



# ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

## I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

## Energias Limpas nas Engenharias

### Tendências na Otimização de Energias Renováveis com Inteligência Artificial: Uma Abordagem Cienciométrica no Campo das Engenharias

**Tathiana Mikamura Barchi**

PPGEP - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**João Lucas Ferreira dos Santos**

PPGEP - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Bárbara Dora Ross Veitía**

PPGEP - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Sergio Luiz Stevan Jr.**

PPGEE - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Hugo Valadares Siqueira**

PPGEP - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Resumo:** Com o crescimento das tecnologias e a busca por fontes de energia sustentáveis, a Inteligência Artificial (IA) tem desempenhado um papel essencial na superação de desafios técnicos e operacionais associados à produção e distribuição dessas energias. Entretanto, um dos desafios identificados é a ausência de uma visão mais ampla das diversas aplicações da IA no campo das energias renováveis, já que muitos estudos se concentram em casos específicos. Dessa forma, o objetivo do artigo é analisar as tendências de pesquisa sobre o uso da IA na otimização de energias renováveis, mapear a colaboração científica e identificar os principais autores e instituições. O estudo utilizou uma análise cienciométrica baseada na coleta de dados de artigos das bases Scopus e Web of Science, abrangendo o período de 2014 a 2024. A coleta resultou em 682 artigos únicos, que foram preparados e analisados com o uso de scripts próprios. Os resultados da análise mostram um crescimento expressivo na produção acadêmica sobre o tema, especialmente após 2020. Instituições como a Huazhong University of Science and Technology e a King Fahd University of Petroleum & Minerals destacaram-se como principais contribuintes para a pesquisa sobre o uso de IA em energias renováveis. Além disso, os periódicos "IEEE Access" e "Applied Energy" foram os mais utilizados para a publicação de inovações na área. A análise de coocorrência de palavras-chave destacou temas como "gestão de energia" e "redes inteligentes", enfatizando a importância da IA na eficiência e resiliência dos sistemas energéticos renováveis.

**Palavras-chave:** Análise Cienciométrica, Inteligência Artificial, Energias Renováveis, Otimização.

# Trends in Renewable Energy Optimization with Artificial Intelligence: A Scientometric Approach in the Field of Engineering

**Abstract:** With the growth of technologies and the search for sustainable energy sources, Artificial Intelligence (AI) has played an essential role in overcoming technical and operational challenges associated with the production and distribution of these energies. However, one of the challenges identified is the lack of a broader view of the various applications of AI in the field of renewable energy, since many studies focus on specific cases. Thus, the objective of the article is to analyze research trends on the use of AI in the optimization of renewable energy, map scientific collaboration and identify the main authors and institutions. The study used a scientometric analysis based on the collection of data from articles in the Scopus and Web of Science databases, covering the period from 2014 to 2024. The collection resulted in 682 unique articles, which were prepared and analyzed using proprietary scripts. The results of the analysis show a significant growth in academic production on the topic, especially after 2020. Institutions such as Huazhong University of Science and Technology and King Fahd University of Petroleum & Minerals stood out as major contributors to research on the use of AI in renewable energy. In addition, the journals "IEEE Access" and "Applied Energy" were the most used for publishing innovations in the area. The keyword co-occurrence analysis highlighted topics such as "energy management" and "smart grids", emphasizing the importance of AI in the efficiency and resilience of renewable energy systems.

**Keywords:** Scientometric Analysis, Artificial Intelligence, Renewable Energy, Optimization.

## 1. Introdução

O avanço das tecnologias e o crescente interesse por fontes de energia sustentáveis têm promovido o desenvolvimento de soluções inovadoras nas engenharias, especialmente no campo das energias renováveis (OLANREWAJU, 2024; UKOBA, *et al.*, 2024). A busca por eficiência e redução de impactos ambientais impulsionou a aplicação de técnicas de otimização nos processos de geração, distribuição e armazenamento de energia (OLANREWAJU, 2024; UKOBA, *et al.*, 2024). Nesse contexto, as tecnologias de energia renovável, como solar, eólica e biomassa, tornaram-se fundamentais para uma transição energética sustentável. No entanto, essas fontes apresentam desafios técnicos e operacionais, como a intermitência, variações climáticas e a necessidade de otimizar a distribuição de energia (LEHTOLA; ZAHEDI, 2020).

Para enfrentar esses desafios, a Inteligência Artificial (IA) surge como uma ferramenta promissora, permitindo a análise de grandes volumes de dados e a automação de processos complexos, maximizando o desempenho e a viabilidade econômica das fontes renováveis (UKOBA, *et al.*, 2024).

As técnicas de otimização com IA são aplicadas em diversas etapas das cadeias produtivas de energias renováveis, abrangendo desde a previsão climática até a integração de redes inteligentes e proporcionando melhorias significativas em termos de eficiência e viabilidade econômica (ONWUSINKWUE, *et al.*, 2024; SWARNKAR, *et al.*, 2023; UKOBA, *et al.*, 2024). Entre outras, pode-se citar a aplicação em 6 diferentes vertentes correlacionadas:

a) Previsão de padrões climáticos: Realizar esse tipo de previsão com alta precisão é essencial para maximizar a captação de energia solar e eólica. Modelos de aprendizado de máquina são capazes de analisar grandes volumes de dados meteorológicos e prever a produção energética com base em condições como radiação solar e velocidade do vento (MUJEEB, 2019; TORRES, *et al.*, 2019). Isso permite otimizar o posicionamento e a operação de painéis solares e turbinas eólicas, garantindo maior eficiência na geração de energia;

b) Otimização de sistemas de distribuição de energia: Através de algoritmos inteligentes, é possível ajustar a oferta e a demanda em tempo real, garantindo maior estabilidade nas

redes elétricas (MUHAMMAD, *et al.*, 2023). Em sistemas avançados, como as redes inteligentes, a IA desempenha um papel vital na coordenação do fluxo de energia entre geradores distribuídos, consumidores e sistemas de armazenamento (ALI; CHOI, 2020). Isso melhora a eficiência ao reduzir desperdícios e equilibrar a rede, evitando sobrecargas e maximizando o aproveitamento das fontes renováveis;

c) Integração das energias renováveis em redes inteligentes: Esses sistemas requerem controle e coordenação sofisticados para lidar com a variabilidade das fontes renováveis. A IA possibilita a automação desses processos, garantindo que a energia seja distribuída de maneira otimizada, que a carga seja ajustada conforme a demanda, e que as fontes renováveis sejam integradas de maneira mais eficiente às infraestruturas existentes (HAMDAN, *et al.*, 2023);

d) Otimização de sistemas híbridos: São sistemas que combinam diferentes fontes de energia renovável, como solar e eólica, com sistemas de armazenamento e gerenciamento de energia (MAGHAMI, MUTAMBARA, 2023). Algoritmos de otimização, como algoritmos genéticos e enxame de partículas, são frequentemente aplicados para encontrar as melhores configurações desses sistemas, garantindo o uso eficiente dos recursos (NEMATZADEH, *et al.*, 2022). Isso resulta em sistemas de energia mais resilientes e capazes de fornecer eletricidade mesmo em condições adversas, aumentando sua viabilidade técnica e econômica;

e) Manutenção preditiva: Sensores instalados em equipamentos, como turbinas eólicas ou painéis solares, coletam dados em tempo real sobre o desempenho dos componentes. Algoritmos de IA analisam esses dados e detectam padrões que indicam desgaste ou falhas iminentes. Isso permite que os engenheiros realizem manutenções de forma proativa, evitando quebras inesperadas e reduzindo o tempo de inatividade dos sistemas, o que é fundamental para garantir a operação contínua de fontes de energia renovável (UCAR, *et al.*, 2024);

f) Ferramenta de suporte à decisão: Em projetos de grande escala, como a implantação de parques eólicos ou usinas solares, é necessário considerar uma série de variáveis complexas (TASEEN, *et al.*, 2023). Sistemas baseados em IA podem analisar dados históricos, previsões climáticas, demanda energética e custos de implementação para auxiliar engenheiros e gestores na tomada de decisões estratégicas. Isso facilita a escolha das melhores tecnologias, locais de instalação e estratégias operacionais, resultando em projetos mais eficientes e sustentáveis.

Baseado neste histórico recente, percebe-se que a IA está em uma fase inicial de integração com o setor de energias renováveis, e com perspectivas de crescimento, vindo a promover não apenas maior eficiência operacional, mas também a viabilidade econômica e a resiliência dos sistemas energéticos. No entanto, muitos estudos concentram-se em casos isolados de aplicação, como a previsão do clima para otimizar a produção de energia solar ou a modelagem de turbinas eólicas. Faltam investigações abrangentes que apresentem uma visão holística sobre as tendências globais e sobre como essas técnicas estão sendo desenvolvidas e aplicadas ao longo do tempo.

Nesta perspectiva, o objetivo deste estudo é analisar as tendências de pesquisa sobre o uso da inteligência artificial para otimização no campo das engenharias no que diz respeito as energias renováveis, utilizando uma abordagem cienciométrica.

Foram elaboradas ferramentas próprias para mapear a colaboração científica, identificar os principais autores e instituições envolvidos, e explorar a evolução das pesquisas ao longo dos anos.

## 2. Metodologia

A análise cienciométrica é uma abordagem quantitativa utilizada para mensurar e avaliar o impacto da produção científica em determinado campo de pesquisa. Ela se baseia na coleta, organização e interpretação de dados bibliométricos (MINGERS, LEYDESDORFF, 2015). Esse tipo de análise é amplamente utilizado para identificar tendências de pesquisa, mapear redes de colaboração científica e determinar o impacto de determinadas tecnologias ou temas em evolução.

A análise deste estudo foi conduzida a partir de uma metodologia estruturada em seis etapas fundamentais incluindo coleta e filtragem dos artigos publicados na área, nos últimos 10 anos. A análise de indicadores cienciométricos foi realizada através de scripts próprios desenvolvidos em linguagem Python.

### 2.1 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada por meio das bases de dados Scopus e Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics/Thomson Reuters), utilizando-se de filtros específicos para garantir a relevância e a atualidade dos artigos analisados. O período considerado foi de 2014 a 2024, e as buscas foram feitas com a seguinte combinação de palavras-chave: *("artificial intelligence") AND ("clean energy" OR "renewable energy") AND ("optimization")*. Adicionalmente, foram aplicados filtros para restringir os resultados à área de engenharia e incluir apenas artigos completos, excluindo revisões, conferências e outros tipos de publicações.

Os dados coletados foram baixados no formato RIS, um padrão utilizado para gerenciar referências bibliográficas em softwares como Mendeley e Zotero, facilitando a integração e organização dos metadados para análise subsequente. A busca na base Scopus resultou em 264 linhas de artigos, enquanto a busca na Web of Science gerou 555 linhas, resultando em 819 registros.

Após a remoção de duplicatas entre as duas bases, o total consolidado de artigos únicos foi de 682, que representaram o conjunto de dados utilizado para as etapas seguintes da análise.

### 2.2 Pré-processamento dos dados

Após a coleta dos dados em formato RIS, a primeira etapa da preparação dos dados consistiu na conversão desse formato para CSV, facilitando a manipulação e análise dos dados utilizando ferramentas como Python. Essa conversão foi realizada para garantir que os metadados estivessem organizados de forma adequada para as próximas etapas do processo.

Com os dados já em formato CSV, foi aplicado um script Python desenvolvido especificamente para preparação dos dados.

O primeiro passo consiste na remoção de duplicatas entre as duas bases, o total consolidado de artigos únicos foi de 566, que representaram o conjunto de dados utilizado para as etapas seguintes da análise.

Em seguida, é feita a extração das instituições e países a partir das informações de afiliação dos autores, também é realizada a extração do número de citações, que não estavam inicialmente separados em colunas específicas.

Por fim, foi gerado um arquivo CSV limpo e consolidado, contendo colunas organizadas com as informações extraídas, como instituições, países e número de citações, além das informações originais dos artigos. Esse arquivo estruturado serviu como base para a análise cienciométrica subsequente, para a extração de indicadores.

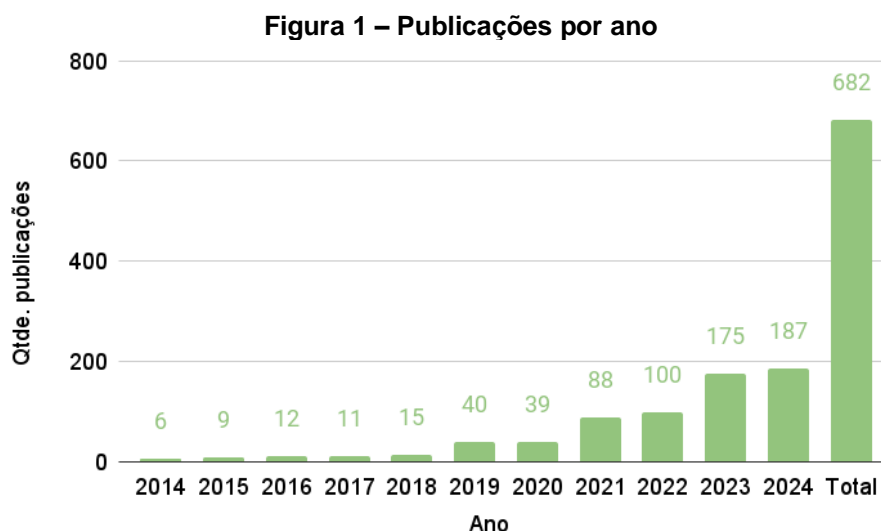
## 2.3 Análise dos dados

A etapa de análise dos indicadores cientiométricos fez uso de um script Python personalizado. Esse script foi projetado para extrair informações relevantes da base de dados previamente preparada e gerar insights sobre a produção científica no campo de estudo. O script consistiu em várias funções que analisaram diferentes aspectos da produção acadêmica, dentre elas: a) publicações por ano; b) autores com maior número de publicações; c) periódicos com mais publicações no tema; d) instituições com mais contribuições; e) distribuição geográfica dos autores; f) artigos mais citados, e, g) grafo de coocorrência de palavras-chave.

## 3. Resultados

### 3.1 Publicações por ano

Conforme ilustrado na Figura 1, os dados de publicação de 2014 a 2024 mostram um crescimento contínuo na quantidade de artigos publicados sobre o uso de inteligência artificial na otimização de sistemas de energias renováveis. Em 2014, foram registradas apenas 6 publicações, e o número permaneceu relativamente baixo até 2018, com aumentos graduais. Esse período inicial reflete um estágio de desenvolvimento incipiente, onde o interesse na aplicação de IA para energias renováveis estava apenas começando a emergir.



Fonte: Autoria própria (2024)

De 2018 para 2019 houve um aumento mais expressivo no volume de publicações, saltando de 15 para 40 publicações. No entanto, vale ressaltar que entre 2019 e 2020 ocorreu um pequeno decréscimo no número de publicações, caindo de 40 para 39. Essa leve redução pode ser resultado de vários fatores, incluindo possíveis impactos da pandemia de COVID-19, que afetou a produção acadêmica global, com muitas universidades e centros de pesquisa tendo suas atividades temporariamente interrompidas ou reorientadas para responder à crise de saúde.

Apesar desse ligeiro decréscimo em 2020, o crescimento retomou de forma significativa a partir de 2021, com um aumento de 39 para 88 publicações. Essa retomada sugere que, após o impacto inicial da pandemia, a pesquisa em IA aplicada às energias renováveis não apenas se recuperou, mas foi impulsionada, possivelmente devido ao reconhecimento da importância crítica da energia sustentável durante a crise global. O aumento manteve um ritmo elevado até 2024, quando o número de publicações atingiu 187, marcando um crescimento sem precedentes e uma expansão contínua do interesse pela aplicação de IA em sistemas energéticos sustentáveis.

### 3.2 Autores com mais publicação

A análise dos dados de publicação apresentados na Tabela 1 permite identificar os autores mais prolíficos na área de IA aplicada à otimização em energias renováveis.

O autor Li, YZ lidera com um total de 17 publicações indicando que o autor desempenha um papel central na pesquisa e expansão da aplicação de IA em sistemas de energia. Em seguida, aparecem os autores Zhao, TY, Liu, Y, e Khalid, M, cada um com 9 publicações — um pouco mais da metade das publicações de Li, YZ. Outros autores, como Wu, L e Li, X, têm 8 publicações cada, enquanto Shi, Y, Kumar, A, Kamel, S, e Ni, ZX contribuíram com 7 publicações cada, mostrando um volume de produção muito próximo.

**Tabela 1 – Autores com mais publicação no tema entre 2014 e 2024**

| Autor     | Quantidade |
|-----------|------------|
| Li, YZ    | 17         |
| Zhao, TY  | 9          |
| Liu, Y    | 9          |
| Khalid, M | 9          |
| Wu, L     | 8          |
| Li, X     | 8          |
| Shi, Y    | 7          |
| Kumar, A  | 7          |
| Kamel, S  | 7          |
| Ni, ZX    | 7          |

**Fonte: Autoria própria (2024)**

A análise revela que Li, YZ lidera o grupo dos principais autores, com 17 publicações ao longo dos últimos 10 anos. Considerando que, nesse período, foram publicados 682 artigos sobre inteligência artificial aplicada à otimização de sistemas de energias renováveis nas bases consideradas neste levantamento, isso representa aproximadamente 2,5% da produção científica da área.

### 3.3 Periódicos com mais publicação

A análise dos dados de publicação, conforme apresentado na Tabela 2, permite identificar os periódicos mais relevantes para a disseminação do conhecimento sobre inteligência artificial aplicada à otimização de energias renováveis. O fator de impacto apresentado é uma métrica que reflete a influência e a relevância o qual os valores foram publicados em 2022 e atualizada em 2023.

**Tabela 2 – Periódicos com mais publicação no tema entre 2014 e 2024**

| Autor   | Quantidade | Fator de Impacto |
|---|------------|------------------|
| ieee access   | 58         | 3,9              |
| applied energy                                      | 36         | 11,2             |
| engineering applications of artificial intelligence | 33         | 8                |
| energies  | 26         | 3,2              |
| journal of cleaner production                       | 19         | 11,1             |
| ieee transactions on industrial informatics         | 15         | 12,3             |
| energy  | 13         | 9                |
| electronics   | 12         | 2,9              |
| iet renewable power generation                      | 12         | 2,6              |
| process safety and environmental protection         | 11         | 7,8              |

**Fonte: Autoria própria (2024)**

O periódico IEEE Access lidera em termos de número de publicações, com 58 artigos, e possui um fator de impacto de 3,9. Esse alto volume de publicações sugere que o IEEE Access é uma escolha preferencial para pesquisadores que desejam alcançar uma audiência ampla, devido ao seu caráter multidisciplinar e à visibilidade proporcionada pela IEEE.

O Applied Energy, com 36 publicações e um fator de impacto de 11,2, é um dos veículos de publicação mais influentes para artigos sobre IA em energias renováveis. O alto fator de impacto reflete a grande influência dos artigos publicados nesse periódico. Da mesma forma, o Journal of Cleaner Production, com 19 publicações e um fator de impacto de 11,1, destaca-se por seu compromisso com a sustentabilidade e práticas de produção limpa.

O IEEE Transactions on Industrial Informatics possui o maior fator de impacto desta lista, 12,3, com 15 publicações. Outros periódicos, como o Engineering Applications of Artificial Intelligence, o Energy, e o Process Safety and Environmental Protection, também têm um papel fundamental na disseminação das pesquisas.

### 3.4 Instituições com mais publicação

A análise dos dados de publicação permitiu identificar as instituições de ensino e pesquisa com o maior volume de publicações na área de inteligência artificial aplicada à otimização em energias renováveis.

A Huazhong University of Science and Technology lidera esse grupo com 71 publicações, destacando-se como a principal instituição contribuidora para o desenvolvimento da pesquisa nessa área. Em segundo lugar, está a King Fahd University of Petroleum & Minerals (KFUPM), com 49 publicações indicando uma forte concentração de esforços na implementação de soluções de IA para enfrentar os desafios energéticos no Oriente Médio.

**Tabela 2 – Instituições com mais publicação no tema entre 2014 e 2024**

| Autor                           | Quantidade |
|---------------------------------|------------|
| Huazhong Univ Sci & Technol     | 71         |
| King Fahd Univ Petr & Minerals  | 49         |
| Nanjing Univ Posts & Telecommun | 17         |
| Chinese Univ Hong Kong          | 15         |
| Indian Inst Technol Delhi       | 14         |
| Tsinghua Univ                   | 14         |
| King Abdulaziz Univ             | 11         |
| North China Elect Power Univ    | 11         |
| Univ Malaya                     | 11         |
| Guangxi Univ                    | 11         |

**Fonte: Autoria própria (2024)**

Outras instituições, apresentam uma participação consideravelmente menor em comparação com as instituições líderes, como a Huazhong University e a KFUPM.

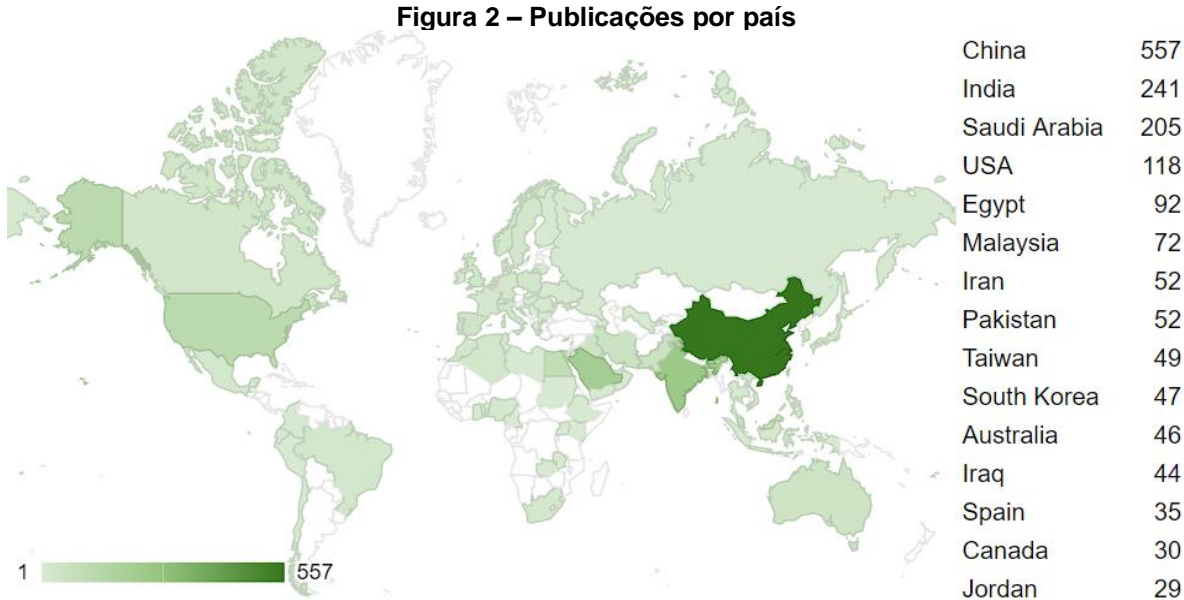
### 3.5 Distribuição geográfica

A Figura 2 apresenta a distribuição geográfica referente ao endereço dos autores, destacando as regiões que mais contribuíram para a pesquisa em IA aplicada à otimização de energias renováveis.

Dentre os países representados, a China detém a maior quantidade de publicações refletindo seu investimento em energias renováveis e tecnologias emergentes. Seguida pela Índia com produção científica crescente na área de IA aplicada a energias renováveis. Malásia, Taiwan e Coreia do Sul também figuram entre os principais territórios asiáticos que contribuem com a aplicação de IA para otimização de sistemas de energia.



A Arábia Saudita ocupa a terceira posição, refletindo os esforços de instituições como a King Fahd University of Petroleum & Minerals (KFUPM), que lideram a pesquisa na integração de IA e energia renovável. Egito, Irã, Paquistão, Iraque e Jordânia também têm contribuído para o campo, evidenciando o crescente interesse de países do oriente médio em desenvolver soluções de IA para energias renováveis e alinhando-se aos objetivos globais de sustentabilidade.



Fonte: Autoria própria (2024)

Dentre os países da América do Norte é possível citar os Estados Unidos, quarto lugar, e o Canadá entre os países com mais pesquisas no campo.

Além dos territórios listados no ranking, vale destacar que diversos países da América Latina e da África vem ganhando destaque no desenvolvimento de tecnologias de IA aplicadas às energias renováveis.

3.6 Artigos mais citados

A Tabela 3 exibe os dez documentos mais citados globalmente. Ela contém três colunas: Título, Ano e Citações. Em primeiro lugar, "Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review", aborda uma revisão sobre as técnicas de otimização para sistemas de energia pequenos e isolados (BHANDARI et al., 2015).

"Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities" é o segundo mais citado e examinou como as técnicas de IA superam os modelos tradicionais em aspectos como: controlabilidade, manipulação de big data, prevenção de ataques cibernéticos, rede inteligente, IoT, robótica, otimização de eficiência energética, controle de manutenção preditiva e eficiência computacional (AHMAD et al., 2021).

Em terceiro lugar, "Exploiting Heuristic Algorithms to Efficiently Utilize Energy Management Controllers with Renewable Energy Sources" avalia o desempenho do controlador de gerenciamento de energia residencial, projetado com base em algoritmos heurísticos, incluindo algoritmo genético (GA), otimização por enxame de partículas binárias (BPSO) e otimização por colônia de formigas (ACO) (RAHIM et al., 2016).

O estudo "User Scheduling and Resource Allocation in HetNets with Hybrid Energy Supply" se destaca em quarto lugar investigando a política ideal para o agendamento de usuários e a alocação de recursos em HetNets alimentadas por energia híbrida, visando maximizar a eficiência energética da rede como um todo (WEI et al., 2017).



Em quinto lugar, o artigo apresenta uma revisão sistemática dos métodos de previsão da produção de energia fotovoltaica com foco em técnicas de aprendizado de máquina e metaheurísticas (AKHTER et al., 2019).

**Tabela 3 – Artigos mais citados no tema entre 2014 e 2024**

| <b>Título</b>   | <b>Ano</b> | <b>Citações</b> |
|---|------------|-----------------|
| Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review   | 2015       | 295             |
| Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities  | 2021       | 268             |
| Exploiting heuristic algorithms to efficiently utilize energy management controllers with renewable energy sources                            | 2016       | 263             |
| User Scheduling and Resource Allocation in HetNets with Hybrid Energy Supply: An Actor-Critic Reinforcement Learning Approach                 | 2018       | 262             |
| Review on forecasting of photovoltaic power generation based on machine learning and metaheuristic techniques                                 | 2019       | 241             |
| Simulation and Hardware Implementation of New Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded PV System Using Hybrid DEPSO Method | 2015       | 228             |
| Modeling and simulating of reservoir operation using the artificial neural network, support vector regression, deep learning algorithm        | 2018       | 224             |
| A Survey of Deep Learning Techniques: Application in Wind and Solar Energy Resources  | 2019       | 207             |
| Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review  | 2021       | 194             |
| Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview                               | 2021       | 183             |

**Fonte: Autoria própria (2024)**

O sexto estudo, visa empregar um algoritmo evolutivo híbrido chamado técnica DEPSO, que combina o algoritmo diferencial evolutivo (DE) com a otimização por enxame de partículas (PSO), para detectar o ponto de máxima potência em condições de sombreamento parcial (SEYEDMAHMOUDIAN, et al., 2015).

O artigo em sétimo lugar busca resumir a influência das configurações de parâmetros no desempenho do modelo e explorar a aplicabilidade do modelo LSTM na simulação da operação de reservatórios (ZHANG et al., 2018).

Em nono lugar, o trabalho explora o aprimoramento de redes neurais com algoritmos de otimização, como PSO, GA, ABC e BSA, para buscar parâmetros ótimos, como o número de neurônios e a taxa de aprendizado (ABDOLRASOL et al., 2021).

Por último, o artigo em décimo lugar analisa as funções, classificações, métodos de otimização de projeto e aplicações dos sistemas de armazenamento de energia (ABDALLA et al., 2021).

### **3.7 Coocorrência de palavras-chave**

A análise de coocorrência de palavras-chave revela a relação entre conceitos frequentemente estudados juntos em pesquisas sobre IA aplicada a energias renováveis. A Figura 4 apresenta um grafo que exibe os 30 pares de palavras-chave mais frequentes na pesquisa sobre IA aplicada a energias renováveis.

O grafo mostra que a combinação mais frequente é "artificial intelligence" com "optimization", indicando um foco significativo no uso da IA para otimizar sistemas energéticos, aumentando a eficiência e reduzindo perdas. A associação de "artificial intelligence" com "renewable energy" destaca o esforço contínuo em aplicar IA no setor de fontes renováveis.

Além disso, os termos "optimization" e "renewable energy" associados sugerem que a otimização é uma ferramenta chave para melhorar a eficiência e reduzir custos em sistemas de energia renovável.

**Figura 4 – Grafo de coocorrência de palavras-chave**

**Fonte: Autoria própria (2024)**

da área, enquanto países como China e Arábia Saudita lideram em termos de volume de produção. Os periódicos "IEEE Access" e "Applied Energy" também foram destacados como os veículos preferidos pelos pesquisadores para publicação de inovações sobre IA e energias renováveis. Além disso, a análise de coocorrência de palavras-chave revelou um foco significativo em temas como "gestão de energia", "redes inteligentes" e "otimização", reforçando o papel crucial da IA no aprimoramento da eficiência e resiliência dos sistemas energéticos.

Essas contribuições proporcionam um mapeamento abrangente do estado atual da pesquisa, oferecendo uma visão detalhada das tendências científicas, dos autores mais influentes e dos temas prioritários. Isso, por sua vez, facilita a compreensão dos avanços na área e pode acelerar a adoção de soluções tecnológicas mais eficientes e sustentáveis no setor energético.

No entanto, uma limitação importante identificada no estudo é a ausência de uma visão verdadeiramente holística sobre as diversas aplicações da IA em energias renováveis. A maioria dos estudos analisados trata de casos específicos, faltando uma análise que explore as tendências globais e as evoluções técnicas de forma abrangente.

Por fim, como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se expandir a variedade de termos sinônimos utilizados durante as buscas, de modo a incluir artigos que possam ter sido excluídos por variações nas terminologias. Essa estratégia pode ampliar a abrangência do mapeamento científico e contribuir para um entendimento ainda mais profundo das tendências e inovações emergentes na aplicação da IA para energias renováveis.

## Referências

ABDALLA, Ahmed N. et al. Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview. **Journal of Energy Storage**, v. 40, p. 102811, 2021.

ABDOLRASOL, Maher GM et al. Artificial neural networks based optimization techniques: A review. **Electronics**, v. 10, n. 21, p. 2689, 2021

AHMAD, Tanveer et al. Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125834, 2021.

AKHTER, Muhammad Naveed et al. Review on forecasting of photovoltaic power generation based on machine learning and metaheuristic techniques. **IET Renewable Power Generation**, v. 13, n. 7, p. 1009-1023, 2019.

BHANDARI, Binayak et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. **International journal of precision engineering and manufacturing-green technology**, v. 2, p. 99-112, 2015.

HAMDAN, Ahmad et al. AI in renewable energy: A review of predictive maintenance and energy optimization. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 11, n. 1, p. 718-729, 2024.

LEHTOLA, T.; ZAHEDI, A. Technical challenges in the application of renewable energy: A review. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, v. 9, n. 3, p. 689-699, 2020

MAGHAMI, Mohammad Reza; MUTAMBARA, Arthur Guseni Oliver. Challenges associated with Hybrid Energy Systems: An artificial intelligence solution. **Energy Reports**, v. 9, p. 924-940, 2023.

MINGERS, John; LEYDESDORFF, Loet. A review of theory and practice in scientometrics. **European journal of operational research**, v. 246, n. 1, p. 1-19, 2015.

MUHAMMAD, Abdulgaffar; ISHAQ, A. A.; IDRIS, M. B. Artificial intelligence and machine learning for real-time energy demand response and load management. **J. Technol. Innovations Energy**, v. 2, n. 2, p. 20, 2023.

MUJEEB, Sana et al. Exploiting deep learning for wind power forecasting based on big data analytics. **Applied Sciences**, v. 9, n. 20, p. 4417, 2019.

NEMATZADEH, Sajjad et al. Tuning hyperparameters of machine learning algorithms and deep neural networks using metaheuristics: A bioinformatics study on biomedical and biological cases. **Computational biology and chemistry**, v. 97, p. 107619, 2022.

OLANREWAJU, Omowonuola Ireoluwapo Kehinde; ODURO, Portia; SIMPA, Peter. Engineering solutions for clean energy: Optimizing renewable energy systems with advanced data analytics. **Engineering Science & Technology Journal**, v. 5, n. 6, p. 2050-2064, 2024.

ONWUSINKWUE, Shedrack et al. Artificial intelligence (AI) in renewable energy: A review of predictive maintenance and energy optimization. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 21, n. 1, p. 2487-2499, 2024.

RAHIM, Sahar et al. Exploiting heuristic algorithms to efficiently utilize energy management controllers with renewable energy sources. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 452-470, 2016.

SEYEDMAHMOUDIAN, Mohammadmehdi et al. Simulation and hardware implementation of new maximum power point tracking technique for partially shaded PV system using hybrid DEPSO method. **IEEE transactions on sustainable energy**, v. 6, n. 3, p. 850-862, 2015.

SWARNKAR, Mamta et al. Use of AI for development and generation of renewable energy. In: **2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)**. IEEE, 2023. p. 1-5.

TORRES, José F. et al. Big data solar power forecasting based on deep learning and multiple data sources. **Expert Systems**, v. 36, n. 4, p. e12394, 2019.

UKOBA, Kingsley et al. Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. **Energy & Environment**, p. 0958305X241256293, 2024.

WEI, Yifei et al. User scheduling and resource allocation in HetNets with hybrid energy supply: An actor-critic reinforcement learning approach. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 17, n. 1, p. 680-692, 2017.

ZHANG, Di et al. Modeling and simulating of reservoir operation using the artificial neural network, support vector regression, deep learning algorithm. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 720-736, 2018.