neste subtópico é possível conhecer o

que vem sendo estudado e quais dos tipos de piezoelétrico são mais comuns na literatura.

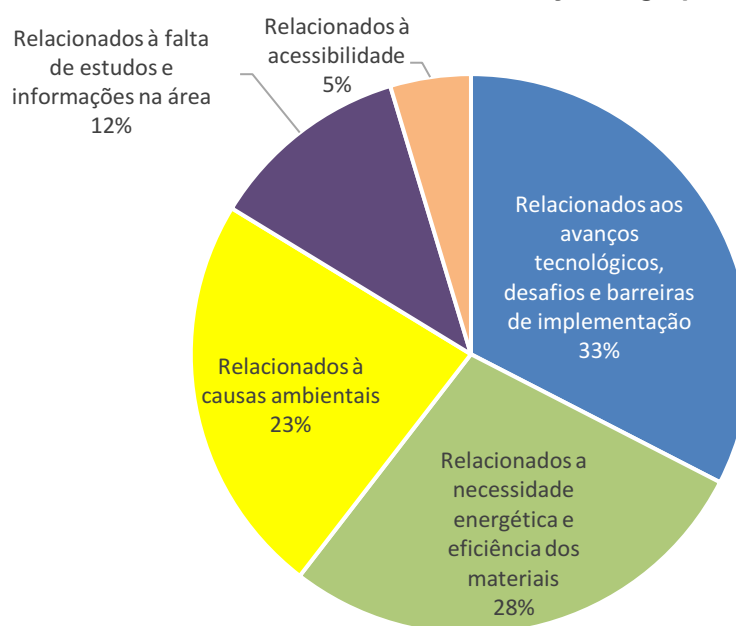


Fonte: Autoria própria (2021)

Conforme observado no Gráfico 7, grande parte dos artigos trata de mais de um tipo de piezoelétrico, sendo agrupados como “piezoelétrico em geral”. Na sequência, os materiais mais recorrentes no portfólio foram o ZnO, o PZT e o PVDF. Os demais materiais abordados foram mencionados somente em um artigo cada, não sendo ilustrados no Gráfico 7. Mais de 20% dos artigos abordam mais de um tipo de piezoelétrico, fazem comparações, discorrem sobre o tema de maneira ampla, enquanto uma minoria traz abordagens mais específicas.

4.2.5 Problemas e Soluções

A identificação de problemas e soluções dos artigos foi feita de duas formas: aqueles explicitamente especificados pelo autor, ou por meio do problema de partida dos artigos. Classificados os problemas e suas respectivas soluções, estes foram agrupados em 4 grupos maiores, demonstrados no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Problemas e Soluções Agrupados

Fonte: Autoria própria (2021)

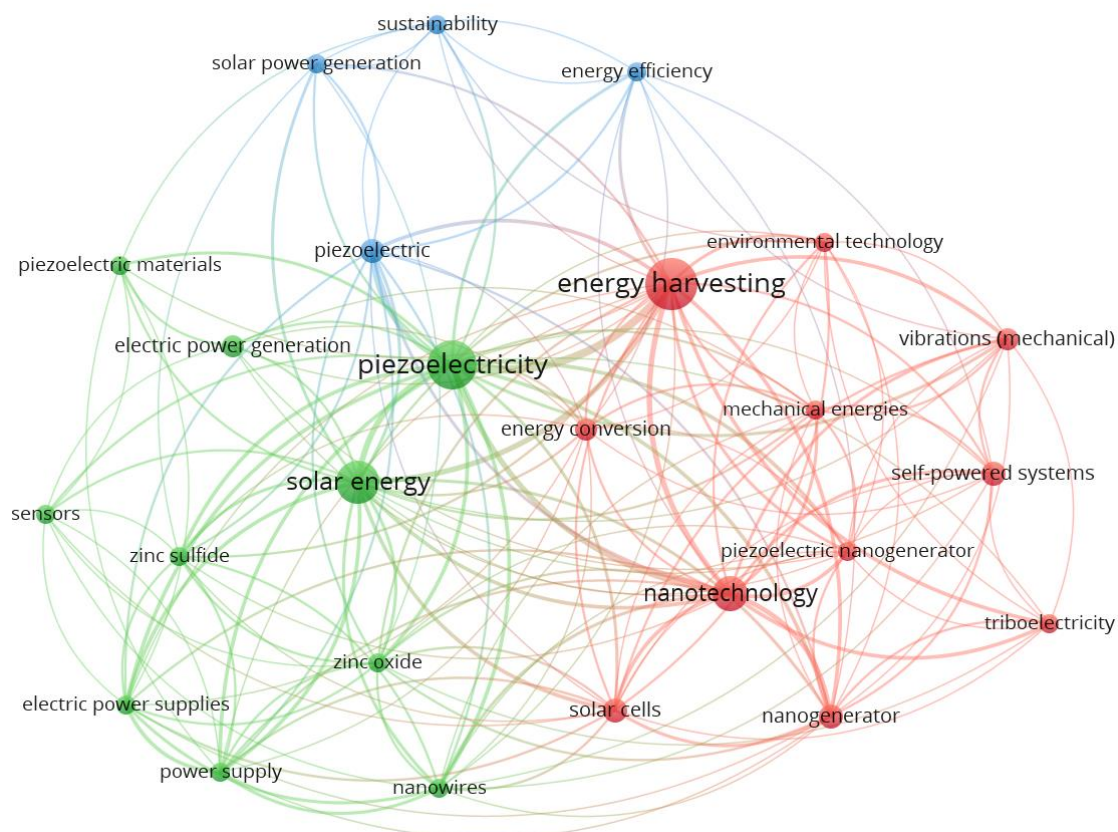
Em 5 dos 50 artigos selecionados não foi possível obter informações sobre problemas e soluções, assim o Gráfico 8 demonstra os dados de 45 artigos. Diversos trabalhos são relatórios de novas descobertas envolvendo piezoelétricos e piezo eletrônicos, isso justifica mais de 30% dos artigos terem problemas e soluções relacionadas aos avanços tecnológicos, desafios e barreiras de implementação. Além disso, observa-se também que a acessibilidade foi levada em consideração nos estudos, porém em menores números.

4.3 DISCUSSÕES

Limitando-se aos 50 primeiros artigos do *ranking InOrdinatio*, e fazendo uma análise cronológica, observa-se certo padrão. Na primeira década do século XXI, as publicações são mais voltadas à coleta de energia com os materiais piezoelétricos. À medida que os anos vão passando, começam a surgir temas envolvendo métodos de coleta de energia, utilizando nanotecnologia e métodos híbridos. O avanço da tecnologia propiciou a exploração dessas áreas de estudo, de forma que em mais de um artigo fica claro que a nanotecnologia e a hibridização de métodos otimizam a coleta de energia.

Com o intuito de verificar o contexto do portfólio de artigos, foi realizada a análise de ocorrência de palavras-chave no portfólio. A Figura 9 ilustra as redes de co-ocorrência de palavras-chave para os 50 artigos, por meio do mapa de redes do *software* VOSviewer.

Figura 9 – Mapa de Palavras: Títulos



Fonte: Autoria própria (2021)

Foram consideradas palavras-chave com quatro ou mais ocorrências para a elaboração da rede de palavras-chave, que resultou em três *clusters*. As palavras-chave mais frequentes foram *energy harvesting*, mencionada em 22 artigos do portfólio, ou seja, abordada em cerca de 44% do portfólio, *piezoelectricity*, mencionada em 20 artigos, *solar energy*, mencionada em 16 artigos e *nanogenerator*, mencionada em 11.

O Portfólio apresenta palavras-chave com ênfase em tipo de tecnologias sustentáveis e energia renovável. Isso demonstra um foco em pesquisas voltadas ao desenvolvimento sustentável e com preocupação ambiental.

Em relação as análises realizadas, verificou-se que grande parte das publicações, também as mais significativas, ocorreram nos Estados Unidos da América, seguido por China e Coréia do Sul, conforme ilustrado no Gráfico 4, que mostra as instituições com maior recorrência nos artigos e são localizadas nesses mesmos países. Ainda sobre as publicações, o Gráfico 7 demonstra que a maioria dos artigos abordam vários tipos de piezoelétricos ao decorrer do estudo, isso se deve ao fato da maioria dos artigos serem revisões de literatura, e por isso agrupam e reúnem diversas informações sobre vários tipos de materiais, traçam comparações e especificam seu uso.

O estudo sobre piezoelétricos é uma área promissora. Mesmo que Lee, Gupta e Kim (2015) relatem que sua eficiência é baixa se tratando de geração de energia, os mesmos mostram que a combinação de diferentes formas de captação e geração em um único dispositivo híbrido é capaz de amenizar ou até sanar este problema. A relação direta entre materiais piezoelétricos e *Smart Cities*, proposta por que Lee, Gupta e Kim (2015), é vista em apenas alguns artigos. Nesse sentido, piezoelétricos são uma alternativa de energia verde, corroborando tanto o que se preza para o desenvolvimento sustentável, quanto auxiliando no desenvolvimento das *Smart Cities* sustentáveis, uma vez que substitui o uso de combustíveis fósseis. Porém, o emprego destes materiais pode ser ainda mais variado no processo de tornar uma cidade comum em uma cidade inteligente, no sentido de proporcionar maior sustentabilidade energética utilizando-se de tecnologias avançadas.

Para pequenos sensores, o piezoelétrico pode dispensar o uso de baterias, já para outros casos, pode fazer com que a autonomia da bateria se torne muito maior, dessa forma, oportuniza o uso de tecnologias sem fio (ANTON; SODANO, 2007). De semelhante modo, Maiti et al. (2019) abordam o problema do lixo eletrônico gerado e estudam o uso de materiais biodegradáveis e naturais com emprego para piezoletrecidade.

Em termos de benefícios do uso do piezoelétrico, podemos enfatizar também a diminuição da poluição visual e sonora em comparação a outros métodos de geração de energia. Enquanto um gerador eólico altera a paisagem à sua volta e gera um nível elevado de ruído, o piezoelétrico pode ser empregado conforme cita Wang, Jasim e Chen (2018) em pavimentos, calçadas, hastes e outros lugares sem gerar ruídos e até mesmo sem modificar demasiadamente a paisagem visual em sua volta.

Entendendo a definição de uma *Smart City* e suas diretrizes e comparando-as com a proposta e utilização dos materiais piezoelétricos, é possível definir a relação entre os dois temas, conforme Quadro 2.

Quadro 2: Correlação entre diretrizes de *Smart City* com as aplicações do Piezoelétrico

| Diretrizes de uma <i>Smart City</i> | Aplicação do Piezoelétrico |
|--|---|
| Sustentabilidade | Não é combustível fóssil (LEE et al, 2016) Energia Limpa (ORREGO et al, 2017) Reaproveitamento de energia (AHMED et al, 2019) |
| Conforto à população | Redução ou não utilização de baterias (LEE et al, 2016) Sensores de monitoramento (AHMAD et al, 2016) |
| Urbanismo | Redução de poluição visual e sonora (WANG, JASIN e CHEN, 2018) Otimização do uso de espaços públicos (SEOL et al, 2015) |
| Saúde | Maior integração e monitoramento (ALAVI et al, 2018) Próteses (HANNAN et al, 2014) |
| Fatores econômicos | Redução de custos de energia (FERREIRA, 2017) Otimização da captação de energia (AHMED et al, 2019) |

Fonte: Autoria Própria (2021)

Mesmo que grande parte dos autores não cite especificamente o uso de piezoelétricos em *Smart Cities*, é possível observar essa relação no Quadro 2.

É importante salientar que o piezoelétrico sozinho, como fonte de energia principal e independente, se mostra uma opção bastante onerosa e de baixa capacidade de produção de energia elétrica em comparação com outros métodos, como por exemplo painéis fotovoltaicos (WANGH, JASIN e CHEN, 2018). Esse é um dos motivos pelo qual é comum vê-lo combinado à um painel fotovoltaico flexível, ou outros sistemas.

A principal vantagem do uso dos materiais piezoelétricos está na possibilidade de fácil combinação com outros meios de captação e geração, tornando o sistema híbrido e otimizando o aproveitamento da energia. Este procedimento reduz custos e também propicia uma menor demanda de uso de baterias, garantindo a sustentabilidade (LEE et al, 2015).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando se fala de energia limpa e sustentável logo se pensa em energia solar e eólica. Este trabalho mostra que existem mais formas de captação e geração de energia verde, além de expandir os horizontes do emprego dos materiais piezoelétricos.

Através da análise da revisão sistemática foi possível realizar a correlação do uso de materiais piezoelétricos com as definições e requisitos de uma *Smart City*, mostrando que eles podem ser usados para propiciar tecnologias sem fio e sem bateria (autoalimentáveis), além de servir para incorporar tecnologias de captação de energia híbrida, combinados com métodos térmicos, eólicos ou fotovoltaicos, otimizando a coleta de energia. Por isso, estes materiais contribuem com o urbanismo, a sustentabilidade, o monitoramento em tempo real, em áreas da saúde, com o conforto da população, com a mobilidade urbana, e em inúmeras outras áreas que ajudam a tornar uma cidade mais inteligente.

Levando-se em conta o que foi observado na análise das palavras-chave nas bases de dados e o conteúdo das publicações, vemos que é um tema multidisciplinar e que países emergentes estão se destacando nessa área de pesquisa. Porém, o Brasil não tem grandes contribuições com este tema, sendo um desafio aos pesquisadores brasileiros conquistar espaço em revistas de alto fator de impacto.

Em vista do que foi apresentado afirma-se que os objetivos do presente trabalho foram atendidos, além de formar um portfólio riquíssimo para auxiliar trabalhos e projetos futuros, contribuindo com a ciência e sociedade.

5.1 CONTRIBUIÇÕES DO ARTIGO

Este trabalho tem potencial de gerar impacto na sociedade trazendo à discussão o tema e contribuindo com a ciência dentro da linha de pesquisa sobre geração de e métodos alternativos de obtenção de energia. O presente estudo também pôde elucidar fatos ao ter analisado as obras qualitativa e quantitativamente, seguindo uma metodologia eficaz. Dessa forma contribui não só à ciência, mas também a indústria, sociedade e meio ambiente, uma vez explorando meios de obtenção de energia mais sustentável.

5.2 LIMITAÇÕES

Uma vez que foi uma revisão sistemática de literatura, esta obra se esbarrou em várias limitações, seja pela própria delimitação do trabalho ou especificação na linha de pesquisa.

- Limitou-se aos primeiros 50 artigos do *ranking* do portfólio;
- Os materiais piezoelétricos possuem outras aplicações que podem ser exploradas a partir de estudos com outras finalidades;
- Focou-se o estudo em linhas de pesquisa relacionadas às áreas e sub áreas da Engenharia de Produção.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se estudos de viabilidade econômica, analisando os custos de implantação de materiais piezoelétricos, capacidade de geração e tempo de retorno sobre o investimento. Modelos de energia híbrida foram muito presentes entre os artigos analisados, então também poderia ser comparado um modelo híbrido com um simples para detalhar os ganhos em relação de um ao outro.

Além do aspecto econômico, sugere-se também a análise de ciclo de vida e rastro ambiental desses materiais, para comprovar se de fato pode ser considerado um modelo de energia verde e sustentável, evidenciando suas vantagens e desvantagens e comparando-as com outros métodos de geração e obtenção de energia. E não menos importante, analisar os aspectos e impactos sociais e como isso poderia influenciar no estilo de vida das pessoas.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Muhammad Waseem et al. Building energy metering and environmental monitoring—A state-of-the-art review and directions for future research. *Energy and Buildings*, v. 120, p. 85-102, 2016.

AHMED, Abdelsalam et al. Environmental life cycle assessment and techno-economic analysis of triboelectric nanogenerators. ***Energy & Environmental Science***, v. 10, n. 3, p. 653-671, 2017.

AHMED, Rahate et al. Development of a Tree-Shaped Hybrid Nanogenerator Using Flexible Sheets of Photovoltaic and Piezoelectric Films. ***Energies***, v. 12, n. 2, p. 229, 2019.

ALAVI, Amir H. et al. Internet of Things-enabled smart cities: State-of-the-art and future trends. ***Measurement***, v. 129, p. 589-606, 2018.

AL-TURJMAN, Fadi; MALEKLOO, Arman. Smart parking in IoT-enabled cities: A survey. ***Sustainable Cities and Society***, p. 101608, 2019.

ALVI, Sheeraz A. et al. Internet of multimedia things: Vision and challenges. ***Ad Hoc Networks***, v. 33, p. 87-111, 2015.

ANTON, Steven R.; SODANO, Henry A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). ***Smart materials and Structures***, v. 16, n. 3, p. R1, 2007.

Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO). A profissão: Saiba mais sobre a Engenharia de Produção. Disponível em <<http://portal.abepro.org.br/a-profissao/#1521896886728-954b63bc-a756>>. Acesso em agosto, 2019

BRUNDTLAND, Gro Harlem. Our common future—Call for action. ***Environmental Conservation***, v. 14, n. 4, p. 291-294, 1987.

CAO, Yangsen et al. Energy output of piezoelectric transducers and pavements under simulated traffic load. ***Journal of Cleaner Production***, p. 123508, 2020.

CARAGLIU, Andrea; DEL BO, Chiara; NIJKAMP, Peter. Smart cities in Europe. **Journal of urban technology**, v. 18, n. 2, p. 65-82, 2011.

CHAN, Marie et al. A review of smart homes—Present state and future challenges. **Computer methods and programs in biomedicine**, v. 91, n. 1, p. 55-81, 2008.

CHEN, Xuexian et al. Flexible fiber-based hybrid nanogenerator for biomechanical energy harvesting and physiological monitoring. **Nano Energy**, v. 38, p. 43-50, 2017.

CRAMM, Joel et al. Investigating the feasibility of implementing Pavegen energy: harvesting piezoelectric floor tiles in the new SUB. 2011.

DE SOUSA, Laylson Carneiro et al. Estudo sobre o potencial de geração de energia elétrica para semáforos a partir de placas piezoelétricas na MA 006. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 3, n. 3, 2016.

FERREIRA, Luiz Fernando Suzarte Silva. Sistema de geração de energia via sensores piezoelétricos. 2018.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7ª Edição – São Paulo. Atlas. 2019

GLAVIČ, Peter; LUKMAN, Rebeka. Review of sustainability terms and their definitions. **Journal of cleaner production**, v. 15, n. 18, p. 1875-1885, 2007.

HAMLEHDAR, Maryam; KASAEIAN, Alibakhsh; SAFAEI, Mohammad Reza. Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: A critical review. **Renewable Energy**, 2019.

HANNAN, Mahammad A. et al. Energy harvesting for the implantable biomedical devices: issues and challenges. **Biomedical engineering online**, v. 13, n. 1, p. 79, 2014.

HANNAN, Mahammad A. et al. Energy harvesting for the implantable biomedical devices: issues and challenges. **Biomedical engineering online**, v. 13, n. 1, p. 79, 2014.

HYDER, Farhan; SUDHAKAR, K.; MAMAT, Rizalman. Solar PV tree design: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1079-1096, 2018.

IBN-MOHAMMED, Taofeeq et al. Integrated hybrid life cycle assessment and supply chain environmental profile evaluations of lead-based (lead zirconate titanate) versus lead-free (potassium sodium niobate) piezoelectric ceramics. **Energy & Environmental Science**, v. 9, n. 11, p. 3495-3520, 2016.

KATHPALIA, Bharat et al. Modeling and Characterization of a Curved Piezoelectric Energy Harvester for Smart Paver Tiles. **Procedia Computer Science**, v. 109, p. 1060-1066, 2017.

KUANG, Yang et al. Energy harvesting during human walking to power a wireless sensor node. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 254, p. 69-77, 2017.

LEE, Ju-Hyuck et al. All-in-one energy harvesting and storage devices. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 4, n. 21, p. 7983-7999, 2016.

LEE, Keun Young; GUPTA, Manoj Kumar; KIM, Sang-Woo. Transparent flexible stretchable piezoelectric and triboelectric nanogenerators for powering portable electronics. **Nano Energy**, v. 14, p. 139-160, 2015.

LEE, Seung Hyun et al. Self-powered flexible inorganic electronic system. **Nano Energy**, v. 14, p. 111-125, 2015.

LI, Xiaofeng; STREZOV, Vladimir. Modelling piezoelectric energy harvesting potential in an educational building. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 435-442, 2014.

MACKE, Janaina; SARATE, João Alberto Rubim; DE ATAYDE MOSCHEN, Suane. Smart sustainable cities evaluation and sense of community. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118103, 2019.

MIDILLI, Adnan; DINCER, Ibrahim; AY, Murat. Green energy strategies for sustainable development. **Energy Policy**, v. 34, n. 18, p. 3623-3633, 2006.

MUNARETTO, Lorimar Francisco; CORRÊA, Hamilton Luiz; DA CUNHA, Júlio Araújo Carneiro. Um estudo sobre as características do método Delphi e de grupo

focal, como técnicas na obtenção de dados em pesquisas exploratórias. **Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria**, v. 6, n. 1, p. 9-24, 2013.

Nações Unidas Brasil. 17 Objetivos para transformar nosso mundo. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em setembro, 2019.

ORREGO, Santiago et al. Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag. **Applied energy**, v. 194, p. 212-222, 2017.

PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; DE RESENDE, Luis Mauricio Martins. Avanços na composição da Methodi Ordinatio para revisão sistemática de literatura. **Ciência da Informação**, v. 46, n. 2, 2017.

PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; RESENDE, Luis Mauricio. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109-2135, 2015.

PAGANI, R. N.; SOARES, A. M.; da LUZ, A. A.; ZAMMAR, G.; KOVALESKI, J.L. On Smart Cities and Sustainable Development Goals. In: CONGRESSO LATINOIBEROAMERICANA DE GESTÃO DE TECNOLOGIA (ALTEC), 18., 2019, Medellín. Anais ... Medellín: 2019.

SAVI, Marcelo A., OLIVEIRA, Sergio. Os materiais inteligentes e suas aplicações. **ResearchGate**. 2013.

SEOL, Myeong-Lok et al. Vertically stacked thin triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting. **Nano Energy**, v. 14, p. 201-208, 2015.

SONG, Gyeong Ju et al. Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered walkway applications. **Applied Energy**, v. 256, p. 113916, 2019.

SONG, Yewon et al. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 29, p. 12563-12568, 2016.

WANG, Hao; JASIM, Abbas; CHEN, Xiaodan. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications—A comprehensive review. **Applied energy**, v. 212, p. 1083-1094, 2018.

WANG, Zhong Lin. Progress in piezotronics and piezo-phototronics. **Advanced Materials**, v. 24, n. 34, p. 4632-4646, 2012.

ZHAO, Xuejuan; XIANG, Hongjun; SHI, Zhifei. Piezoelectric energy harvesting from vehicles induced bending deformation in pavements considering the arrangement of harvesters. **Applied Mathematical Modelling**, v. 77, p. 327-340, 2020.

ZHU, Laipan et al. Piezo-Phototronic Effect Enhanced Flexible Solar Cells Based on n-ZnO/p-SnS Core–Shell Nanowire Array. **Advanced Science**, v. 4, n. 1, p. 1600185, 2017.

APÊNDICE A – Portfólio de Artigos

Portfólio de Artigos

| Ranking | Título do Artigo | Ano | País | Instituição ligada |
|---------|---|------|---------------------|--|
| 1 | <i>Internet of things: Vision, applications and research challenges</i> | 2012 | Itália | <i>Università degli Studi dell' Insubria</i> |
| 2 | <i>A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)</i> | 2007 | EUA | <i>Virginia Polytechnic Institute, State University, Blacksburg, Michigan Technological University</i> |
| 3 | <i>A review of smart homes— Present state and future challenges</i> | 2008 | França | <i>Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes, Université de Toulouse</i> |
| 4 | <i>Progress in piezotronics and piezo-phototronics</i> | 2012 | EUA | <i>Georgia Institute of Technology</i> |
| 5 | <i>Platform architecture for solar, thermal, and vibration energy combining with MPPT and single inductor</i> | 2012 | EUA | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| 6 | <i>Progress in nanogenerators for portable electronics</i> | 2012 | EUA | <i>Georgia Institute of Technology</i> |
| 7 | <i>Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps</i> | 2007 | EUA | <i>Michigan Technological University, Arizona State University, NanoSonic, Incorporated</i> |
| 8 | <i>Recent progress in piezoelectric nanogenerators as a sustainable power source in self-powered systems and active sensors</i> | 2015 | China e EUA | <i>Georgia Institute of Technology, Pekin University e Beijin Institute of Nanoenergy</i> |
| 9 | <i>Flexible hybrid energy cell for simultaneously harvesting thermal, mechanical, and solar energies</i> | 2013 | China e EUA | <i>Georgia Institute of Technology, Pekin University e Beijin Institute of Nanoenergy</i> |
| 10 | <i>Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research</i> | 2016 | Itália, Reino Unido | <i>Cardiff University</i> |
| 11 | <i>Energy harvesting for the implantable biomedical devices: Issues and challenges</i> | 2014 | Malásia, Iraque | <i>Universidade Nacional da Malásia, Universidade Tecnológica do Iraque</i> |

| | | | | |
|----|--|------|------------------------------|---|
| 12 | <i>All-in-one energy harvesting and storage devices</i> | 2016 | Coréia do Sul e Austrália | <i>Sungkyunkwan University, Institute for Superconducting and Electronic Materials (ISEM), Australian Institute for Innovative Materials (AIMM), University of Wollongong</i> |
| 13 | <i>VIKOR Technique: A Systematic Review of the State of the Art Literature on Methodologies and Applications</i> | 2016 | Malásia, Lituânia, Dinamarca | <i>Universiti Teknologi Malaysia, Vilnius Gediminas Technical University, University of Southern Denmark</i> |
| 14 | <i>Transparent flexible stretchable piezoelectric and triboelectric nanogenerators for powering portable electronics</i> | 2015 | Coréia do Sul | <i>School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University</i> |
| 15 | <i>Internet of multimedia things: Vision and challenges</i> | 2015 | Austrália, Paquistão, Itália | <i>Australian National University, University of Engineering and Technology, University of Cagliari,</i> |
| 16 | <i>Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag</i> | 2017 | EUA | <i>Johns Hopkins University, Florida State University</i> |
| 17 | <i>Enhanced Cu₂S/CdS Coaxial Nanowire Solar Cells by Piezo-Phototronic Effect</i> | 2012 | EUA | <i>Georgia Institute of Technology</i> |
| 18 | <i>Tetragonal CH₃NH₃PbI₃ is ferroelectric</i> | 2017 | Israel, EUA | <i>Weizmann Institute of Science, University of California</i> |
| 19 | <i>Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends</i> | 2017 | Espanha | <i>Polytechnic University of Madrid, IMDEA Materials Institute</i> |
| 20 | <i>Flexible fiber-based hybrid nanogenerator for biomechanical energy harvesting and physiological monitoring</i> | 2017 | China | <i>Peking University</i> |
| 21 | <i>Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review</i> | 2018 | EUA, Iraque | <i>Rutgers University, Al-Mustansiriyah University</i> |
| 22 | <i>Two-dimensional germanium monochalcogenides for photocatalytic water splitting with high carrier mobility</i> | 2017 | China | <i>Shandong University</i> |
| 23 | <i>Vertically stacked thin triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting</i> | 2015 | Coréia do Sul | <i>Korea Advanced Institute of Science and Technology</i> |

| | | | | |
|----|---|------|---|---|
| 24 | <i>Piezo-Phototronic Effect Enhanced Flexible Solar Cells Based on n-ZnO/p-SnS Core-Shell Nanowire Array</i> | 2017 | China e EUA | <i>Georgia Institute of Technology, Pekin University, Beijin Institute of Nanoenergy, Chinese academy of sciences</i> |
| 25 | <i>Self-powered flexible inorganic electronic system</i> | 2014 | Coréia do Sul | <i>Korea Advanced Institute of Science and Technology</i> |
| 26 | <i>Underwater thrust and power generation using flexible piezoelectric composites: An experimental investigation toward self-powered swimmer-sensor platforms</i> | 2011 | EUA, França | <i>Georgia Institute of Technology, Institut Catholique d'Arts et Métiers</i> |
| 27 | <i>Flexo-photovoltaic effect</i> | 2018 | Reino Unido | <i>University of Warwick</i> |
| 28 | <i>Waste thermal energy harvesting from a convection-driven Rijke–Zhao thermo-acoustic-piezo system</i> | 2013 | Singapura | <i>Nanyang Technological University</i> |
| 29 | <i>Environmental life cycle assessment and techno-economic analysis of triboelectric nanogenerators</i> | 2017 | EUA, Reino Unido, China, Canada e Egito | Varios |
| 30 | <i>Electrically conducting fibres for e-textiles: An open playground for conjugated polymers and carbon nanomaterials</i> | 2018 | - | - |
| 31 | <i>Internet of Things-enabled smart cities: State-of-the-art and future trends</i> | 2018 | EUA | <i>University of Missouri, Michigan State University, University of Pennsylvania</i> |
| 32 | <i>Self-Biased Hybrid Piezoelectric-Photoelectrochemical Cell with Photocatalytic Functionalities</i> | 2015 | Singapura | <i>National University of Singapore</i> |
| 33 | <i>Continuous health monitoring of pavement systems using smart sensing technology</i> | 2016 | EUA | <i>Michigan State University</i> |
| 34 | <i>Room temperature lead-free relaxor-antiferroelectric electroceramics for energy storage applications</i> | 2014 | India | <i>University of Delhi</i> |
| 35 | <i>Efficient natural piezoelectric nanogenerator: Electricity generation from fish swim bladder</i> | 2016 | India | <i>Jadavpur University</i> |

| | | | | |
|----|--|------|--------------------|--|
| 36 | <i>Solar PV tree design: A review</i> | 2018 | India e Malasia | <i>Maulana Azad National Institute of Technology Bhopal, Universiti Malaysia Pahang</i> |
| 37 | <i>A hybridized electromagnetic-triboelectric self-powered sensor for traffic monitoring: concept, modelling, and optimization</i> | 2017 | - | - |
| 38 | <i>Photovoltaics with Piezoelectric Core-Shell Nanowires</i> | 2010 | - | - |
| 39 | <i>Microsystem based Energy Harvesting (EH-MEMS): Powering pervasivity of the Internet of Things (IoT) – A review with focus on mechanical vibrations</i> | 2019 | Itália | <i>King Saud University</i> |
| 40 | <i>Energy harvesting during human walking to power a wireless sensor node</i> | 2017 | Reino Unido | <i>University of Exeter</i> |
| 41 | <i>Hybrid piezo/triboelectric nanogenerator for highly efficient and stable rotation energy harvesting</i> | 2019 | China e EUA | - |
| 42 | <i>Hybrid cells for simultaneously harvesting multi-type energies for self-powered micro/nanosystems</i> | 2012 | EUA | <i>Georgia Institute of Technology</i> |
| 43 | <i>Reverse electrodialysis heat engine for sustainable power production</i> | 2017 | - | - |
| 44 | <i>Integrated hybrid life cycle assessment and supply chain environmental profile evaluations of lead-based (lead zirconate titanate) versus lead-free (potassium sodium niobate) piezoelectric ceramics</i> | 2016 | Reino Unido | <i>University of Sheffield, University of Kent, e Loughborough Universit</i> |
| 45 | <i>White and green light emissions of flexible polymer composites under electric field and multiple strains</i> | 2015 | China | <i>The Hong Kong polytechnic University</i> |
| 46 | <i>Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect</i> | 2016 | Coréia do Sul | <i>Hanyang University</i> |
| 47 | <i>Hybrid energy cell for simultaneously harvesting wind, solar, and chemical energies</i> | 2014 | China e EUA | <i>Georgia Institute of Technology and Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems</i> |

| | | | | |
|----|---|------|----------------|--|
| 48 | <i>Energy generation in a hybrid harvester under harmonic excitation</i> | 2018 | - | - |
| 49 | <i>Experimental investigation of aerodynamic energy harvester with different interference cylinder cross-sections</i> | 2019 | China e EUA | <i>Huazhong University of Science and Technology, New Mexico State University</i> |
| 50 | <i>Hybrid energy cells for simultaneously harvesting multi-types of energies</i> | 2015 | China e EUA | <i>Georgia Institute of Technology and Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems</i> |