UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA

INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - IEDS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

Internet of Energy (IoE) como Vetor da Transição Energética: Análise Científica e Tecnológica

Adulai Djalo

REDENÇÃO - CE

2026

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA

INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - IEDS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

Adulai Djalo

Internet of Energy (IoE) como Vetor da Transição Energética: Análise Científica e Tecnológica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - IEDS da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro- Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador(a): Prof.Dr. Herivelton Alves De Oliveira

REDENÇÃO - CE

2026

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Djaló, Adulai.

6231

Internet of Energy IoE como Vector da Transição Energética: Análise Cientifica e Tecnológica / Adulai Djaló. - Redenção, 2026.
66f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Herivelton Alves De Oliveira.

1. Internet of Energy (IoE). 2. Sistemas energéticos inteligentes. 3. Transição energética. I. Título

CE/UF/BSCA CDD 621.310285

Adulai Djalo

Internet of Energy (IoE) como Vetor da Transição Energética: Análise Científica e Tecnológica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - IEDS da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro- Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Trabalho aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof.Dr. Herivelton Alves De Oliveira
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB
Orientador

Prof.Dr. Vandilberto Perreira Pinto
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB
Avaliador

Prof. Dr. Sabi Yari Moïse BANDIRI
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE
Avaliador

REDENÇÃO - CE

2026

Primeiramente, dedico esta conquista a Allah (Subḥānahu wa Ta'ālā), fonte de toda sabedoria, força e orientação. Foi pela Sua vontade e misericórdia que cada passo desta caminhada se tornou possível, mesmo nos momentos de maior incerteza.

À minha querida mãe, Cadijatu Baldé, e ao meu pai, Mamadu Aliu Djaló, expresso a mais profunda gratidão. Vocês são o alicerce da minha existência e o farol que ilumina os meus caminhos. Mesmo à distância, nunca deixaram de estar presentes nas palavras de incentivo, nas orações silenciosas e na força invisível que sempre me impulsionou a seguir em frente. Carrego comigo os vossos ensinamentos, a vossa resiliência e o vosso amor incondicional, que foram combustíveis essenciais nesta jornada. Se hoje chego até aqui, é porque antes de mim, vocês acreditaram.

Às minhas irmãs, Maimuna Fadi Djaló, Aissatu Fadi Djaló e Iassim Balde e as minhas queridas tias Ussumane Bá e Habibatu Djaló, pelo carinho, apoio e confiança constantes, mesmo nos momentos em que o cansaço e a saudade tentavam falar mais alto. Vocês foram parte essencial desta caminhada.

Aos meus veteranos na UNILAB, Mestre Bubacar Zaide Ba e Doutor Umaro Farighu Seide, deixo o meu reconhecimento sincero pela recepção, orientação e inspiração. Vocês foram exemplos vivos de dedicação, excelência e compromisso, mostrando que é possível transformar sonhos em realidade através do conhecimento.

Por fim, encerro esta dedicatória com a convicção de que ser engenheiro não é apenas dominar cálculos ou sistemas, mas carregar a responsabilidade de transformar o mundo com inteligência, ética e propósito.

Ser engenheiro é acreditar que cada desafio é uma oportunidade de construir soluções e que, com conhecimento e determinação, somos capazes de iluminar caminhos onde antes só havia incerteza.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) pela oportunidade de transformar sonhos em realidade, e ao Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS) pelo acolhimento como estudante e pela formação sólida que me orientou na construção do meu percurso como futuro engenheiro.

Aos meus professores, Sabi Yari Moise Bandiri e Herivelton Alves de Oliveira, expresso a minha profunda gratidão pela orientação ao longo do desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sinto-me privilegiado por ter sido bem orientado, e levo comigo a inspiração e a admiração que construí por vocês ao longo desta caminhada.

De forma especial, direciono este agradecimento ao Professor Sabi Yari Moise Bandiri, que foi, para além de professor, um verdadeiro irmão. Com ele, tive a oportunidade de vivenciar, na prática, valores da educação e da cultura africana. Sou grato pela oportunidade de trabalharmos juntos ao longo da minha trajetória no projeto UNILAB Student Chapter, bem como por ter sido o docente com quem cursei o maior número de disciplinas durante a graduação em Engenharia de Energia. Levo comigo virtudes, ensinamentos e referências que marcarão para sempre a minha vida pessoal e acadêmica.

Aos colegas engenheiros, Vladimir Suleimane Mané, Binhanfisana João Ialá, Valdir Ricardo Landim, Fonseca Albino Ramos, Tchilatchi Paulino Có, Delício Augusto Mondlane, João Álvaro Manuel, Diana Ceita da Encarnação da Cruz, Nélio Santiago, Bonifácio Arlindo Mbuana, Alfredo Ngola MAcutunda, Muanangani Lutundissa e Alima Bin Omar, agradeço pela amizade, companheirismo e pelos momentos partilhados ao longo desta jornada.

Ao UNILAB Student Chapter e a OPTICA SOCIETY, projetos internacionais no qual tive algumas das minhas maiores experiências em liderança e gestão de pessoas e assim como destaque em 2025 como um dos melhores líderes estudantis à nível global, deixo o meu sincero reconhecimento. Tive a honra de liderar este projeto como presidente durante dois anos, período em que construí grandes amizades e sólidos laços de cooperação com estudantes de diferentes nacionalidades.

À PROEX, aos programas PIBIC, PIBITI e ao projeto Engenharia na Sociedade, agradeço pelo apoio e financiamento de diferentes iniciativas de pesquisa que desenvolvi ao longo da minha formação, contribuindo significativamente para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Agradeço também à minha comunidade islâmica, pelo acolhimento, proteção e por ter sido um espaço de refúgio, fé e tranquilidade ao longo desta caminhada. A todos os membros desta comunidade, dedico este trabalho em particular Alassam Baldé, Almamo Nanque, Lassana Dansó, Mamadu Dansó, nosso Imáme Aruna Djafuno e o nosso mais velho Coto Tcherno Baldé.

Por fim, compreendo que agradecer não é apenas um ato formal, mas uma expressão sincera de reconhecimento a todas as pessoas e instituições que contribuíram, direta ou indiretamente, para a minha trajetória. Este trabalho é, também, fruto de cada apoio, incentivo e gesto de confiança que recebi ao longo do caminho.

"A procura do conhecimento é obrigatório para todos muçulmanos e muçulmanas"

(Profeta Muhammad (SAAS) — Sallallahu 'alayhi wa sallam)

Resumo

A *Internet of Energy* (IoE) emergiu como uma tecnologia estratégica para modernizar os sistemas energéticos diante do crescimento da demanda global por eletricidade, dos desafios climáticos e da necessidade de integrar múltiplas fontes de energia no contexto da transição energética, caracterizada pela substituição de fontes fósseis por energias renováveis e pela busca por sistemas energéticos mais sustentáveis e resilientes. O presente trabalho apresenta a IoE como uma solução tecnológica capaz de promover a integração, gestão e monitoramento do sistema energético por via de internet, utilizando *Energy Router* para coleta dos dados em fontes de energias renováveis,essenciais no processo de descarbonização e redução das emissões de gases de efeito estufa na transição energética, de modo a garantir a maior confiabilidade e eficiência. O objetivo do estudo é compreender o papel do IoE na integração de fontes de energia, dispositivos inteligentes e sistemas de armazenamento, elementos fundamentais para a consolidação de sistemas energéticos descentralizados e sustentáveis, destacando a sua arquitetura, baseada em comunicação em tempo real, análise de dados e otimização do fluxo energético, contribui para a redução das perdas e automação das redes, aspectos fundamentais para aumentar a eficiência energética no contexto da transição energética. A metodologia inclui a revisão bibliográfica sobre pesquisas recentes de aplicações de IoE e o estudo bibliométrico sobre publicações recentes, com foco nas tendências de evolução do tema, nos autores mais influentes e nos países que lideram a pesquisa na área, considerando o avanço global das políticas de transição energética e inovação tecnológica no setor energético. Os resultados indicam crescente interesse científico pela IoE, evidenciado pelo aumento das publicações e citações nos últimos anos, a análise bibliométrica mostra que a pesquisa sobre a IoE é liderada pela China, EUA e membros da União Europeia, com fortes concentração nas áreas da engenharia elétrica, computação e telecomunicações e em regiões que também lideram investimentos e políticas voltadas à transição energética. Contudo, a IoE é fundamental para a transição energética, viabiliza a integração das fontes de energias renováveis, sistemas energéticos mais inteligentes e eficientes, embora é uma tecnologia que ainda enfrenta desafios socioeconômicos relevantes, sobretudo em países em desenvolvimento onde a transição energética ocorre de forma desigual devido a limitações de infraestrutura, financiamento e acesso à tecnologia.

Palavras-chave: *Internet of Energy* (IoE), Sistemas energéticos Inteligentes, Integração de energias renováveis, Roteador de Energia, Transição Energética

Abstract

The Internet of Energy (IoE) has emerged as a strategic technology to modernize energy systems in the face of growing global electricity demand, climate challenges, and the need to integrate multiple energy sources in the context of the energy transition, characterized by the replacement of fossil fuels with renewable energies and the pursuit of more sustainable and resilient energy systems. This study presents the IoE as a technological solution capable of promoting the integration, management, and monitoring of the energy system via the internet, using Energy Routers to collect data from renewable energy sources, essential in the process of decarbonization and the reduction of greenhouse gas emissions in the energy transition, in order to ensure greater reliability and efficiency. The objective of the study is to understand the role of the IoE in the integration of energy sources, smart devices, and storage systems, fundamental elements. The methodology includes a literature review on recent research of IoE applications and a bibliometric study on recent publications, focusing on the trends in the evolution of the topic, the most influential authors, and the countries leading research in the field, considering the global progress of energy transition policies and technological innovation in the energy sector. The results indicate a growing scientific interest in IoE, evidenced by the increase in publications in recent years. The bibliometric analysis shows that research on IoE is led by China, the USA, and European Union members, with strong concentration in the areas of electrical engineering, computer science, and telecommunications, and in regions that also lead investments and policies aimed at the energy transition. However, IoE is fundamental for the energy transition, enabling the integration of renewable energy sources, smarter and more efficient energy systems, although it is a technology that still faces significant socioeconomic challenges, especially in developing countries where the energy transition occurs unevenly due to infrastructure, financing, and technology access limitations.

Keywords: Internet of Energy (IoE), Smart Energy Systems, Integration renewable Energy, Energy Router, Energy Transiction.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Redução de Emissão de Gases Efeito de Estufa em Países da União Europeia em Toneladas de CO2 (tCO2) 15
Figura 2 – Participação das energias renováveis na matriz energética do Brasil (2018–2025) 16
Figura 3 – Ecossistema geral de Internet das Coisas *IoT* 20
Figura 4 – Arquitetura Geral de *Internet of Energy IoE* 23
Figura 5 – Arquitetura Específica de *Internet of Energy(IoE) no sistema elétrico* 25
Figura 6 – Tipologias de *Energy Router* da *Internet of Energy IoE* 27
Figura 7 – Modelo Funcional de *Energy Router* 28
Figura 8 – Mecanismos de Integração de Fontes de Energia com *Energy Router* em Sistema Híbridos 29
Figura 9 – Arquitetura de Redes Elétricas Inteligentes *Smart Grid* 32
Figura 10 – Estrutura elétrica de Redes Elétricas Inteligentes *(Smart Grid)* 33
Figura 11 – Modelo de Transição Energética Atual 39
Figura 12 – Investimento em Tecnologias de Baixo Carbono para a Transição Energética 41
Figura 13 – Geração de Eletricidade por Matriz Elétrica Por Países 42
Figura 14 – As Principais Tecnologias Para a descarbonização da matriz energética até 2050 43
Figura 15 – Fluxograma metodológica 47
Figura 16 – Evolução temporal das publicações e Citações de 2015 atá 2025 49
Figura 17 – Áreas Científicas Com mais aplicação de Estudo de *Internet of Energy* (IoE) 50
Figura 18 – Países que Lideram produção e Pesquisa Sobre a IoE 51
Figura 19 – Crescimento das Energias Renováveis em 2026 55
Figura 20 – Crescimento das Energias Solar e Eólica em TWH-2025 56

Lista de tabelas

Tabela 1 – Organização e Estruturação do Trabalho 18
Tabela 2 – Evolução do Conceito de Internet of Energy 22
Tabela 3 – Outras Arquiteturas de IoE 24
Tabela 4 – Funções e Aplicações dos Tipos de *Energy Router* 28
Tabela 5 – Cidades com aplicação da tecnologia de IoT e IoE para gestão de energia . . 31
Tabela 6 – Comparação Conceitual Técnica e Teórica entre *Smart GRid* e *Internet oF Energy (IoE)* 35
Tabela 7 – Visão, Convergência Literária e Inovação de cada autor sobre **Internet of Energy (IoE)** 38
Tabela 8 – Procedimento metodológico da Análise Bibliométrico 46
Tabela 9 – Autores Mais Influentes no Estudo da *Internet of Energy* (IoE) 52
Tabela 10 – Impactos da *Internet of Energy* (IoE) para Transição energética 54

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
abnTeX	ABsurdas Normas para TeX
IoE	*Internet of Energy*
IoT	Internet das Coisas
SG	*Smart Grids*
LPWAN	*Low Power Wide Area Networ*
P2P	*Peer-to-peer*
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
WAN	*Wide Area Network*
LAN	*Local Area Network*
SSTs	*Solid - State- Transformer*
MBC	Conversor Multiportas Bidirecional
DC	*Direct Current*
AC	*Alternating Current*
EUA	Estados Unidos de America
FREEDM	*Future Renewable Electric Energy Delivery and Management*
GEIDCO	*Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization*
CO2	Dióxido de Carbono
IA	Inteligência Artificial *SCADA Supervisory Control and Data Acquisition*
AMI	*Advanced Metering Infrastructure*
DERs	*Distributed Energy Resources ONU* Organização das Nações Unidas
IEA	Agência Internacional de Energia
CCS	Captura e Armazenamento de carbono
BECCS	Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono
EPS	Fonte Externa de Energia

Sumário

1 Introdução 14
1.1 Introdução 14
1.2 Objetivos 16
1.2.1 Objetivo Geral 16
1.2.2 Objetivos Específicos 16
1.2.3 Justificativa 17
1.3 Estrutura do Trabalho 17

2 Referencial Teórico 19
2.1 Conceito da Internet das Coisas (IoT): Fundamentos e o seu Ecossistema Tecnológico 19
2.2 *Internet of Energy* (IoE): Conceito, Arquitetura e sua Evolução 21
2.2.1 Conceito da *Internet of Energy*(IoE) 21
2.2.2 Arquiteturas da *Internet of Energy* (IoE) 21
2.2.3 Evolução da Tecnologia de *Internet of Energy(IoE)* 24
2.3 Roteadores de Energia, Tipologia e Aplicações 26
2.3.1 Modelo da arquitetura de *Internet of Energy* (IoE), destacando o papel fundamental da *Energy Router* 27
2.3.2 Mecanismos da Integração dos Diferentes Fontes e Cargas com Roteadores de Energia no Sistema de IoE 29
2.4 *Smart Cities* com tecnologias de gerenciamento de energia através de IoT e IoE 30
2.5 Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grid*) 30
2.5.1 Smart Grid e Suas Principais Estruturas 33
2.6 Comparação Técnica e Teórica entre *Smart Grid* e *Internet of Energy (IoE)* . . 34
2.7 Aspectos Económicos e Regulatórios da *Internet of Energy* (IoE) 34
2.8 Trabalhos Relacionados sobre a *Internet of Energy(IoE)* 36
2.9 Transição Energética e *Internet of Energy* (IoE): Prespectivas para a Eficiência Energética e a Sustentabilidade 38
2.9.1 Transição Energética: Principais conceitos e Papel da Digitalização. . . 39
2.9.2 Experiências internacionais da transição energética em alguns países Inspiradas em IoE 40
2.9.3 Crescimento dos Investimentos em Transição Energética por Setor no Mundo (2020–2025) 40

2.9.4 Participação das Energias Renováveis na Geração de Eletricidade em Países Líderes da Transição Energética através de Tecnologias baseado em IoE . . . 41
2.9.5 Eficiência Energética e *Internet of Energy* (IoE): Como Pilar Estratégico de Transição Energética . . . 42

3 Metodologia . . . 45
3.1 Descrição do Fluxograma Metodológico de Estudo . . . 46

4 Resultados Científico Sobre a *Internet of Energy* (IoE) e Transição Energética . . . 48
4.1 Evolução temporal das publicações . . . 48
4.2 Distribuição por Áreas Científicas . . . 49
4.3 Produção Científica por Países . . . 51
4.4 Citações por Autor, Número de publicações e Força de Ligação . . . 52
4.5 Principais Impactos da *Internet of Energy* (IoE) para Transição energética . . . 53
4.6 Papel da *Internet of Energy* (IoE) no Crescimento das Energias Renováveis . . . 54
4.7 Geração de Eletricidade por Energia Solar e Eólica: O Papel da IoE no Atendimento a Demanda Elétrica Global em 2025 . . . 56

5 Considerações Finais . . . 58
5.1 Trabalhos Futuros . . . 59

Referências . . . 60

1 Introdução

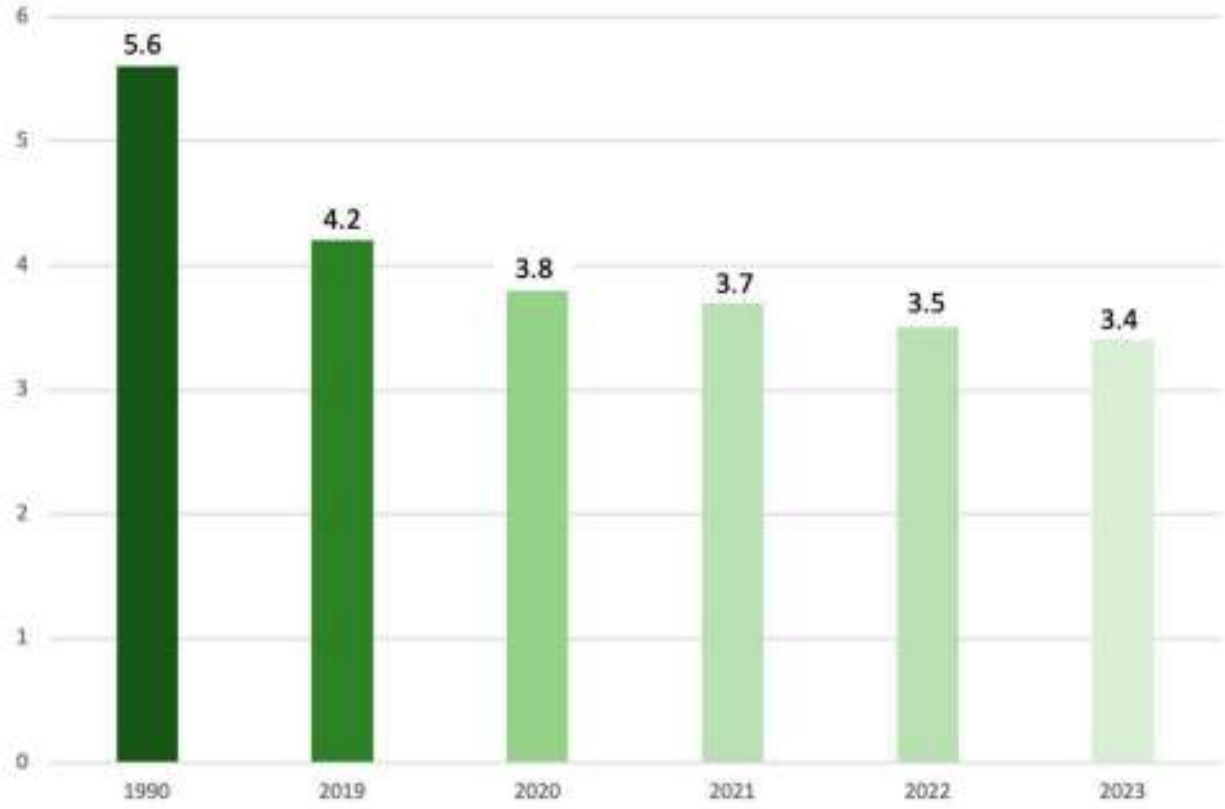
1.1 Introdução

O cenário energético global atravessa um período de transformação com incentivos para as fontes de energias renováveis, impulsionados pela necessidade urgente de descarbonização e pelo crescimento acelerado da demanda por eletricidade. A transição energética de um modelo baseado em combustíveis fósseis para uma matriz sustentável exige não apenas adoção de fontes renováveis, como solar, eólica, biomassa e hidrelétrica, mas uma reformulação completa na forma como a energia é gerada, distribuída e consumida Chen (2021). Nesse contexto, as redes elétricas tradicionais enfrentam desafios tecnológicos para integrar de forma eficiente essas fontes intermitentes e descentralizadas. A transição energética tem se consolidado como preocupação global, impulsionada pela necessidade de redução das emissões de gases efeito de estufa e pela expansão de geração de eletricidade por fontes de energias renováveis. Os países da União Europeia apresentam avanços significativos na descarbonização das suas matrizes energéticas, evidenciados pela redução contínua das emissões ao longo das últimas décadas, resultados de políticas energéticas rigorosas e investimentos em tecnologias limpas. Da mesma forma, países como Brasil destacam-se pelo aumento da participação de fontes renováveis em sua matriz energética, especialmente nos últimos anos, impulsionados pelo crescimento da energia solar e eólica.

Esse marco demonstra que embora em ritmos acelerados, regiões do mundo geograficamente localizadas em diferentes partes, estão avançando na transição para sistemas energéticos mais sustentáveis, reforçando a necessidade de soluções tecnológicas capazes de integrar essas fontes de forma eficiente. A Figura 1, apresenta a redução das emissões na União Europeia, indicando avanços na descarbonização. A Figura 2, mostra o crescimento das energias renováveis no Brasil, evidenciando seu potencial energético. Em conjunto, os dados demonstram que a transição energética ocorre de forma heterogênea, impulsionada por políticas climáticas e

disponibilidade de recursos naturais.

Figura 1 – Redução de Emissão de Gases Efeito de Estufa em Países da União Europeia em Toneladas de CO2 (tCO2)

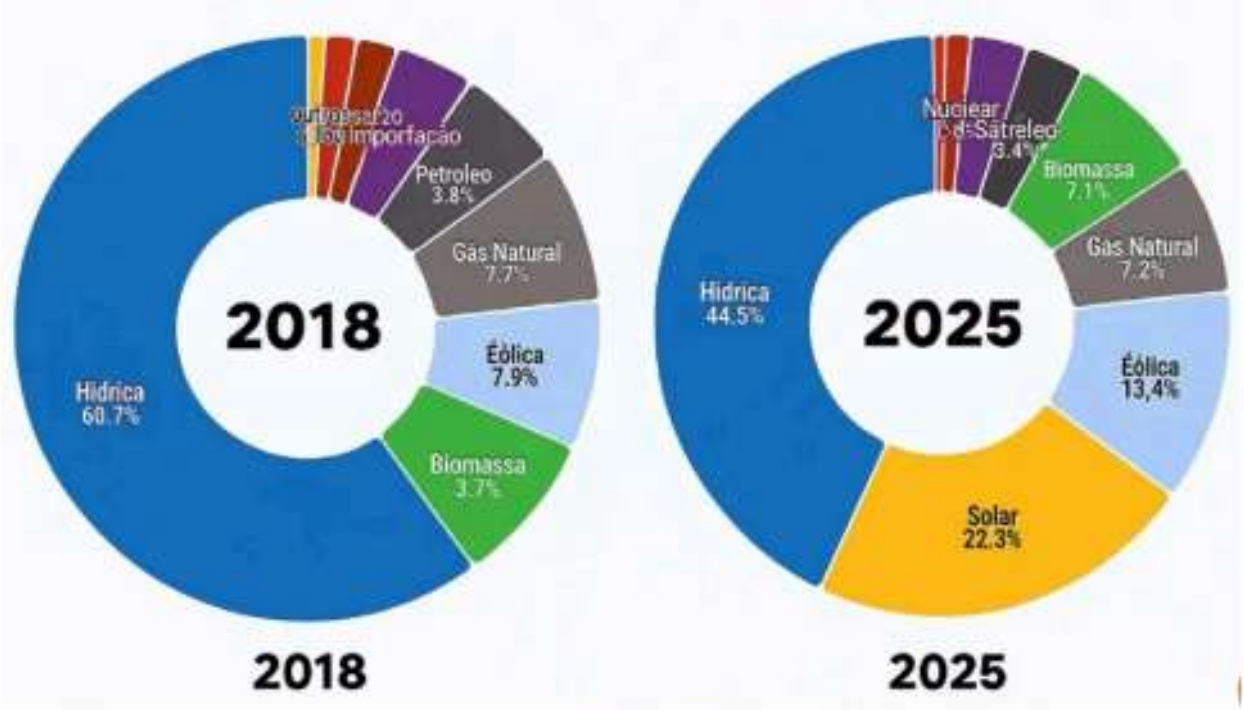


Fonte: Campana et al. (2025).

A *Internet of Energy* (IoE), surge da evolução do ecossistema da Internet das Coisas (IoT) aplicando seus princípios a gestão energética. Em sistemas elétricos, a IoE é vista como solução tecnológica para a modernização das redes elétricas tradicionais através da facilidade de integrar várias fontes de energias renováveis, baterias e fontes externas a sistema elétrico. A *Internet of Energy* (IoE) permite a criação de um sistema energético inteligente, onde dispositivos de comunicação, roteadores de energia e sistemas de armazenamento interagem em tempo real, garantindo maior confiabilidade e eficiência. No entanto, a complexidade técnica dessa integração e a necessidade de coordenar múltiplos fluxos de energia e dados configuram como problema central para a atualidade. O presente trabalho busca compreender o papel fundamental da IoE como vector para a transição energética, através da análise da sua evolução científica e arquitetura tecnológica, com destaque para a roteadores de energias.

A relevância deste trabalho de conclusão de curso reside na capacidade da IoE de transformar redes tradicionais em sistemas elétricos dinâmicos e resilientes, facilitando uma transição para economia de baixo carbono, por meio de uma análise detalhada da produção científica global e das tecnologias envolvidas, com este trabalho pretende-se demonstrar uma visão abrangente da IoE como solução para a transição energética através das redes elétricas

Figura 2 – Participação das energias renováveis na matriz energética do Brasil (2018–2025)



Fonte: Ecovalor (2026).

modernas, pela integração das fontes de energias sustentáveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Compreender o papel da *Internet of Energy* (IoE) na integração de fontes de energias, especialmente renováveis analisando sua evolução científica, sua aplicação tecnológica e seus impactos na transição energética.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a arquitetura e o funcionamento dos sistemas baseados na IoE, identificando seus principais componentes tecnológicos.
- Avaliar, por meio de estudos bibliométricos, a evolução científica e as tendências de pesquisas relacionadas à IoE.
- Investigar o potencial da integração de fontes de energia renováveis, considerando seus impactos na transição energética.

1.2.3 Justificativa

A crescente demanda por energia, impulsionada pelo crescimento acelerado da população em nível mundial e pelos desafios climáticos globais, tem intensificado a busca por soluções tecnológicas capazes de integrar e otimizar o uso de fontes renováveis. Nesse contexto, a *Internet of Energy* (IoE) surge como uma inovação estratégica para modernizar sistemas energéticos, permitindo monitoramento, comunicação e controle inteligente em tempo real. Segundo Biswas et al. (2025), esta tecnologia transforma redes convencionais em sistemas dinâmicos e interconectados, garantindo a maior eficiência operacional e tomada de decisões baseada em dados.

Do ponto de vista acadêmico, estudos bibliométricos indicam que a IoE constitui um campo multidisciplinar em rápida expansão, integrando áreas como *Smart Grid*, IoT, inteligência Artificial e energias renováveis. Com aplicação de tecnologias digitais, como os sensores inteligentes e medidores automáticos de energia, a IoE melhora significativamente a eficiência, a confiabilidade e a segurança das redes elétricas Mahadik, Gedam e Shah (2025).

Além disso, a IoE pode ser fundamental para solucionar desafios reais energéticos em regiões com grande potencial e disponibilidade de recursos renováveis, mas com limitações estruturais para seu aproveitamento. Diversos estudos indicam que a integração de fontes renováveis como solar,eólica, biomassa e sistemas de armazenamento (baterias), conectado às tecnologias digitais, constitui estratégias eficazes para reduzir os efeitos da intermitência e aumentar a estabilidade do fornecimento da energia elétrica em grandes regiões sem acesso à energia limpa e confiável.

Portanto, o estudo da IoE é de grande relevância, especialmente para o avanço tecnológico e energético. A compreensão do funcionamento de sua arquitetura, sua evolução científica e o seu impacto na integração de fontes renováveis é fundamental para o desenvolvimento de sistemas energéticos mais eficientes, resilientes e alinhados às demandas da transição energética.

1.3 Estrutura do Trabalho

A presente seção tem como objetivo apresentar a estrutura organizacional deste trabalho, de modo a orientar a estruturação dos capítulos e o encadeamento das ideias desenvolvidas. A Tabela 1, deste trabalho mostra de forma estruturada a organização deste trabalho e os objetivos procurados em cada parte da sua estruturação.

A organização do trabalho conforme a Tabela 1, visa apresentar de forma clara e objetiva como o trabalho está estruturado e os principais conceitos abordados ao longo da sua estruturação. Esse formato possibilita sintetizar informações desenvolvidas em cada seção do trabalho e resultados alcançados de forma resumida, contribuindo para evidenciar a coerência lógica da pesquisa, reforçar o rigor metodológico e a qualidade científica do estudo.

Tabela 1 – Organização e Estruturação do Trabalho

Capítulo	**Título**	**Objetivo**	**Conteúdo Principal**
Capítulo 1	Introdução	Apresentar o tema, contexto e relevância do estudo	Contextualização da situação energética atual, problemática de estudo, objetivo geral e específico e a justificativa
Capítulo 2	Referêncial Teórico	Fundamentação e apresentação da base teórica do trabalho	Conceitos sobre a Internet das coisas (IoT), *Internet of Energy* (IoE), Roteadores de energia e seus tipos, Smart Grid (SG), Comparação técnica entre *Internet of Energy* (IoE) e Smart Grid (SG),Trabalhos relacionados ao tema do estudo, Aspectos regulatórios e econômicos sobre a IoE e fundamentos sobre a Transição Energética
Capítulo 3	Metodologia	Descrever como a pesquisa foi realizada	Tipo da pesquisa, métodos usados, coletas de dados, ferramentas de análise e critérios de avaliações aplicados
Capítulo 4	Resultados bibliométricos e avanços sobre a transição energética	Apresentar e analisar os resultados obtidos	Interpretação dos gráficos simulados e dados recentes sobre a transição energéticas
Capítulo 5	Conclusão	Síntese dos principais constatações da pesquisa, recomendações e trabalhos futuros	Resumo dos resultados, Proposta ao problema da pesquisa, Contribuições do trabalho, limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras

Fonte: Autoria Própria, 2026

2

Referencial Teórico

Nesta seção do referencial teórico, são apresentados os fundamentos teóricos que sustentam a discussão deste trabalho. São apresentados os principais conceitos e arquiteturas das principais tecnologias relacionadas à área do estudo *IoT e IoE*, definições das redes elétricas inteligentes *Smart Grids* e suas estruturas elétricas, assim como as suas diferenças em relação à *Internet of Energy(IoE)* e fundamentos sobre o cenário atual da transição energética no contexto da evolução da tecnologia da *Internet of Energy* (IoE).

No decorrer desta seção foram analisados os trabalhos relacionados dos outros autores que contribuírem para o estudo dessa temática . Esta parte do trabalho tem como propósito discutir as contribuições de diferentes autores sobre os temas relevantes no estudo de IoE e os debates atuais na literatura sobre as principais tecnologias de gestão e estudo de redes elétricas inteligentes utilizando a internet para sua gestão e otimização.

2.1 Conceito da Internet das Coisas (IoT): Fundamentos e o seu Ecossistema Tecnológico

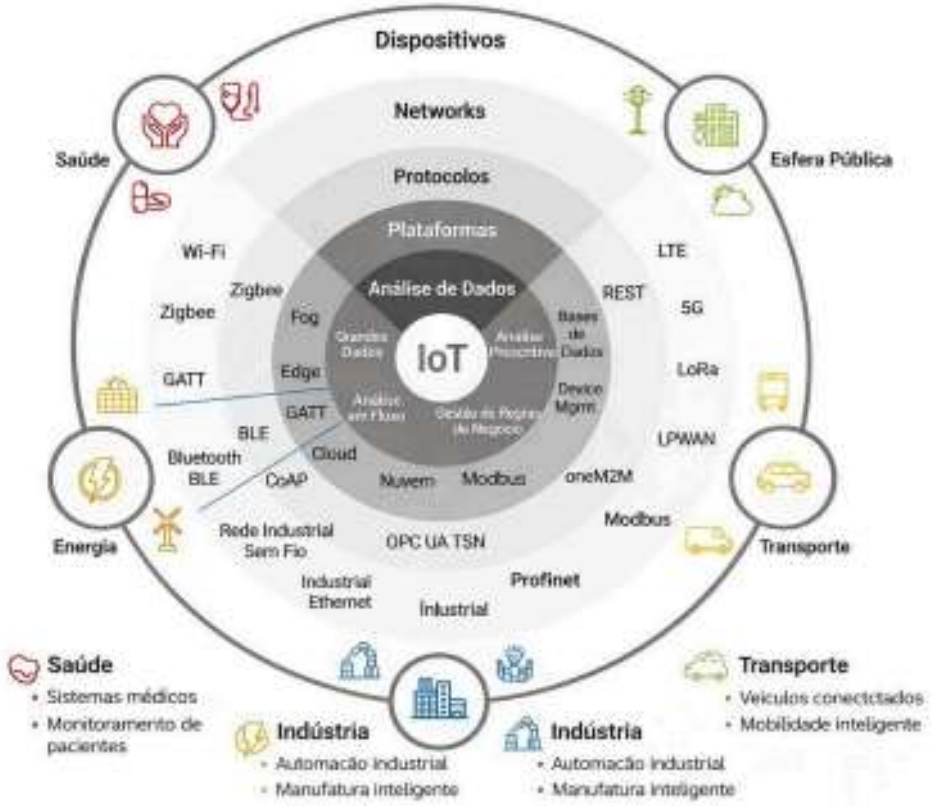
De acordo com Silva (2021), os objetos no nosso cotidiano estarão cada vez mais conectados no futuro próximo, permitindo desta forma que geram, trocam informações, processam os dados e interajam entre si por meio da Internet.

Silva (2021), define a Internet das Coisas (IoT), como um ecossistema onde diversos dispositivos ou objetos estão conectados a uma rede de comunicação que faz uso de protocolos computacionais para estabelecer a comunicação entre todos os objetos conectados no sistema por meio de plataformas de *middleware*, que permitem realizar análise, o processamento e a execução das informações recebidas.

Paralelamente, Kikuchi, Betteri e Araújo (2021) em suas abordagens enfatizam que o

potencial desta tecnologia (IoT), vai além da automatização dos sistemas e detecção de falhas, trata-se de um ambiente que depende da integração de grande números de objetos ou dispositivos conectados por meio de tecnologias digitais. Na Figura 3, deste trabalho é apresentado o ecossistema geral de estruturas da Internet das Coisas (IoT).

Figura 3 – Ecossistema geral de Internet das Coisas *IoT*



Fonte: Silva (2021).

Como mostra a Figura 3, a IoT é um ecossistema abrangente que integra múltiplos componentes, camadas e domínios aplicados. Observa-se no centro da Figura 3 o núcleo da IoT, se configura como a parte central dessa tecnologia, onde se realizam processos de análise de dados e gerenciamento dos dispositivos. Essa parte forma a base tecnológica permitindo que os objetos, sensores e sistemas se comuniquem entre si de maneira automatizada e eficiente.

Ao redor do núcleo central observa-se a camada de comunicação formada por plataformas e protocolos que estabelecem a comunicação, entre os quais destacam-se as redes e dispositivos inteligentes que permitem esse processo por meio de tecnologias Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth, arquiteturas de rede de área ampla e baixo consumo de energia, quinta geração de redes móveis (5G), ethernet industrial e alguns protocolos específicos. Destaca-se a caraterística multisetorial dessa tecnologia, conforme definido por Kikuchi, Betteri e Araújo (2021) trata-se de um ecossistema que precisa de incorporar diversos elementos, entre os quais destacam-se as áreas importantes (energias, indústria, transporte e esfera pública), todos são os sectores que compõem o ecossistema de IoT.

Apesar de constituir um ecossistema amplo de aplicabilidade, o foco principal deste estudo é a demonstração de uma de suas aplicações específicas aplicada no setor energético denominada a *Internet of Energy (IoE)*. A *Internet of Energy (IoE)* é uma parte que emerge como um ramo especializado de IoT, com foco exclusivo para integração, monitoramento e gestão inteligentes dos sistemas energéticos. Esse paradigma evidencia que essa área não é uma tecnologia isolada, mas um campo específico que deriva da Internet das Coisas (IoT) aplicada ao sector energético e adota os mesmos princípios de comunicação, conectividade entre diversos dispositivos utilizando medidores inteligentes de energia ou roteadores de energia *(Energy router)*, que gerenciam o sistema desde a geração, transmissão, distribuição, consumo e comercialização de energia elétrica.

Portanto, ao observar as diversas tecnologias e as camadas que compõem um ecossistema de IoT, é possível compreender que a IoE é uma tecnologia que pode formar redes energéticas robustas, eficientes além de integrar diversos dispositivos que realizam medições inteligentes, como sensores de tensão e corrente, dispositivos de automação e plataformas de análise, para a criação de ambientes energéticos confiáveis e sustentáveis.

2.2 *Internet of Energy* (IoE): Conceito, Arquitetura e sua Evolução

2.2.1 Conceito da *Internet of Energy*(IoE)

De modo geral, existem várias definições sobre o conceito de *Internet of Energy* (IoE). Segundo Hussain et al. (2020), à medida que os estudos avançam sobre o tema pesquisadores propuseram várias definições. Na Tabela 2, estão listados os principais conceitos sobre a definição de *Internet of Energy*(IoE), com base nas definições proposta por alguns autores ao longos dos anos.

Com base nas definições apresentadas na Tabela 2, a definição proposta por Hafiz Majid Hussain em 2020 é a mais recente sobre a natureza da estrutura arquitetônica da *Internet of Energy* (IoE) . A definição desses autores engloba as partes físicas, como as estruturas de geração de energia e partes digitais que requerem o uso de software para realizar monitoramento, armazenamento e análise de dados em tempo real.

2.2.2 Arquiteturas da *Internet of Energy* (IoE)

Conforme apresentado por Hussain et al. (2020), a *Internet of Energy* (IoE), representa uma evolução dos sistemas energéticos, impulsionada por eletrificação, digitalização e pela integração de tecnologias de comunicação. Com base na mesma perspectiva do autor, apesar de envolver dispositivos inteligentes para monitoramento em tempo real, automação e comunicação bidirecional, características semelhantes às de uma rede elétrica inteligente *Smart Grid*, a IoE

Tabela 2 – Evolução do Conceito de Internet of Energy

Ano	Nome de Autor	Definição de *Internet of Energy (IoE)*
2007	Declan Butler	É uma rede Inteligente ou uma característica essencial de redes inteligentes.
2008	Tsoukalas e Gao	É uma implementação de redes inteligentes onde a energia flui de fornecedores para clientes, como pacotes de dados na internet.
2015	Gheorghe Florea	É uma rede inteligente baseada na Web.
2016	Kafle et al.	É uma forma avançada de redes inteligentes e a analogia entre redes de Internet e redes de energia
2020	Hafiz Majid Hussain	Um sistema cyber físico no qual estruturas físicas de energia renováveis distribuídos fisicamente são interconectados e gerenciados por meio de uma rede cibernética de energia definida por Software, utilizando técnicas de gerenciamento de energia em pacote.

Explorado no trabalho de Hussain et al. (2020).

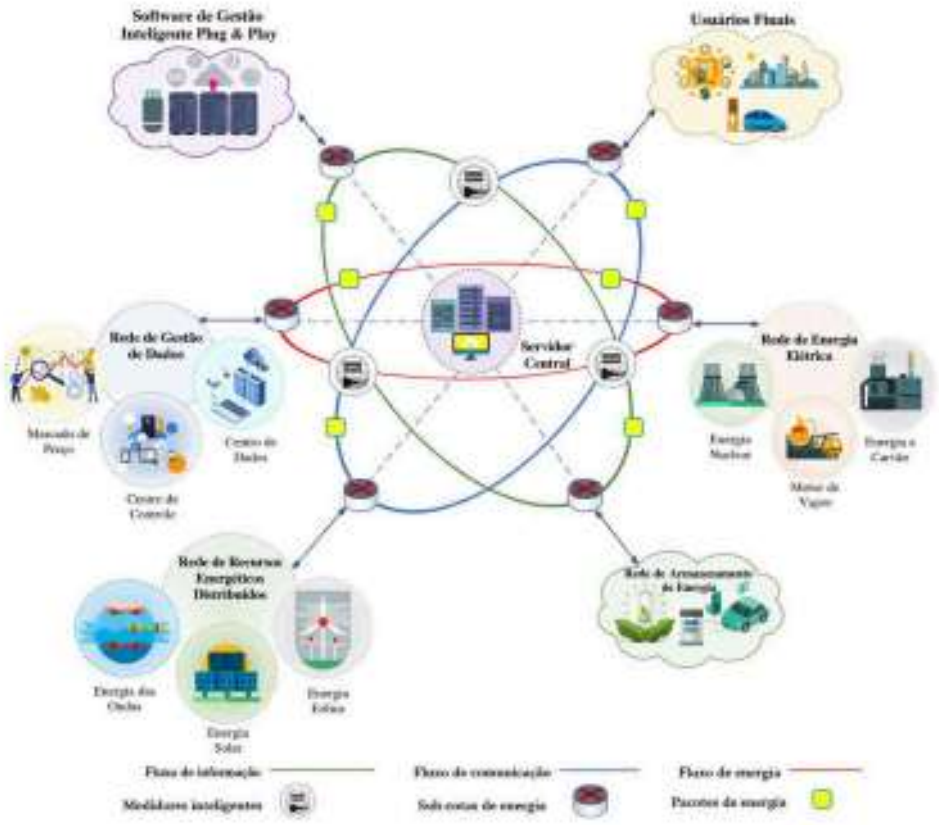
é uma tecnologia mais evoluída conceitualmente em relação a redes elétricas inteligente. Isso ocorre porque a IoE, é uma tecnologia que apresenta maior amplitude tecnológica e capacidade de operação. Essa vantagem tecnológica de IoE decorre do uso de roteadores de energia (*Energy Router*), dispositivo capaz de rotear o fluxo energético semelhante ao tráfego de dados na internet, possibilitando a integração de múltiplas fontes de energia, múltiplas redes, bem como novos modelos de mercados locais e transações *peer-to-peer* (P2P).

A Figura 4, apresenta uma visão integrada da arquitetura geral da *Internet of Energy* (IoE) mostrando a integração de múltiplas fontes renováveis de energia conectadas a tecnologias digitais. Observa-se a usina de geração termelétrica, sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas, microrredes (microgrids), carregadores de veículos elétricos,baterias de armazenamento e edifícios energéticos inteligentes todos ligados a um ponto, estabelecendo assim uma comunicação multidirecional de fluxo de energia e informação. Além dessa arquitetura principal, diversos autores propuseram diferentes modelos arquitetônicos para (IoE). Na Tabela 3, são apresentadas, de forma conceitual outras arquiteturas da IoE sob a perspectiva dos diversos autores.

Dessa forma, observa-se as diferentes arquiteturas de IoE convergem para um objetivo, que é promover sistemas energéticos mais inteligentes,descentralizados, confiáveis e eficientes, contribuindo estrategicamente para a transição energética. Deste modo, os autores Huang et al. (2024), apresentaram uma arquitetura moderna da *Internet of Energy* (IoE) para sistemas elétricos, apresentando suas camadas de funcionamento e seus principais dispositivos de comunicação, conforme apresentado na Figura 5 .

A Figura 5, mostra a arquitetura conceitual da *Internet of Energy* (IoE), com a integração de tecnologias de TIC a sistemas eléctricos. Na Figura 5, observa-se servidores (Base de dados, web e diretório) conectados à nuvem da Internet permitindo monitoramento, controle e gestão de

Figura 4 – Arquitetura Geral de *Internet of Energy IoE*



Fonte: Hussain et al. (2020).

dados do sistema energético em tempo real, nos terminais dos usuários encontra-se os sistemas de distribuição de energia que comunicam-se por meio de *Energy Router*, através de redes- LAN (Rede local que conecta os dispositivos em uma área geográfica pequena) e Rede WAN (Redes de longa distância que conecta dispositivos localizados geograficamente distantes).

Do ponto de vista elétrico, esta Figura 5, integra as fontes tradicionais e distribuídas de geração, as linhas de transmissão de energia e as de distribuição, que são gerenciados por roteadores de energia (*Energy Router*) que permitem a realização do fluxo bidirecional de energia e informação. Essa estrutura evidencia o papel da IoE na coordenação inteligente de geração, transmissão e consumo de energia, sendo um sistema fundamental e flexível para a transição energética baseada em fontes renováveis.

Conforme apresentado por Hussain et al. (2020), a *Internet of Energy* (IoE) representa uma evolução dos sistemas energéticos, impulsionada por eletrificação, digitalização e pela integração de tecnologias de comunicação. Com base na mesma perspectiva do autor, apesar de envolver dispositivos inteligentes para monitoramento em tempo real, automação e comunicação bidirecional, características semelhantes às de uma rede elétrica inteligente *(Smart Grid)*, a *Internet of Energy* é uma tecnologia mais evoluída conceitualmente em relação a redes elétricas inteligentes.

Tabela 3 – Outras Arquiteturas de IoE

Referência	Modelo Arquitetônico	Principais Tecnologias	Caracteristicas da Arquitetura	Aplicações
Lakhan et al. (2024)	Arquitetura baseada em Blockchain	Blockchain, IoT, Smart Sensors	Estrutura descentralizada com segurança Criptográfica, gerenciamento de dados energéticos e transações *per - to - per*	Smart home, Veículos elétricos e smart Grid
Hugh e Soria (2025)	Arquitetura multicamada (edge, cloud e Fog)	IoT, edge, computing, IA, Blockchain	Sistemas que pode crescer facilmente,com processamento feito em várias partes, respostas rápidas e apoio a decisões mais eficientes	Redes Inteligentes, Cidades Inteligentes e respostas a demanda
Laroussi, Huan e Xiusheng (2023)	Arquiteturas em camadas de sistema elétrico	IoT, Blockchain, sistemas digitais	Integração entre geração, transmissão e consumo com digitalização completa do sistema energéticos	Mercado energéticos digitais e gestão de energia

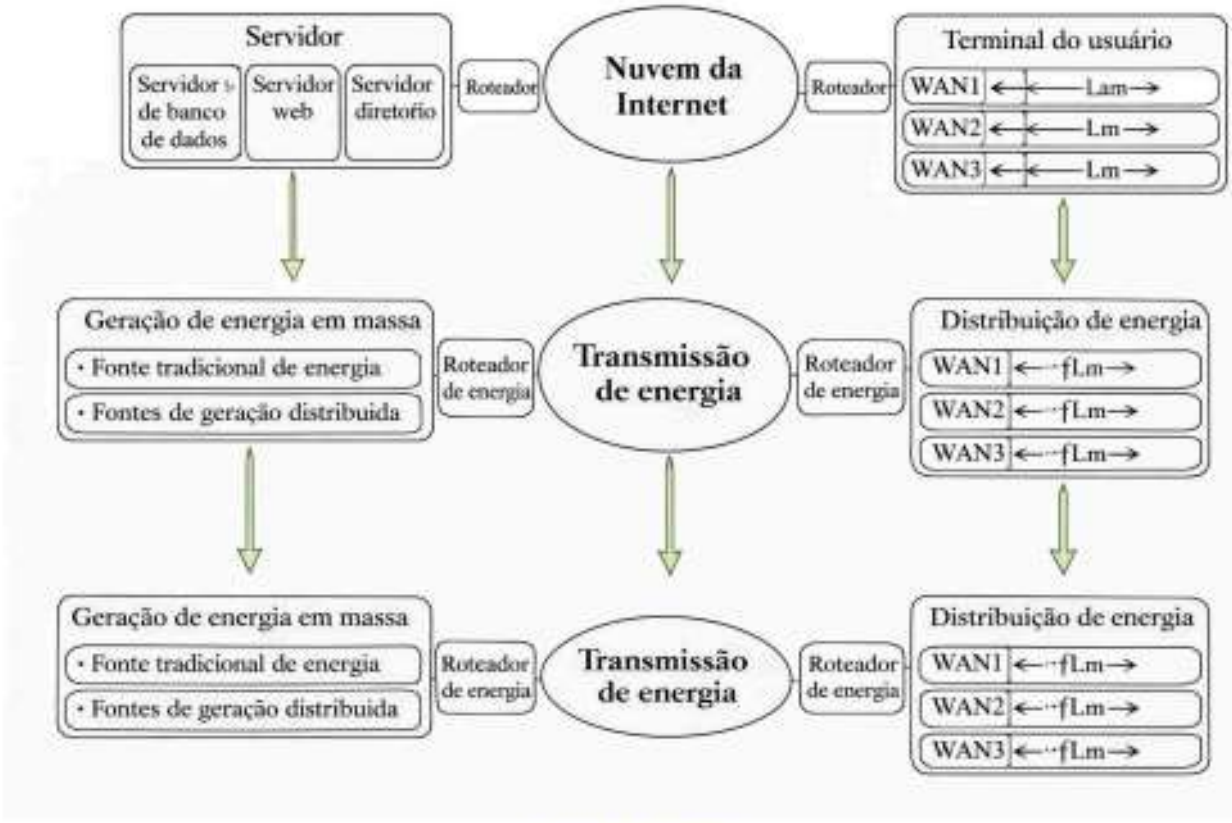
Fonte:Lakhan et al. (2024), Hugh e Soria (2025), Laroussi, Huan e Xiusheng (2023).

2.2.3 Evolução da Tecnologia de *Internet of Energy(IoE)*

A *Internet of Energy (IoE)*, evoluiu através do aprimoramento conceitual e tecnológico ao longo de aproximadamente duas décadas, na tentativa encontrar um sistemas energéticos convergentes às tecnologias digitais. Sua evolução compreende-se a partir de marcos teóricos e iniciativas tecnológicas ao longo das últimas décadas. Segundo Hussain et al. (2020), os primeiros registros do conceito de *Internet of Energy* (IoE) ocorreram no ano 2004, quando a revista *The economist* apresenta uma visão preliminar de uma rede energética baseada na ideia da internet, caracterizado pelo fluxo bidirecional de energia e informação, com a utilização de sensores para monitoramento da rede.Com essa ideia, surgiu a base para a digitalização do sistema elétrico através da *Internet of Energy (IoE)*.

Em 2008, nos EUA os autores Tsoukalas e Gao, aprofundaram a base conceitual de IoE.

Figura 5 – Arquitetura Específica de *Internet of Energy(IoE) no sistema elétrico*



Fonte: Huang et al. (2024)

A definição desses autores baseia-se na proposta de transição de redes elétricas tradicionais para arquiteturas inteligentes de energia. Essa proposta possui como objetivo a medição inteligente e previsão da carga para a eficiência operacional e o equilíbrio entre a demanda e a oferta de energia.

Através dessas bases conceituais, em 2010 a Alemanha lançou a sua iniciativa de digitalização de sua rede elétrica, e desenvolveu o projeto que promove a digitalização do sistema energético por meio de tecnologias da informação e comunicação, esse avanço foi essencial para a viabilidade da gestão energética utilizando sistemas digitais nos sistemas energéticos. No mesmo ano, nos EUA, foi desenvolvido o sistema FREEDM *(Future Renewable Electric Energy Delivery and Management)*, um sistema que conecta as fontes renováveis de energia, armazenamento e cargas de forma inteligente. Esse sistema fortalece a característica da *Internet of Energy (IoE)*, sendo a base para o desenvolvimento e estrutura da arquitetura dessa tecnologia.

A partir de 2011, a China intensificou sua atuação nesse campo, com o início das pesquisas nacionais voltadas à automação e a integração digital dos sistemas energéticos. Precisamente em 2013, surgiu na China a iniciativa de estudo sobre redes energéticas futuras pela incorporação de novas tecnologias aos sistemas de geração e transmissão de energia alinhada aos princípios da sustentabilidade e da inovação tecnológica.

Em 2015 na China foi criada a fundação *GEIDCO (Global Energy Interconnection*

Development and Cooperation Organization) uma organização internacional que promove a interconexão de energias limpas por meio de tecnologias digitais. Essa fundação chinesa propôs uma ideia de interconexão energética em escala global como uma estratégia para promoção da eficiência e da segurança para a intermitência energética. Com essas iniciativas que se estende ao longo das décadas, a IoE alcançou relevância internacional e apresenta-se como solução para os desafios da transição energética.

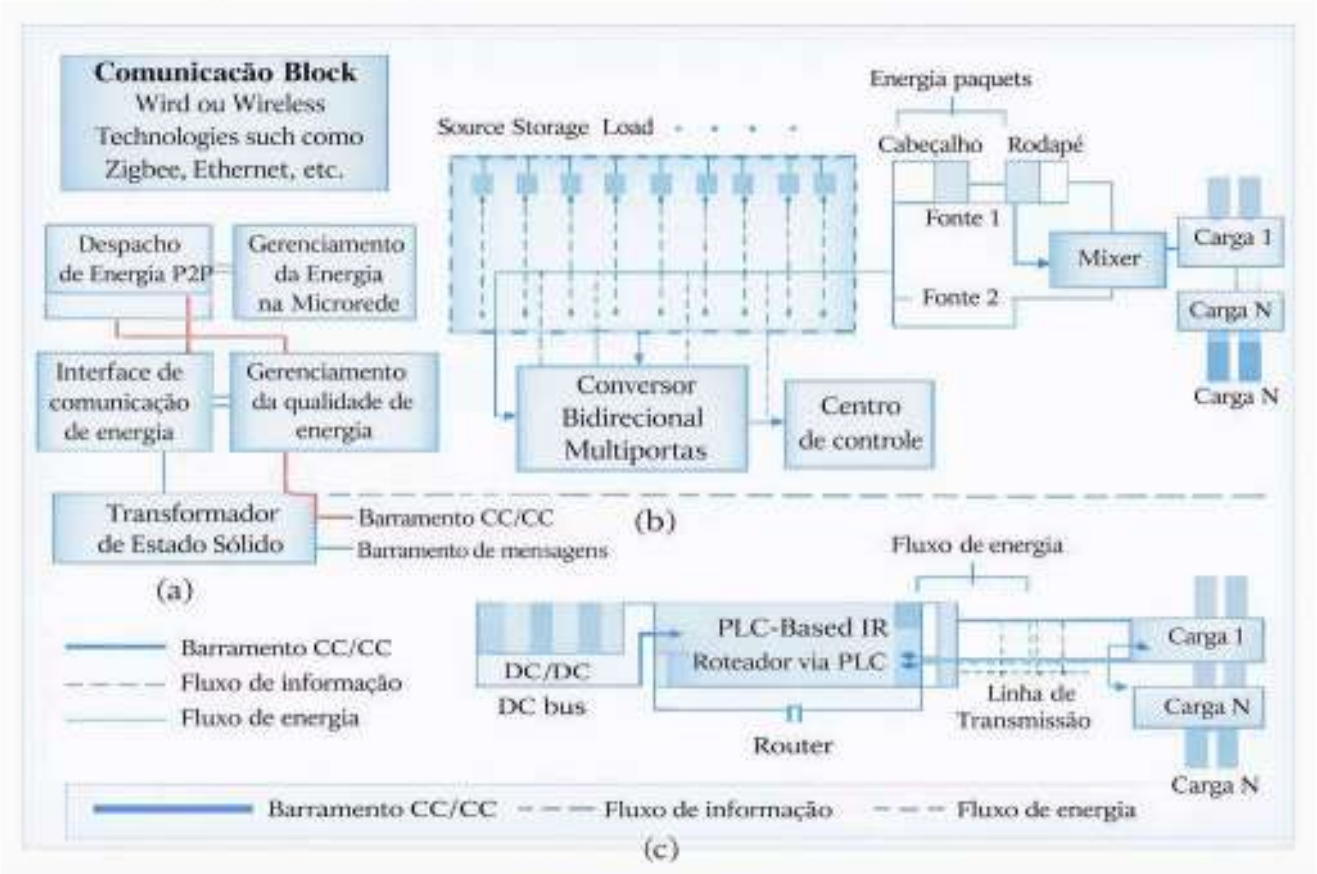
2.3 Roteadores de Energia, Tipologia e Aplicações

O roteador de energia, é um elemento central da IoE, responsável por coordenar o fluxo elétrico de energia e das informações, atendendo diversas demandas dentro da estrutura de IoE Ma et al. (2017). De acordo com Huang et al. (2010), no contexto da *Internet of Energy (IoE)* a tipologia de *Energy Router* mais adequada para seu funcionamento é representada por transformadores de estado sólido (*Solid - State- Transformer*) (SSTs), que são máquinas que realizam a conversão e o controle de energia, bem como um conjunto de projetos que contemplam a integração de módulos dedicados à conversão de energia, ao gerenciamento energético e à comunicação. Do modo geral, existem vários tipos de modelos de *Energy Router*, cada um com as suas características adaptadas a cada situação. Na figura a seguir estão apresentadas as três principais tipologias de *Energy Router*.

Ao analisar a Figura 6, a *Energy Router* possui três tipologias, cada uma com seus componentes e modelos de funcionamento, entre os quais destacam-se os seguintes tipos de roteadores de energia: Figura (a):Roteador de energia baseado em transformador de estado sólido; Figura (b): Roteador de Energia baseado em conversor multiportas; Figura (c): Roteador de Energia baseado em comunicação por linha de potência. Para melhor compreensão do funcionamento das tipologias de Energy Router, seus componentes, funções e aplicabilidade no estudo de *Internet of Energy(IoE)*, foram analisados os trabalhos de alguns autores sobre a natureza e aplicabilidade de cada uma dessa tipologias. Na Tabela 4, está apresentado um detalhamento da função e vantagens dos tipos de *Energy Router*.

O funcionamento da *Internet of Energy*(IoE), depende de transformadores no estado sólido (SSTs). Uma vez que, com base na sua definição de sua função por Zhang, Wang e Bhattacharya (2012), esse modelo de transformador atua como interface inteligente entre a rede e o barramento DC. Além disso apresenta vantagens para um sistema integrado a IoE, pela alta eficiência que apresenta, suporte a comunicação e controle digital, sendo, portanto, o mais adequado para funcionamento da *Internet of Energy*(IoE).

Figura 6 – Tipologias de *Energy Router* da *Internet of Energy IoE*



Fonte: (HUSSAIN et al., 2020)

2.3.1 Modelo da arquitetura de *Internet of Energy* (IoE), destacando o papel fundamental da *Energy Router*

Na Figura 7, está apresentado o modelo funcional da *Internet of Energy* (IoE) destacando a *Energy Router* como elemento central de interligação entre os principais subsistemas que compõem essa tecnologia. Os três principais subsistemas de IoE destacam o papel de roteador de energia (*Energy Router*) no funcionamento desse sistema energético.

O subsistema de energia *(Energy Subsystem)* é o sistema responsável pela geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, incluindo as fontes convencionais e renováveis. Este subsistema interage diretamente com roteadores de energia através de mecanismos de controle e transmissão de energia.

O subsistema de comunicação *(Network Subsystem)*, por sua vez é o subsistema responsável pela viabilizar a troca de dados entre diferentes componentes de IoE, garantindo a conectividade, a confiabilidade e eficiência na transmissão das informações.

O Subsistema de informação *(Information Subsystem)* é o sistema que responsabiliza pela coleta, processamento e análise de dados, realizados por sensores, medidores inteligentes e dispositivos conectados, esse subsistema é fundamental para a tomada de decisões inteligentes,

Tabela 4 – Funções e Aplicações dos Tipos de *Energy Router*

Tipo	**Descrição**	**Função (IoE)**	**Vantagens**	**Referência**
Figura(a): Transformador em estado sólido (SST)	Transformador totalmente eletrônico, capaz de realizar a conversão e controle digital	Atua como interface inteligente entre rede e barramento DC; Permite fluxo bidirecional e comunicação integrada.	Alta eficiência; Possui Suporte a Comunicação; Realiza controle digital; Ideal para IoE e microgrids	Zhang, Wang e Bhattacharya (2012)
Figura(b):Conversor multiportas bidirecional(MBC)	Possui múltiplas entradas e saídas para integração de fontes, armazenamento e cargas.	Gerenciamento e roteamento de fluxos energéticos, coordena as baterias, PV e cargas, ajusta os níveis de tensão DC/ DC	Útil para suporte a integração distribuída de fontes; Essencial para sistemas de DC	Tashiro, Takahashi e Hikihara (2012)
Figura (c): Roteadores baseados em comunicação por linhas de Energia	Dispositivos que roteiam endereçamento de energia em pacote, usando a comunicação por linha de potência.	Realiza o roteamento tipo (internet), armazena e distribui pacotes energéticos para onde é destinado.	Realiza despacho P2P; Integra a energia e informação	(GUO et al., 2016)

Fonte:Zhang, Wang e Bhattacharya (2012),Tashiro, Takahashi e Hikihara (2012),Guo et al. (2016).

Figura 7 – Modelo Funcional de *Energy Router*



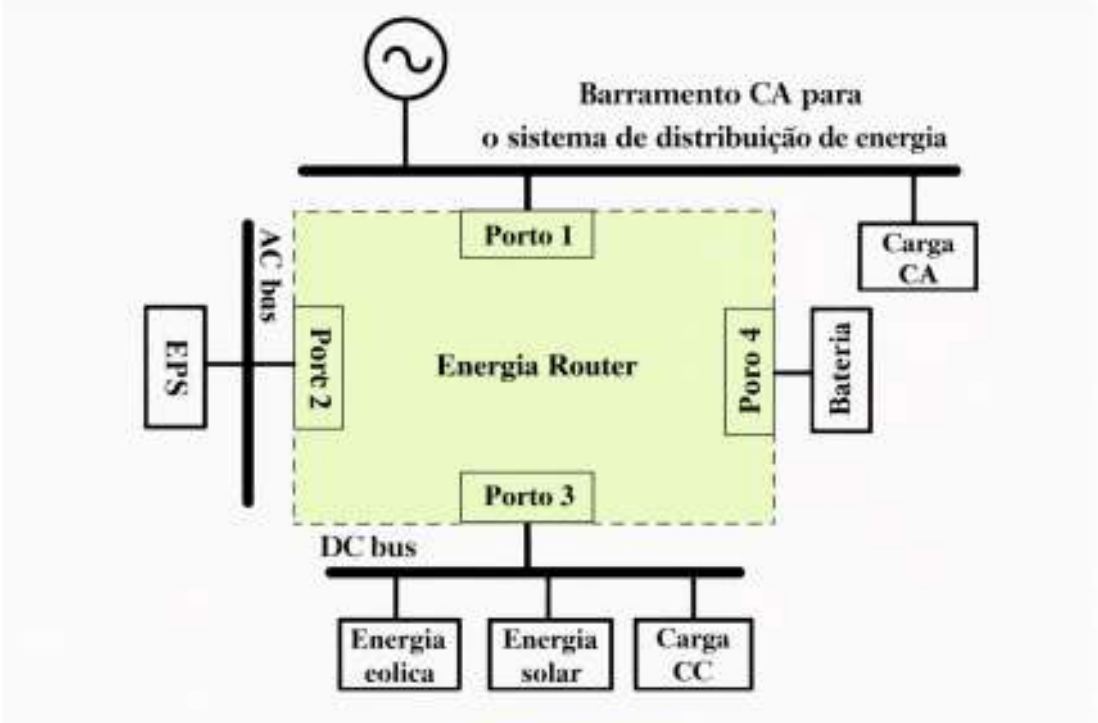
Fonte: Huang et al. (2024)

como otimização do consumo, previsão da carga e integração eficiente de fontes renováveis

2.3.2 Mecanismos da Integração dos Diferentes Fontes e Cargas com Roteadores de Energia no Sistema de IoE

A Figura 8, apresenta a *Energy Router* aplicada a sistemas de integração de energia em corrente contínua (DC) e alternada (AC), o que evidencia sua capacidade de integrar várias fontes de energia, dispositivos de armazenamento e diferentes tipos de cargas em uma única estrutura energética. Nesta figura apresenta uma arquitetura da IoE com funcionamento da *Energy Router* com múltiplas portas para integrar diferentes fontes de energia em corrente alternada e corrente contínua AC/DC, evidenciando a integração eficiente em sistemas híbridos. Nesse modelo, o barramento em corrente alternada (AC) na Porta 1 permite a conexão com a rede elétrica convencional e o barramento da Porta 3 em corrente contínua (DC bus) conecta fontes renováveis, como energia solar e eólica, e uma carga em corrente contínua; esta integração reduz as perdas associadas às conversões de energias das fontes para a corrente alternada. A *Energy Router* atua como centro de controle inteligente dessas fontes conectadas em dois barramentos diferentes, gerenciando o fluxo bidirecional de energia entre as fontes conectadas desde a geração, o consumo, o armazenamento e a rede elétrica.

Figura 8 – Mecanismos de Integração de Fontes de Energia com *Energy Router* em Sistema Híbridos



Fonte: Huang et al. (2024)

Na Porta 4 desse sistema, pode - se observar a presença de bateria sendo uma fonte que possibilita o armazenamento de excedentes e o fornecimento em momentos de baixa geração, aumentando a confiabilidade do sistema. Por fim, na Porta 2 , há uma conexão com uma fonte externa (EPS) projetado como a fonte emergencial, para garantir a compensação de cargas em

situações críticas.

Portanto, no contexto da IoE essa arquitetura com a *Energy Router* controlando todo sistema potencializa a comunicação em tempo real, tomadas de decisões automatizadas, otimização do consumo energético e maior eficiência energética, elementos fundamentais para acelerar a transição energética rumo a sistemas mais sustentáveis e de baixo carbono. Além disso, favorece a integração de fontes renováveis, redução de combustíveis fósseis e promove a descentralização da geração de energia. Dessa forma, esse sistema contribui para construção de redes elétricas resilientes, inteligentes e sustentáveis, posicionando a IoE como a tecnologia estratégica para a transição energética e intermitências das fontes renováveis.

2.4 *Smart Cities* com tecnologias de gerenciamento de energia através de IoT e IoE

No contexto de *Smart City*, foi realizada uma pesquisa para verificar quais países e cidades estão aplicando os sistemas inteligentes baseados em Internet das Coisas(IoT) que serve como a base de *Internet of Energy (IoE)*, para monitoramento e gestão de sistemas de iluminação, gerenciamento de recursos energético com aplicação dessas tecnologias. Na Tabela 5, estão organizadas as principais cidades, o nome do projeto, os tipos de serviços , descrição do tipo de projeto e as tecnologias envolvidas para gerenciamento das coisas e sistemas de iluminação da cidade.

Com base nos dados da Tabela 5 é evidente que a implementação de tecnologia IoT e IoE no contexto de Smart Cities ultrapassa sua dimensão tecnológica e consolida-se como pilar da gestão energética nas principais cidades com aplicação dessa tecnologia. Cidades como Amsterdã e Hangzhou têm focado na eficiência da iluminação pública e redes inteligentes, enquanto que o projeto de Copenhague City e projeto em Nova Iorque expandem essa tecnologia para melhorar a climatização e mobilidade elétrica. Essa tecnologia demonstra a inteligência urbana das cidades aplicada à gestão energética dessas cidades para otimização e consumo de energia, mas destaca-se também como vetor fundamental para a descarbonização e autonomia energética das metrópoles urbanas

2.5 Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grid*)

As redes elétricas inteligentes *Smart Grids*, são sistemas modernos de distribuição de energia elétrica, que utilizam tecnologias digitais avançadas como sensores para monitorar, controlar e otimizar o fluxo de energia em tempo real Biswas et al. (2025). De uma forma mais abrangente conforme Hussain et al. (2020), as redes elétricas inteligentes são uma evolução das redes elétricas tradicionais, constituem rede mais avançada que incorpora as sensores de

Tabela 5 – Cidades com aplicação da tecnologia de IoT e IoE para gestão de energia

Cidade(País)	**Projeto**	**Serviço**	**Descrição**
Amsterdam(Holanda)	Amsterdam smart City	Smart Grid, energia descentralizada, iluminação inteligente	Projeto urbano que usa sensores e redes inteligentes para monitorar consumo, otimizar uso de energia e iluminação pública
Copenhaga(Dinamarca)	Smart City Copenhaga	Aquecimento, resfriamento inteligente e iluminação Inteligente.	Sistema de aquecimento, refrigeração com IoT para reduzir emissões, Iluminação pública controlada por sensores
Seoul (Coreia do Sul)	Plano de ação de energia sustentável em Seoul.	Autonomia energética urbana e geração distribuída.	Integração de IoT para reduzir dependência energética e melhorar a eficiência nos bairros, através da inclusão da energia solar
New York City(EUA)	NYC smart City	Edificações Inteligente, mobilidade elétrica, eficiência energética	Uso de IoT, para reduzir CO2, melhorar eficiência de edifícios e apoiar a infraestrutura de veículos elétricos
Dubai	Dubai cidade sustentável	Energia renováveis e Smart Grid aplicadas a IA	Integração da Energia solar a medidores Inteligente, aplicação de IA e IoT para a redução de consumo e modernização da infraestrutura energética
Hangzhou (China)	City Brain	Gestão Inteligente de Energia urbana e iluminação pública	Monitoramento em tempo real de consumo energético urbano e iluminação controlada de forma adaptativa ajustando a luminosidade conforme fluxo de pessoas eou condições ambientais

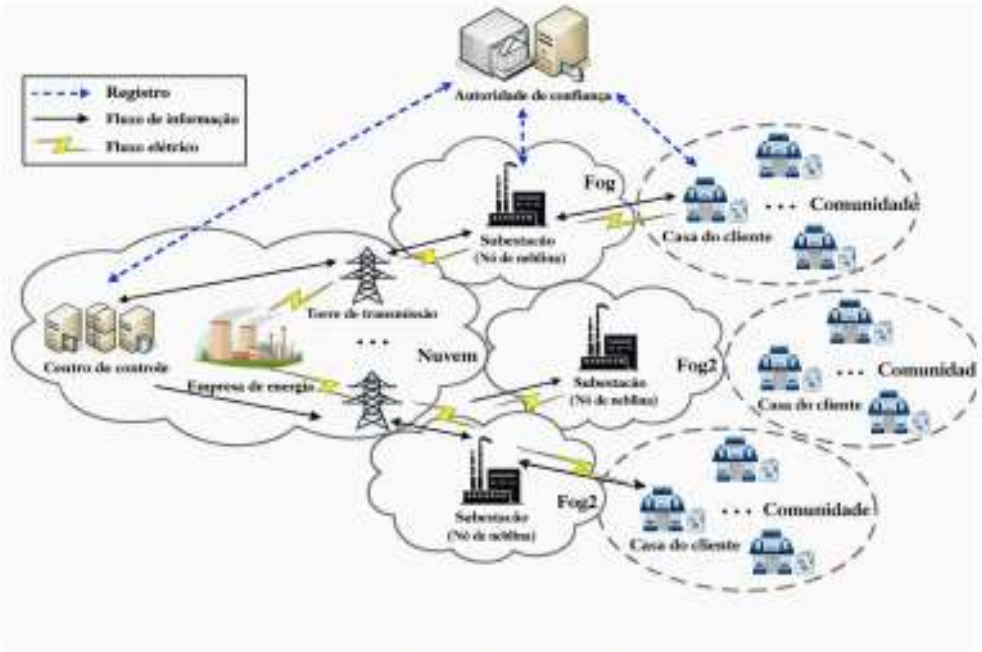
Fonte:Capra (2019), Wolniak (2023), Codes et al. (2014),Shah, Kothari e Doshi (2019),Zhang et al. (2019)

medição que permitem controlar o sistema elétrico, otimizando o sistema na geração, transmissão e distribuição de energia de forma eficiente.

A ideia de digitalização das redes elétricas inteligentes começou em meados do século XIX, quando Nicola Tesla propôs um sistema de corrente alternada (CA) flexível para o sistema elétrico, e a partir dessa perspectiva abriram-se caminhos para o desenvolvimento das tecnologias para as redes elétricas inteligentes, Maloberti et al. (2016). A partir do século XX, teve início o período que marcou as grandes pesquisas científicas e interesse no estudo de redes elétricas inteligentes. Nesse século os pesquisadores começaram a direcionar seus estudos sobre as redes elétricas inteligentes com foco na integração de comunicação com tecnologias digitais e automação da infraestrutura da rede elétrica tradicional,(FANG et al., 2011).

A implementação prática das redes elétricas inteligentes teve seu início no século XXI principalmente nos EUA. De acordo com Al-Shetwi et al. (2025) foi a partir desse período que o governo dos EUA iniciou financiamentos voltados à digitalização da rede elétricas inteligentes. Segundo o mesmo autor, as concessionárias de energia começaram a adotar sistemas de controle inteligente junto aos consumidores, através da instalação de medidores inteligentes e automação da rede de distribuição de energia até os consumidores finais. A Figura 9 deste trabalho, apresenta uma visão da arquitetura das redes elétricas inteligentes baseado em sistema de computação em névoa.

Figura 9 – Arquitetura de Redes Elétricas Inteligentes *Smart Grid*



Fonte: (BISWAS et al., 2025)

Na Figura 9, é apresentado o modelo de uma rede elétrica inteligente que apresenta as três principais estruturas (concessionária, sistema de transmissão e distribuição, consumidores). No centro da Figura 9, encontram-se as concessionárias de energia, que são responsáveis pela

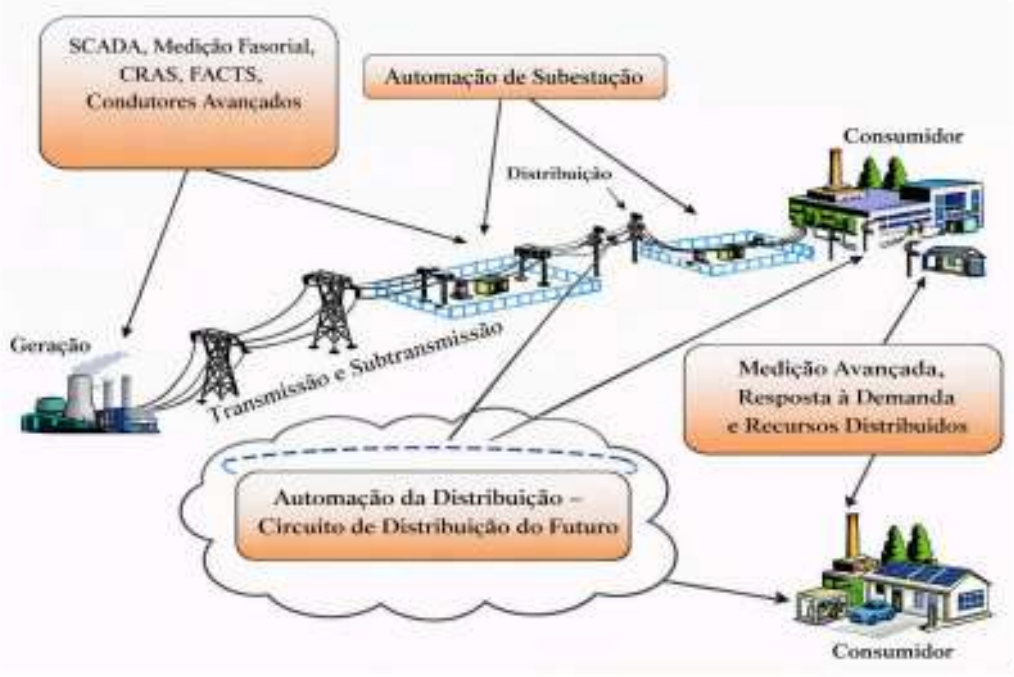
coordenação da rede elétrica e controle do fluxo energético até os centros de distribuição, através da conexão das linhas de transmissão e de distribuição.

Nos *Smart Grid* diferentemente da infraestrutura das redes elétricas tradicionais, na subestação de distribuição dos *Smart Grids*, existem sistemas digitais que permitem o processamento em tempos real e de informações locais. Essa parte funciona como uma ponte entre a nuvem central e as comunidades. Na parte terminal do sistema encontram-se os consumidores finais (residências e pequenas comunidades) onde estão instalados equipamentos como medidores de energia equipados com dispositivos inteligentes que realizam coleta de dados em tempo real e otimização de consumo energético.

2.5.1 Smart Grid e Suas Principais Estruturas

Os componentes de uma rede elétrica inteligente englobam as infraestruturas de geração, transmissão, distribuição, comunicação e consumidores. As redes elétricas inteligentes diferenciam-se do sistema tradicional por incorporar dispositivos de comunicação capazes de realizar a coleta de informações em tempo real, auxiliando na melhoria da eficiência da rede, conforme apresentado por Vijayapriya e Kothari (2011).

Figura 10 – Estrutura elétrica de Redes Elétricas Inteligentes *(Smart Grid)*



Nesta Figura 10, observa-se um sistema elétrico inteligente que se inicia desde na geração até aos consumidores finais. Por se tratar de uma rede elétrica inteligente o sistema envolve dispositivos e tecnologias, que permitem a otimização do fluxo energético. A estrutura de geração, produz a energia que é injetada nas linhas de transmissão em altíssimas tensões sendo transportadas por longas distâncias. Nessa etapa, as redes elétricas inteligentes utilizam

tecnologias como SCADA, medição fasorial e cabos avançados responsáveis pelo monitoramento e controle do fluxo de energia garantindo a estabilidade e eficiência nas linhas de transmissão.

Na subestação, ao chegarem as altíssimas tensões provenientes da fonte geradora, ocorre a etapa de transformação de tensão por meio da automação da subestação. Em seguida, energia é distribuição para centros urbanos, indústrias e comunidades. A automação permite que as falhas sejam detectadas e isoladas de forma rápida, contribuindo para a confiabilidade do sistema. Posteriormente, essa energia é injetada na rede de distribuição que possui sistemas automatizados e de controle chamados (Automation distribution) responsáveis por conduzir a eletricidade até o uso final.

2.6 Comparação Técnica e Teórica entre *Smart Grid* e *Internet of Energy (IoE)*

Esta seção apresenta uma comparação técnica e teórica entre os conceitos de *Smart Grid e Internet of Energy* (IoE), enquanto tecnologias modernas aplicadas à melhoria a eficiência dos sistemas energéticos. Nesta comparação foram analisados os seguintes aspectos técnicos e teóricos das duas tecnologias no processo de gerenciamento de energia, destacando-se suas principais características entre as quais: níveis de inteligência, arquiteturas de comunicação e formas de gestão de sistemas energéticos.

Analisando essas características, verificou-se que os *Smart Grids* representam uma evolução conceitual para surgimento da *Internet of Energy* (IoE), mas que também apresentam suas limitações e avanços em cada modelo tecnológico. Essa análise foi fundamental para a adoção de *Internet of Energy* (IoE) como modelo mais promissor, abrangente e avançado para a gestão energética. Na Tabela 6 foram apresentados os aspectos comparativos dessas duas tecnologias.

2.7 Aspectos Económicos e Regulatórios da *Internet of Energy* (IoE)

A *Internet of Energy* (IoE) é amplamente reconhecida como estratégica para a modernização dos sistemas elétricos e para a transição energética. Apesar de seu reconhecido potencial, seus benefícios, a adoção dessa tecnologia enfrenta desafios econômicos e regulatórios significativos, o que pode limitar a sua adoção em países em desenvolvimento devido às fragilidades das infraestruturas elétricas.

Do ponto de vista econômico , a IoE exige elevados investimentos iniciais para sua implementação. Os investimentos referem-se às infraestruturas digitais, sensores inteligentes,

Tabela 6 – Comparação Conceitual Técnica e Teórica entre *Smart GRid* e *Internet oF Energy (IoE)*

Aspecto Avaliado	**Smart Grid**	**Internet of Energy(IoE)**	**Síntese Técnica e Teórica da Evolução**
Natureza Conceitual	Modernização da rede elétrica com automação e comunicação bidirecional.	Ecossistema Energético Ciberfísico totalmente conectado, digitalizado e inteligente	IoE expande o conceito da Smart Grid ao integrar energia + Internet + IoT.
Arquitetura do Sistema	Estrutura parcialmente distribuída, dependente de centros de controle	Arquitetura altamente distribuída com processamento em *cloud, fog e edge*.	IoE resolve limitações de centralização, tornando o sistema autônomo.
Tecnologias Base	AMI, sensores, SCADA avançado, automação da distribuição.	IoT, IA, Big Data, Blockchain, Computação em névoa e nuvem.	IoE agrega tecnologias mais avançadas, permitindo decisões locais e globais.
Fluxo de Energia e Informação	Fluxo bidirecional entre consumidor e concessionária.	Fluxos multidirecionais entre dispositivos, redes, prosumidores e plataformas digitais.	IoE aumenta a facilidade informacional e a inteligência operacional.
Integração de Energias Renováveis	Integração complexa, dependente de controle avançado	Integração nativa, automatizada e otimizada via IoT e IA	IoE acelera a transição energética e a penetração de DERs
Papel do Consumidor	Consumidor monitorado e com resposta à demanda	Consumidor ativo (prosumidor), participando do mercado energético digital.	IoE transforma o modelo tradicional e cria novos mercados.
Cibersegurança	Protocolos tradicionais com foco na proteção de infraestrutura.	Blockchain, criptografia avançada e autenticação distribuída.	IoE eleva o nível de segurança devido ao aumento de dispositivos conectados

Fonte: Adaptado de Kabalci et al. (2019),Hussain et al. (2020).

sistemas avançados de comunicação, plataformas de gestão de dados e soluções de armazenamento de energia.

Segundo Siano (2014), os benefícios econômicos associados à digitalização de sistemas energéticos, tendem a se manifestar de médios e longos prazos, o que pode limitar investimentos em regiões com limitações financeiras. Além disso, Hussain et al. (2019) destacam que a viabilidade econômica da IoE depende investimentos econômicos significativos, tornando sua adoção mais atrativa em países com mercados energéticos maduros e com elevada penetração de tecnologias digitais.

Além das barreiras econômicas, os desafios regulatórios, também constituem aspectos relevantes quanto à consolidação dessa tecnologia. A digitalização dos sistemas energéticos implica uma gestão complexa de dados energéticos, o que exige regulamentações claras para garantir a segurança, a privacidade e a transparência. Veelen e Horst (2018), argumentam que a ausência de regulamentação adequada, pode gerar riscos de concentração tecnológica, especialmente quando as infraestruturas digitais permanecem restritas a grandes empresas ou países tecnologicamente avançados.

De modo geral, as principais instituições ligadas ao sector energético a nível global, de acordo com Galperova e Mazurova (2019) a Agência Internacional de Energia-IEA , defende que a digitalização do setor energético eleva a eficiência e reduz as perdas, mas a sua implementação exige altos investimentos iniciais. Paralelamente, o relatório do World Bank (2018) aponta que a ausência de mecanismos financeiros adequados limitam a adoção dessa tecnologia energética em países em vias de desenvolvimento, o que reflete na desigualdade e na equidade energética no cumprimento da Agenda 2030 da ONU. No que concerne às políticas de regulamentação, a International Renewable Energy Agency (2016) defende que é necessário adotar políticas e regulações inclusivas para viabilizar a IoE como vetor estratégico para a sustentabilidade global.

2.8 Trabalhos Relacionados sobre a *Internet of Energy(IoE)*

Vários autores têm investigado e estudado a *Internet of Energy* (IoE), sob diferentes perspectivas da sua aplicação para o setor energético. Analisar os trabalhos relacionados dos outros autores sobre a IoE, sintetiza a compreensão sobre a evolução do conceito da tecnologia de uma área de estudo, bem como identificar as tecnologias voltadas à sua arquitetura e tecnologias envolvidas Gil (2008) . As discussões que seguem apresentam a contribuição de alguns autores sobre a IoE em diversas dimensões, na engenharia, economia e em dimensões socioambientais.

O primeiro trabalho relacionado sobre a IoE foi a contribuição de Kafle et al. (2016), enfatizam no seu trabalho que a arquitetura de IoE foi inspirada diretamente na Internet de dados, onde a *Internet of Energy* é uma infraestrutura energética distribuída, flexível e orientada a serviços. Para esses autores a IoE surge como uma tecnologia promissora para integrar as fontes renováveis de energia, estabelecer a comunicação bidirecional da informação e energia e a

infraestrutura de energia elétrica deixará de ser apenas uma estrutura física, mas passará a ser um serviço inteligente, resiliente e adaptável às necessidades dos usuários.

Um segundo conjunto dos autores Orumwense e Abo-Al-Ez (2023), começam com a contextualização da *Internet of Energy* (IoE) como sendo uma subcategoria da Internet das Coisas (IoT), destacaram a IoE como uma tecnologia que integra os dispositivos inteligentes e interconectados a infraestruturas energéticas por meio de redes de comunicação e plataformas digitais. A grande contribuição dos autores sobre a IoE, é a potencialidade de sistematização das aplicações no setor elétrico e surge como uma solução para os desafios relacionados à complexidade da rede elétrica tradicional, destacando-se o papel fundamental da IoE na geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia. Nesse trabalho os autores apontaram as questões relacionadas à segurança, interoperabilidade e confiabilidade das comunicações na implementação de IoE.

Para os autores Strielkowski et al. (2019), apresentam a IoE, como uma evolução natural das redes elétricas inteligentes, indo além da automação elétrica tradicional. Os autores mostraram que a IoE amplia a capacidade das redes elétricas inteligentes, através da integração de fontes renováveis de energia conectadas aos sistemas de comunicação bidirecional através de uma plataforma digital. O papel central desse trabalho é a potencialidade que a IoE tem para aumentar a eficiência energética, reduzir as perdas e apoiar na transição para aumentar a participação das energias limpas de baixas emissões.

No trabalho dos autores Mishra e Singh (2023), abordaram a *Internet of Energy* (IoE) num cenário voltado a cidades inteligentes e sustentáveis. Nesse contexto a IoE pode atuar como uma tecnologia essencial para coordenar a geração, armazenamento, e consumo energético em ambientes urbanos complexos. Os autores evidenciaram como a IoE pode atuar no processo de gerenciamento de energia, incluindo a otimização do consumo, integração de dispositivos inteligentes e suporte à sustentabilidade ambiental. Esse estudo enfatiza muito o papel da IoE em sua dimensão ambiental, como sendo uma tecnologia para reduzir em larga escala as emissões de gases poluentes, aumentar a participação das energias renováveis e construção das cidades inteligentes.

Por último foi analisado o trabalho dos autores Batool, Zowghi e Bano (2023) , analisam a *Internet of Energy*(IoE) sob a perspectiva da responsabilidade, ética e governança da Inteligência Artificial. Para os autores a IoE é entendida como um sistema sociotécnico crítico, no qual as decisões energéticas são mais automatizadas por meio de algoritmos de IA. O foco central do trabalho desses autores estão voltados mais para as questões de contabilidade e transparência no setor energético, defendendo a necessidade de marcos regulatórios e modelos de governança adequados à implementação justa de IoE.

Para melhorar a compreensão da visão de IoE, sob perspectivas dos diversos autores, a Tabela 7 a seguir foi apresentado de forma mais sucinta as convergências e inovações que cada autor traz na sua abordagem sobre a IoE.

Tabela 7 – Visão, Convergência Literária e Inovação de cada autor sobre **Internet of Energy (IoE)**

Autor	**Visão apresentada**	**Convergência literária**	**Principais Contribuições**
Kafle et al. (2016)	Infraestrutura inspirada em Internet dos dados	Rede Digitalizado e integração de Energias Renováveis	Energia como serviço
Orumwense e Abo-Al-Ez (2023)	Subcategoria de IoT	Uso de TIC, automação	Mapeamento sistemático
Strielkowski et al. (2019)	Evolução dos Smart Grid	Integração das fontes Renováveis e eficiência energética	Redução de Perdas
Mishra e Singh (2023)	IoE aplicada a Smart Cities	Gestão Inteligente de Energia e uso de plataformas digitais	Dimensão ambiental Urbana
Batool, Zowghi e Bano (2023)	IoE como sistema sociotécnico	Automação e uso de sistemas inteligentes	Governança ética e transparência

Fonte: Kafle et al. (2016)Orumwense e Abo-Al-Ez (2023)Mishra e Singh (2023)Batool, Zowghi e Bano (2023) .

Esta Tabela 7 permite compreender como os autores convergem em certos pontos quando tratam da IoE em seus estudos, assim como também as principais inovações que são contribuições desses autores através das suas pesquisas. Pode se ver na Tabela 7, que os autores possuem convergência quanto à comunicação bidirecional entre o fluxo de energia e os dados, monitoramento em tempo real e otimização da rede elétrica onde a IoE se destaca como uma tecnologia promissora para a sustentabilidade energética. Por outro lado em cada estudo, embora os autores trazerem pontos semelhantes sobre a IoE, isso demonstra que cada estudo explora o conceito de IoE permitindo uma compreensão com ma is profundidade sobre sistemas energéticos.

2.9 Transição Energética e *Internet of Energy* (IoE): Prespectivas para a Eficiência Energética e a Sustentabilidade

Esta seção aborda a transição energética, seus principais conceitos e as exeriências internacionais sobre a situação da matriz energética e elétrica mundial e as principais tecnologias energéticas inspiradas em IoE, que são fundamentais para a integração eficiente de fontes de energias renováveis, sistemas de armazenamento de energia e micro redes, bem como investimentos em diversas sectores principais de atividades energética e avanços dos diversos países desenvolvidos na busca de uma transição energética.

2.9.1 Transição Energética: Principais conceitos e Papel da Digitalização.

Segundo Tavakoli (2017), a transição energética refere-se à mudança de um sistema energético historicamente dominado pelos combustíveis fósseis para um modelo baseado nas fontes renováveis de energia. Essa transição é motivada, principalmente, pelos impactos climáticos e ambientais decorrentes das emissões em larga escala dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera.

Para a revista FI Group Brasil (2025), ressaltam que a transição energética atual diferencia-se das transições energética anteriores, que foram predominantemente baseadas na adoção de combustíveis fósseis com o objetivo de impulsionar a industrialização das nações. A transição contemporânea é impulsionada, sobretudo, pela urgência ambiental e pela necessidade de garantir a segurança energética, por meio de integração de fontes renováveis à rede elétrica em múltiplos pontos ao longo das linhas de transmissão, a modernização das infraestruturas elétricas, da digitalização dos sistemas elétricos e da adoção de tecnologias que promovem o aumento da eficiência dos sistemas energéticos Figura 11.

Figura 11 – Modelo de Transição Energética Atual



Fonte: (Aisha Solutions, 2023)

A transição energética contemporânea é impulsionada por diversos fatores, entre os quais se destacam a mitigação das mudanças climáticas, por meio da redução das emissões de gases de efeitos estufa, o fortalecimento da segurança energética, associados à diminuição da dependência de recursos naturais finitos e a promoção do crescimento econômico sustentável, decorrente da geração de empregos no sector de energias limpas tecnologias e do incentivo à inovação tecnológica.

2.9.2 Experiências internacionais da transição energética em alguns países Inspiradas em IoE

Com base na revista FI Group Brasil (2025), a evolução da transição energética pode ser observada de forma concreta através da experiências internacionais de alguns países que adotaram estratégias estruturadas para a descarbonização dos seus sistemas energéticos. A Alemanha destaca-se através do programa *Energiewende*, que promove investimentos intensivos em fontes de energias renováveis e em eficiência energética.Dinamarca, tornou-se o líder mundial em energia eólica, sendo pioneiro na adoção dessas tecnologias em larga escala, alcançando níveis de geração elétrica superiores ao seu consumo interno. A China tem se destacado como os maiores investidores global em energia solar e eólica, liderando as capacidades de diversificação instaladas dessas fontes na sua matriz energética .O Brasil, por sua vez, apresenta sua matriz elétrica predominantemente renovável, com expressiva participação de hidrelétricas, além de elevado potencial em biomassa e hidrogênio verde, consolidando-se como país relevante no cenário global da transição energética.

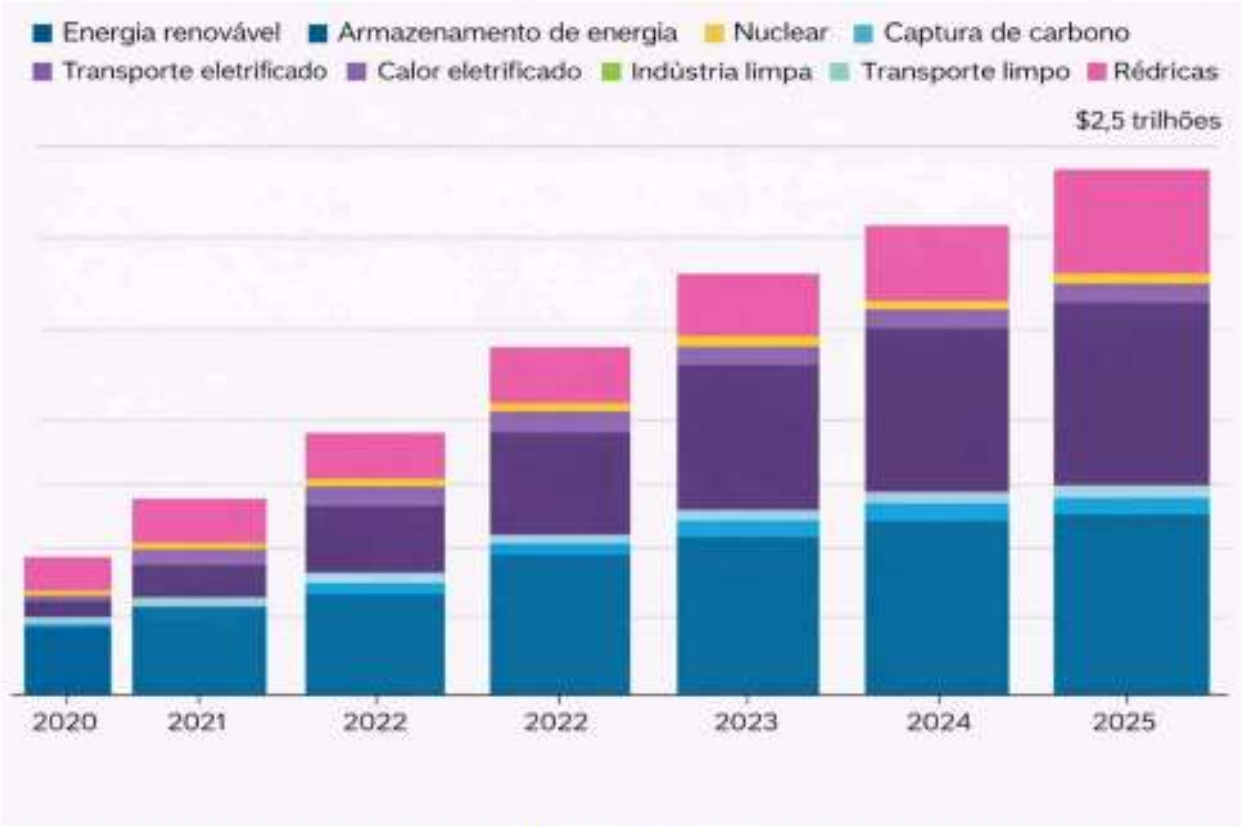
2.9.3 Crescimento dos Investimentos em Transição Energética por Setor no Mundo (2020–2025)

O gráfico da Figura 12, apresenta o crescimento global dos investimentos em transição energética entre 2020 e 2025, atingindo um investimento aproximadamente em US$2,5 trilhões aplicados para implementação das políticas de baixo carbono, fortalecimentos de políticas climáticas e reconhecimento de transição energética como eixo estratégico para desenvolvimento econômico sustentável. Estes investimentos estão distribuídos em diferentes sectores, como energias renováveis, transporte eletrificado, redes elétricas, armazenamento de energia, hidrogênio verde, indústria limpa, captura de carbono e energia nuclear.

Observa-se que as energias renováveis e o transporte eletrificado concentram a maior parte dos investimentos sobre as tecnologias de baixo carbono ao longo desse período, evidenciando que a descarbonização do sector elétrico e da mobilidade é prioridade principal para reduzir a pegada de carbono na atmosfera. Outro sector é o investimento em redes elétricas, destacam-se como principais devido a necessidade de digitalização dos sistemas energéticos para integrar fontes renováveis variáveis, como solar e eólica.

O investimento em sistemas de armazenamento de energias evidencia o papel estratégico na transição energética como soluções para a intermitência das fontes renováveis de energia, garantindo a confiabilidade, flexibilidade e segurança energética dessas fontes. Portanto, as parcelas menores dos investimentos estão direcionados para hidrogênio verde, captura e armazenamento de carbono e indústria limpa, esses setores destacam-se no cenário de transição energética como ascendentes, sinalizando sua importância em médio e longo prazo, priorizando os setores com maiores índices de emissões, difíceis de eletrificar.

Figura 12 – Investimento em Tecnologias de Baixo Carbono para a Transição Energética



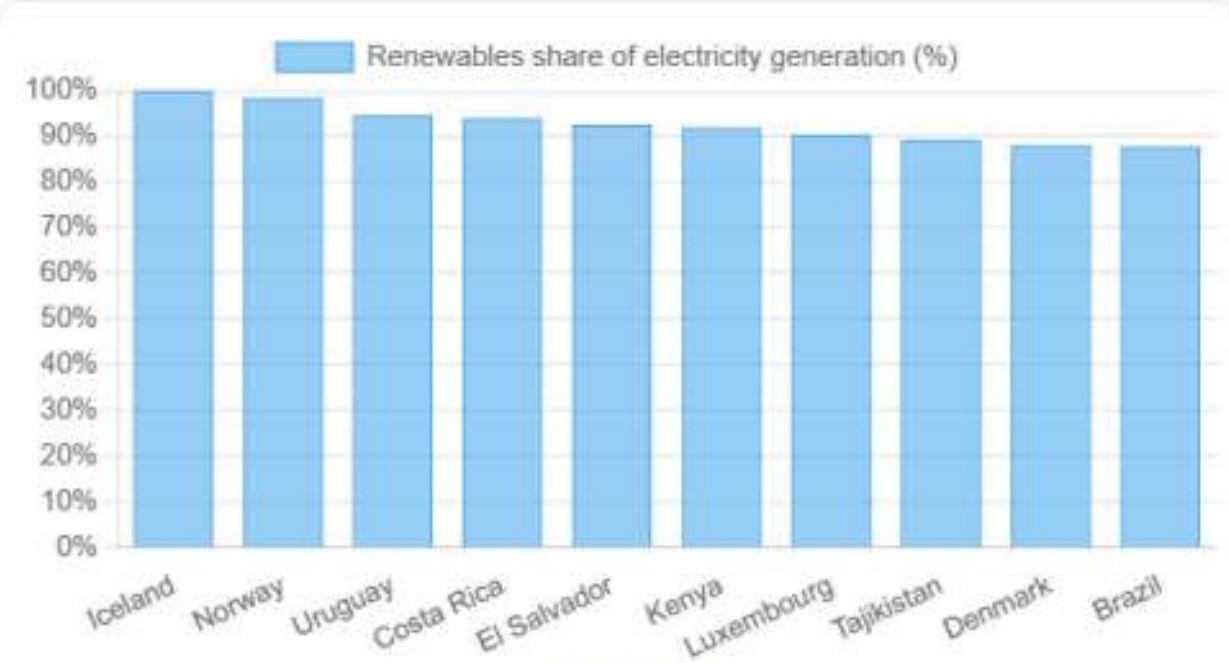
Fonte: (BloombergNEF, 2026)

2.9.4 Participação das Energias Renováveis na Geração de Eletricidade em Países Líderes da Transição Energética através de Tecnologias baseado em IoE

O gráfico da Figura 13, apresenta a participação das energias renováveis na geração de eletricidade em (%) dos 10 países que destacam como referências globais na transição energética, os dados mostram a fração de consumo nacional das fontes renováveis como (hidrelétrica, eólica, solar e geotérmica), destes países em suas matrizes elétrica destacando como as nações com menor nível de emissões de carbono.

Os dados mostram que os países desenvolvidos, como a Islândia, Noruega lideram a geração elétrica renovável, com uma participação aproximadamente 100% sustentada pelo aproveitamento estratégico de recursos naturais como hidrelétrica e geotérmica. Uruguai, Costa Rica, El Salvador e Quênia, são outros países que se destacam com participação acima de 90% de renováveis, resultando em políticas energéticas consistentes em aproveitamento das suas potencialidades energéticas através de investimentos contínuos. Portanto, a Dinamarca e o Brasil apesar de possuírem sistemas elétricos mais complexos, mantêm elevada participação renovável por meio de uma sinergia energética das fontes renováveis aumentando a resiliência da sua rede elétrica.

Figura 13 – Geração de Eletricidade por Matriz Elétrica Por Países



Fonte: (StatRanker,)

De forma complementar os gráficos apresentados nas Figuras 12 e 13 , demonstram a viabilidade técnica e econômica da transição energética em escala global. O primeiro evidencia o crescimento de investimento em tecnologias de baixo carbono e a segunda apresenta as altas penetrações em matriz elétricas de vários países, evidenciando a concretização das energias renováveis como realidade. De modo geral, os investimentos em infraestruturas e tecnologias de baixo carbono, constituem estratégias importantes para atingir uma rápida transição energética assim como o desenvolvimento sustentado.

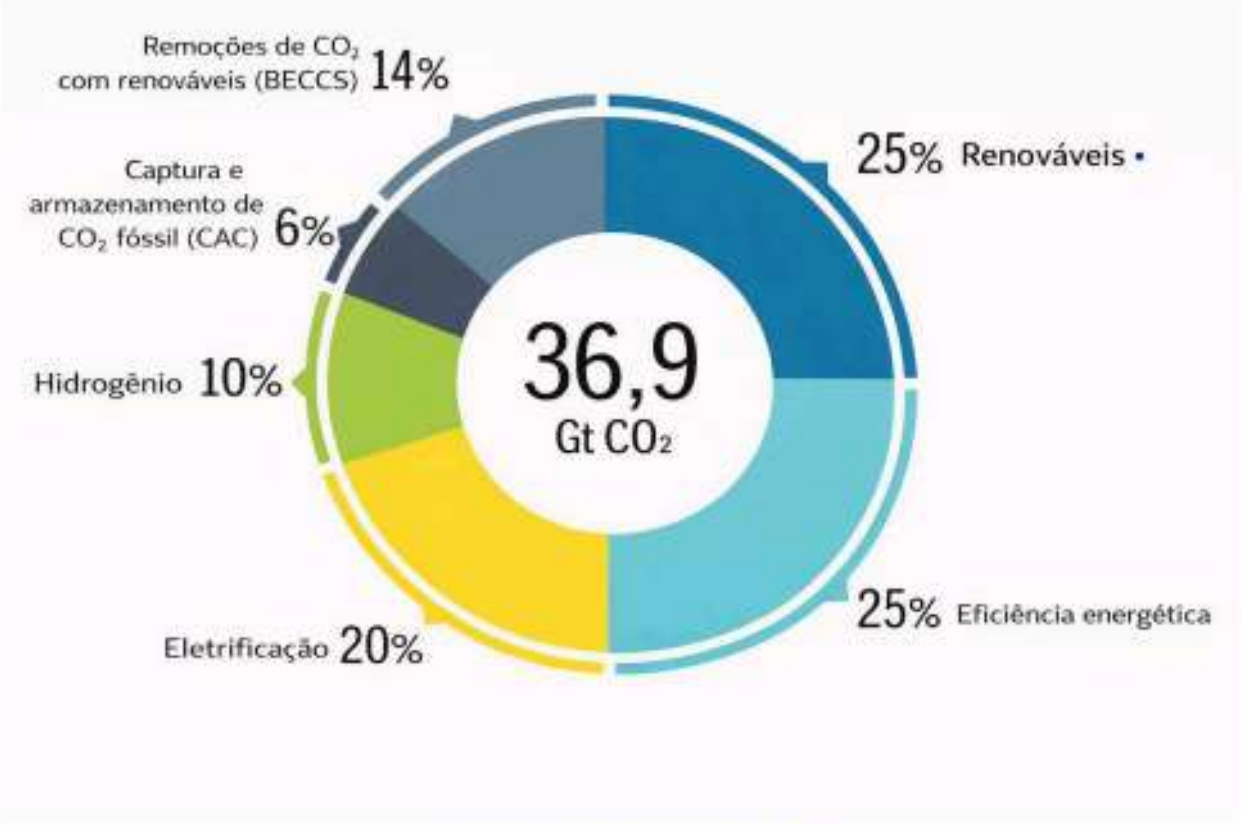
2.9.5 Eficiência Energética e *Internet of Energy* (IoE): Como Pilar Estratégico de Transição Energética

A eficiência energética é um dos pilares principais da transição energética a nível global é reconhecida não só pela promoção das energias renováveis e uso racional de recursos, assim como a diminuição do consumo excessivo de energias. Segundo European Environment Agency (2025), a eficiência energética consiste em utilizar uma quantidade menor de energia para realizar determinada atividade, assegurando o uso racional e otimizado dos recursos energéticos, através da minimização das perdas e redução do desperdício tanto na geração quanto no consumo da energia, garantindo que os mesmos serviços energéticos sejam fornecidos com menor uso de energia.

De acordo com a International Energy Agency (IEA) (2023), a eficiência energética não é uma medida complementar da transição energética, mas sim uma solução estratégica, na qual a melhoria da eficiência energética é responsável pela redução significativa das emissões

necessárias para atingir as metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris. A eficiência energética envolve utilização em vários sectores, indústria, transporte e geração de eletricidade. Os benefícios da eficiência energética vai além dos aspectos ambientais e da transição energética, envolve aspectos econômicos e sociais. A International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022), os investimentos na eficiência energética geram retorno financeiro a médio e longo prazo, reduz os custos operacionais e aumenta a competitividade dos países no cumprimento das metas da transição energética. A Figura 14, apresenta as principais vias tecnológicas para mitigação de 36,9 Gt de CO2 até 2050, observa-se que a adoção das políticas de eficiência energética e as energias renováveis apresentam maior porcentagem como aspectos fundamentais para a descarbonização da matriz energética global.

Figura 14 – As Principais Tecnologias Para a descarbonização da matriz energética até 2050



Fonte: European Environment Agency (2025)

A Figura 14,mostra que a redução de 36,9 Gt de CO2 até 2025, depende da combinação que integra seis vias tecnológica, destacando-se energias renováveis e eficiência energética ambas com 25 % de contribuição, seguida pela eletrificação em 20%, hidrogênio com 10% e tecnologias de captura de carbono CCS (6%) e BECCS(14%). Com isso, observa-se que as energias renováveis, eficiência energética e a eletrificação constituem as tecnologias que podem contribuir para a redução de até 70% da mitigação de CO2, o que demonstra cumprimento das metas globais das emissões está associado a mudanças estruturais no sistema energético, como a expansão das fontes renováveis, modernização tecnológica e substituição das combustíveis fósseis, enquanto que 20% depende de tecnologia de captura de carbono.

No entanto, a eficiência energética assume papel fundamental, pela redução da demanda por energia, minimização das perdas na geração e no consumo e diminuição da expansão da infraestrutura, tornando a transição energética mais economicamente viável. Portanto, a descarbonização global não só reside na substituição dos combustíveis fósseis, mas sim na otimização do uso de energia e reorganização do modelo de consumo energético.

3

Metodologia

A metodologia desse trabalho, foi fundamentada na revisão bibliográfica e na análise bibliométrica. No entanto a pesquisa concentrou-se na análise bibliométrica, o que se justifica pelo seu potencial em analisar de forma quantitativa a produção científica de uma área do conhecimento. Segundo Eck e Waltman (2010), os estudos bibliométricos baseiam-se em dados quantitativos, contudo a visualização dos gráficos dos dados por meio de clusters permite uma análise qualitativa aprofundada dos resultados a partir da interpretação das relações entre autores. De forma complementar, Zupic e Čater (2015) destacam que esse método de pesquisa utiliza métricas quantitativas para mapear a estrutura intelectual de um campo científico, mas seu valor reside na interpretação qualitativa desses resultados.

A análise bibliométrica foi realizada seguindo os seguintes critérios. A pesquisa foi conduzida no Portal de Periódico da CAPES, utilizando como base de dados a *Web of Science* . Para a coleta dos dados utilizou-se o termo *Internet of Energy (IoE)* no campo de título, considerando um intervalo de tempo de dez anos (2015-2025). Foram selecionados exclusivamente os seguintes tipos de documentos: artigo científico, artigos de anais e artigo de revisão num total de (1936) documentos, priorizou-se o idioma inglês, obtendo-se um total de 1924 documentos publicados na língua inglesa os quais foram utilizados para a realização deste estudo.

Após essa etapa, juntamente com os critérios de exclusão realizados anteriormente, foi possível identificar a partir da análise dos resultados, as principais áreas científicas que mais predominam no estudo sobre *Internet of Energy (IoE)*, bem como a evolução temporal das publicações e das citações. Em seguida, os dados obtidos foram exportados e processados no *software VOSviewer* , utilizando-se para a geração e visualização dos resultados bibliométricos nessa área de estudo. Para facilitar a compreensão do procedimento metodológico adotado, os principais processos são resumidos na Tabela 8 apresentada a seguir.

A definição desses critérios da exclusão e a preferência pela utilização desse método, são justificadas com base na ideia dos seguintes autores. Donthu et al. (2021) afirmam que as

Tabela 8 – Procedimento metodológico da Análise Bibliométrico

Método de Busca	**Resultados**
Portal de Busca	Capes Periódico
Banco de Dados	*Web of Science*
Internet of Energy	1924
Intervalo Temporal	2015-2025
Software	VOSviewer
Documentos Selecionado	Artigos Científico; Artigos de Anais; Artigos de Revisão
Idioma	Inglês

Autoria Própria, 2026.

análises bibliométricas conduzidas de maneira rigorosa fortalecem o desenvolvimento científico de uma área, ao oferecerem uma visão abrangente do campo, revelarem lacunas existentes e estimularem novas agendas de pesquisa. Aria e Cuccurullo (2017) , o recorte temporal no estudo bibliométrico constitui uma decisão estratégica fundamental, porque influencia diretamente a análise da evolução do conhecimento e interpretação dos dados ao longo do tempo. Relativamente sobre ao *software* Eck e Waltman (2010) o **VOSviewer** destaca-se por sua finalidade de lidar eficientemente com mapas de larga escala permitindo a análise simultânea de milhares de itens, como autores, periódicos, países líderes em publicações e principais revistas científicas.

3.1 Descrição do Fluxograma Metodológico de Estudo

Para melhor compreensão do procedimento metodológico deste estudo, foi elaborado um fluxograma que apresenta, de forma geral, a condução da pesquisa. O fluxograma descreve o percurso científico e arquitetônico da IoE , partindo do desafio energético global, caracterizado pelo aumento da demanda por eletricidade e pela digitalização dos sistemas energéticos. A Figura 15 , apresenta o fluxograma metodológico deste trabalho.

Como pode ser observado ao verificar a Figura 15, a metodologia de estudo fundamenta-se inicialmente na apresentação da Internet das Coisas (IoT), considerada a base conceitual que sustenta o desenvolvimento da Internet of Energy (IoE). Em seguida, o estudo avança para a definição clara do objeto central da *Internet of Energy* (IoE), estruturado a partir de eixos principais. O eixo científico á basea-se na revisão bibliográfica sistemática e análise bibliométrica, permitindo a identificação das tendências de publicações e citações, dos autores mais destacados no estudo de IoE, bem como dos países e das principais áreas científicas envolvidas, de acordo com os critérios bibliométricos adotados. Paralelamente, o eixo tecnológico concentra-se na análise da arquitetura do funcionamento da IoE, abrangendo a análise funcional e avaliação tecnológica, com destaque para o *Energy Router* como o elemento central dessa tecnologia. A

Figura 15 – Fluxograma metodológica



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026

análise comparativa evidencia a IoE como uma das tecnologias mais robustas das *Smart Grids*, enquanto os estudos comparativos permitem compreender as diferentes abordagens dos autores e suas contribuições para o avanço dessas tecnologias. Dessa forma, o procedimento metodológico adotado possibilitou a obtenção e a apresentação consistente dos resultados desta pesquisa.

4

Resultados Científico Sobre a *Internet of Energy* (IoE) e Transição Energética

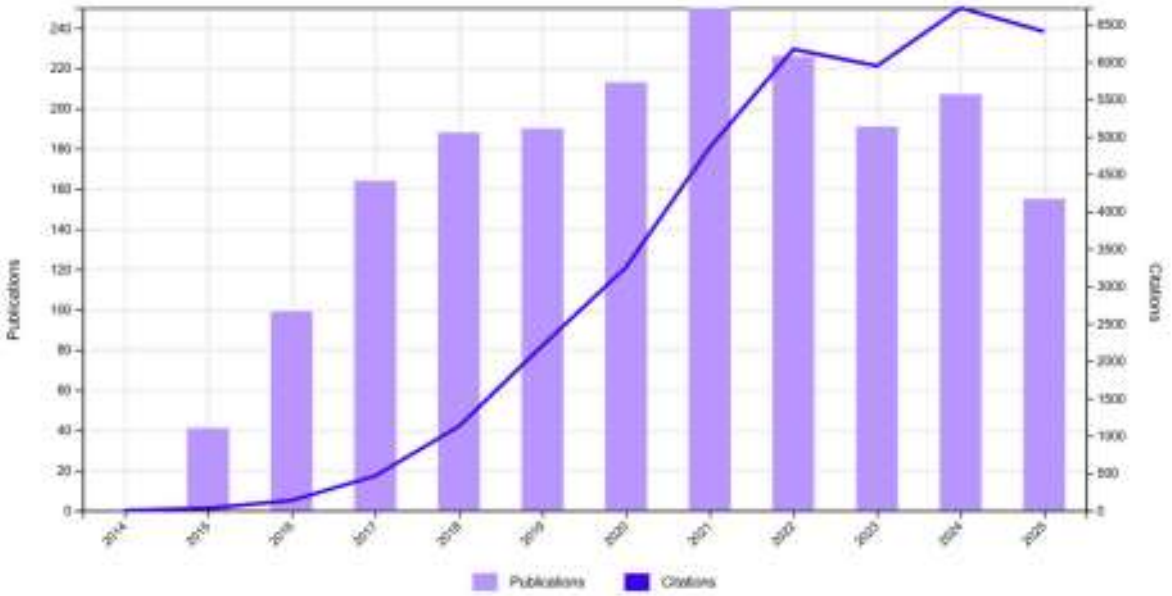
Os resultados deste trabalho são apresentados por meio de gráficos bibliométricos e tabelas, construídos a partir dos dados coletados sobre *Internet of Energy* (IoE). Os gráficos incluem representações em barras que evidenciam a evolução temporal das publicações, as principais áreas científicas de aplicação de IoE, bem como análises de citações por autores, países e periódicos com maior destaque na produção científica. Complementarmente, no decorrer dos resultados desta pesquisa, foram apresentadas os principais achados sobre a transição energética relacionados à IoE, por meio dos gráficos e alguns dados importantes sobre o crescimento das energias renováveis, com destaque para as fontes de energia solar e eólica.

Por além de uma análise em escala global sobre a transição energética, foram também apresentadas informações ao nível da União Europeia, com enfoque na redução das emissões de gases de efeito estufa nos países membros. Por fim foi realizada uma análise em escala local, destacando o Brasil no cenário da transição energética evidenciando seus avanços e potencial no contexto das fontes renováveis.

4.1 Evolução temporal das publicações

O gráfico da Figura16, apresenta a evolução temporal das publicações e citações relacionadas à IoE entre 2015 e 2025, as publicações representadas em barras verticais e as citações em linhas azuis. Inicialmente pode-se observar que no período de (2015-2016), o número de publicações e citações é relativamente baixo, indicando que nessa fase o estudo estava em seu estágio inicial de desenvolvimento, apresentando poucos estudos publicados . A partir de 2017, o crescimento da publicação científica sobre o tema começou a ganhar destaque na comunidade científica, visto que há um crescimento significativo nos números de publicações, refletindo o aumento de interesse científico impulsionado pela expansão das redes inteligentes e pela integração das fontes renováveis aos sistemas elétricos.

Figura 16 – Evolução temporal das publicações e Citações de 2015 atá 2025



Fonte: *Web of Science*, 2026

De modo geral, nos períodos de 2018 e 2021, observa-se uma intensificação expressiva das publicações e citações. Esse período representa a consolidação da IoE como um campo relevante de pesquisa, destacando o ano 2021 no qual foi registrado o maior número de publicações, esse resultado pode ser explicado pela maturação da aplicação das tecnologias no setor energéticos, pela preocupação mundial com a eficiência energética, a descarbonização do planeta e a transição para uma matriz energética mais limpa.

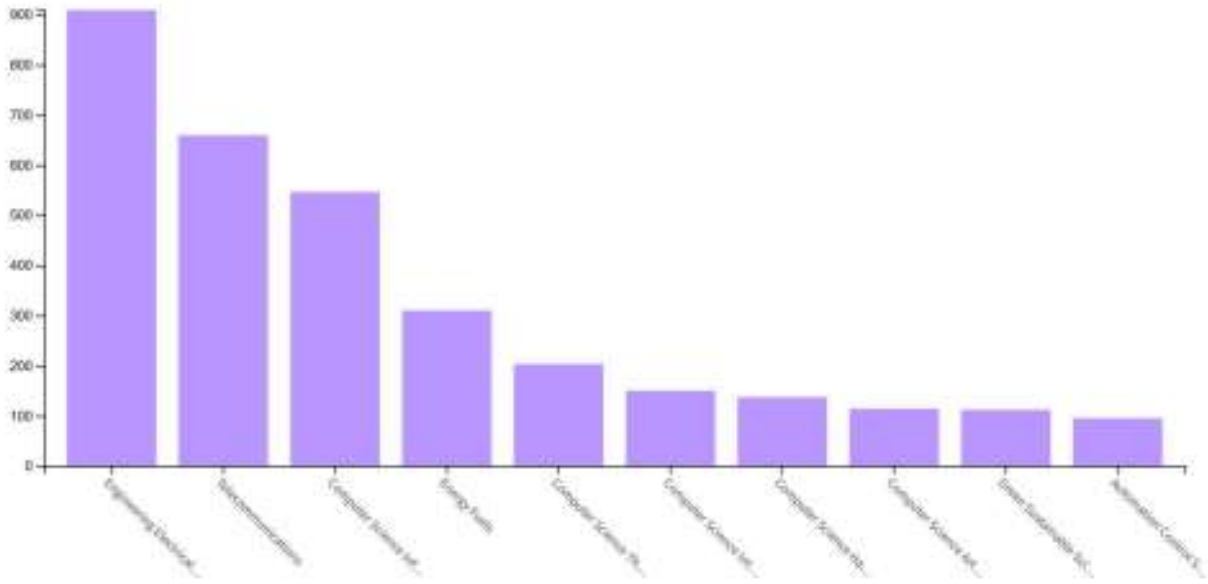
Nos periodos de 2022 até 2024 foram os períodos onde registraram-se as maiores numeros de citações com destaque para o ano 2024, quando o pico da citação desta área de estudo foi atingido. Esse resultado indica que os trabalhos publicados anteriormente começaram a exercer impactos científicos a ser amplamente referenciados por estudos subsequentes. No ano 2025 houve uma redução no que refere às publicações, mas o volume das citações continua elevado demonstrando uma relevância e qualidade de estudos consolidados nessa área.

4.2 Distribuição por Áreas Científicas

No gráfico da Figura17, está apresentada a distribuição das publicações científicas relacionadas à IoE, conforme as diferentes áreas do conhecimento, o que evidencia o caráter multidisciplinar desse campo de pesquisa.

Entre os destaques nas áreas do conhecimento, observa-se a grande concentração nas áreas de Engenharia Elétrica e Eletrônica liderando o número de publicações, seguido das áreas de Telecomunicações e Ciência da Computação. Esse resultado apresenta coerência com a natureza de IoE, que integra sistemas elétricos, redes de comunicação e plataformas computacionais para

Figura 17 – Áreas Científicas Com mais aplicação de Estudo de *Internet of Energy* (IoE)



Fonte: *Web of Science*, 2026

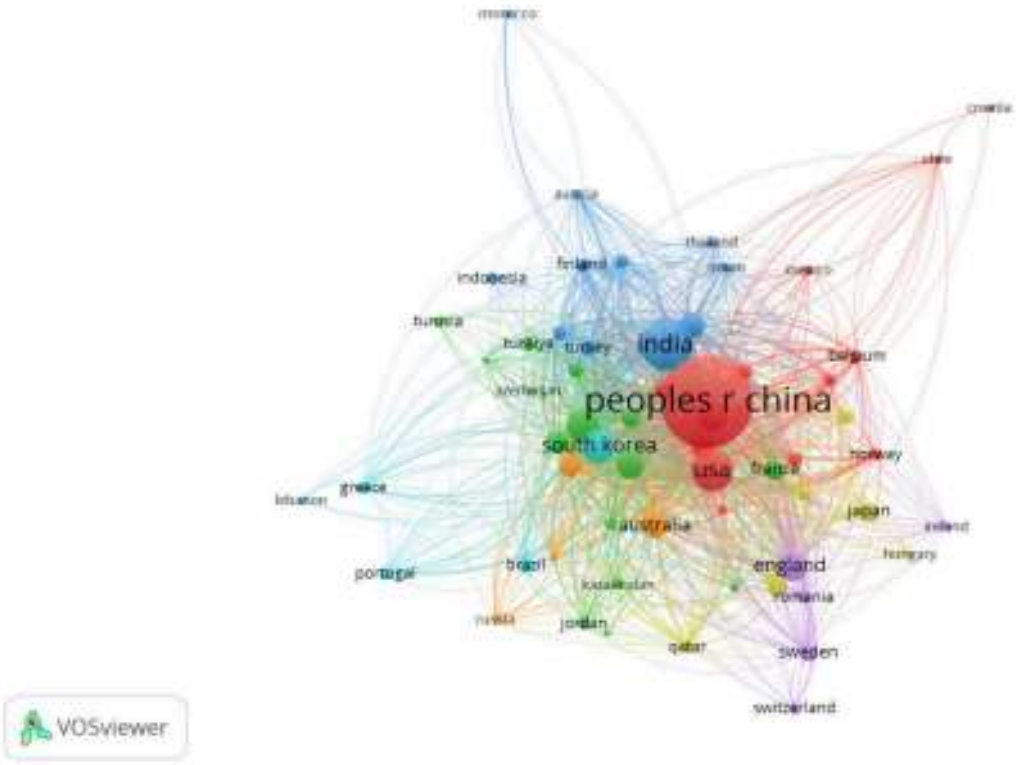
gestão de energia.

A predominância da Engenharia elétrica e Eletrônica, indica que os principais esforços estão voltados ao desenvolvimento de arquiteturas mais robustas de redes elétricas inteligentes, ao controlar o fluxo de energia, integração de fontes renováveis e sistemas de armazenamento que são elementos essenciais para a implementação prática de IoE, o que se justifica pela elevada produção científica nessa área.

Além disso, outra área em grande destaque é a Telecomunicações, que possui grande importância no desenvolvimento de infraestrutura de comunicação para troca de dados em tempo real entre dispositivos inteligentes conectados aos sistemas elétricos, elementos essenciais para o funcionamento de IoE. A Ciência da Computação evidencia o papel fundamental das tecnologias digitais, como a inteligência artificial, aprendizado de máquina e computação em nuvem, essas tecnologias são amplamente utilizadas para otimizar o consumo energético, previsão da demanda, detecção de falhas e tomadas de decisões automatizadas.

Outras áreas em menor proporção como a Energia e Combustíveis, Ciências Ambientais e a Sustentabilidade, esses resultados indicam que a IoE é uma área com crescente preocupação sobre os impactos ambientais, a eficiência energética e a transição para sistemas energéticos mais sustentáveis, mostrando que a IoE é uma tecnologia que não só se limita a questões técnicas de Engenharia, mas sim envolve também questões ambientais e sociais.

Figura 18 – Países que Lideram produção e Pesquisa Sobre a IoE



Fonte: VOSviewer, 2026

4.3 Produção Científica por Países

O gráfico da Figura18 apresenta a produção científica dos países e foi construído a partir das citações publicadas por países. O tamanho dos nós representa a quantidade de produção científica, as conexões em redes mostram como os países estabelecem as colaborações internacionais sobre a IoE e as diversas cores no gráfico identificam o agrupamento dos países com maior proximidade colaborativa.

Neste gráfico Figura 18, observa-se que a China ocupa a posição central e domina a rede, posição essa evidenciada pelo maior número de tamanho de nó no gráfico e uma intensa rede de colaboração com vários países. Esse destaque da China evidencia o protagonismo do país sobre a produção científica em IoE e a sua forte inserção nas redes globais de pesquisa. Os Estados Unidos e a Índia também posicionaram-se muito próximos da China, ocupando posição intermediária na disseminação de conhecimento sobre o tema e ampliando a cooperação internacional com outros países.

Os países europeus como a Inglaterra, França, Bélgica e Noruega formaram um grande bloco de colaboração, refletindo a tradição dos países europeus em pesquisas colaborativas, projetos e os esforços conjunto sobre as redes elétricas inteligentes, integração das fontes renováveis de energia e transição energética. Os países como Japão e Coreia do Sul são outras

nações da Ásia que estão bem posicionados nessa pesquisa, acompanhando a China o líder nessa área enquanto países asiáticos como principais centros de desenvolvimento tecnológicos aplicados à IoE.

É possível identificar através do gráfico os países emergentes nesse campo de estudo, entre eles destacam-se o Brasil, Chile, Portugal, Turquia, Indonésia e Marrocos. Apesar de menores volumes de publicações, a presença desses países mostra sua crescente integração nos cenários de pesquisa científicas internacionais sobre IoE e como a diversidade geográfica do tema atinge interesses em diversos continentes.

A concentração das publicações em países como a China, Estados Unidos e membros da União Europeia, reflete o elevado investimento em pesquisas, políticas de incentivo à digitalização energética e a maturidade de suas infraestruturas elétricas, evidenciando o compromisso dessas nações nos cenários de digitalização de sistemas energéticos, em avanços científica e simetria com países em desenvolvimento.

4.4 Citações por Autor, Número de publicações e Força de Ligação

Relativamente aos autores com maiores destaques sobre a *Internet of Energy* (IoE), foram utilizados três indicadores bibliométricos fundamentais: número de documentos publicados, número de citações e força total de ligação de cada autor *(total link strength)* , que representa o nível de colaboração científica entre os pesquisadores. Na Tabela 9 foi analisada através de estudo bibliométrico 10 autores com mais contribuições nessa área de estudo.

Tabela 9 – Autores Mais Influentes no Estudo da *Internet of Energy* (IoE)

Nome do Autor	**Trabalhos Públicados**	**Número de Vezes Citados**	**Força Total de Ligação**
Faycal Bensaali	5	120	28
Yassine Himeur	5	120	28
Bilal Naji Alhasnawi	5	190	24
Basil H. Jasim	5	190	24
Abdullah AL Salemi	5	129	20
Abbes Amira	5	129	20
Guan Xin	11	296	20
Josep M. Guerreiro	8	625	20
Tomoaki Ohtsuki	8	203	15
Yu Peng	6	227	15

Fonte:VOSviewer 2026.

Em termos de produtividade científica, destaca-se Guan Xin, com maior número de documentos publicados.Entre autores analisados, autores Josep M. Guerrero, Tomoaki Ohtsuki

e Yu Peng, destacam-se como outros autores que possuem grandes contribuições sobre a IoE. A contribuição desses autores evidencia os seus protagonismos para o avanço da *Internet of Energy (IoE)*, pela elevada produção demonstrada, atuação em diversas áreas relacionadas à gestão inteligente de energia, redes elétricas e sistemas ciberfísicos.

No que se refere às citações, Josep M. Guerrero, destaca-se como o autor com maior número de citação encontrado na pesquisa. Esse resultado sugere que seus trabalhos exercem forte influência teórica e metodológica no estudo de IoE, sendo amplamente referênciadas em pesquisas sobre o tema.

Relativamente à força total de ligação o que demonstra como os autores estão inseridos em redes de colaborações internacionais. Faycal Bensaali e Yassine Himeur são os mais destacados neste aspecto, indicando forte colaboração e participação em trabalhos e diversos projetos sobre a *Internet of Energy*(IoE). Portanto, estas três análises bibliométricas são elementos fundamentais na análise de estudo de um campo multidisciplinar como a IoE, que demanda a integração de conhecimentos em engenharia elétrica, computação e telecomunicações.

No decorrer deste trabalho, buscou-se evidenciar o crescimento da transição energética em escala global e nacional, bem como a evolução do Brasil em direção a uma matriz energética mais limpa, caracterizada pelo aumento progrssivo das fontes renováveis de energia. Os resultados apresentados, evidenciam de forma clara essa tendência de transformação estrutural dos sistemas energéticos.

4.5 Principais Impactos da *Internet of Energy* (IoE) para Transição energética

A Tabela 10 , apresenta as principais contribuições da IoE para aceleração da transição energética, mostrando como a digitalização dos sistemas energéticos contribui para a transformação do sistema energético tradicional pela maior integração das energias renováveis, a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental.

Os sistemas energéticos baseados em IoE, constitui um fator essencial para acelerar a transição energética. O monitoramento em tempo real e gestão baseada em dados permitem respostas rápidas a variações de oferta e demanda energética, aspectos fundamentais para integração de fontes renováveis intermitentes, além disso a otimização do consumo, a eficiência energética e a integração das energias renováveis diminui a necessidade de geração de energia por combustíveis fosseis. Esses fatores demonstram que os sistemas energéticos baseados em IoE, não só apoia a transição energética, mas sim a sua aceleração consolidando-se como vector que impulsiona a transição energética.

Tabela 10 – Impactos da *Internet of Energy* (IoE) para Transição energética

Impactos	**Descrição da IoE**	**Contribuições para a transição energética**
Digitalização e Monitoramento	Uso de roteadores de energia e plataformas digitais para a coleta de dados	Gestão inteligente de energia baseado em dados
Eficiência energética	Controle e otimização do consumo em tempo real	Redução das perdas energéticas e maior aproveitamento dos recursos
Integração de energias renováveis	Integração das fontes eólica e solar a rede elétrica	Inserção das energias limpas e diminuição de uso dos combustíveis fosseis
Descentralização da geração	Integração da geração distribuída (microgrids e Prosumidores)	Possibilita sistemas energéticos mais flexíveis e resistentes
Redução de Emissões	Redução de fontes poluentes	Mitigação das mudanças climáticas e redução dos impactos ambientais
Segurança e confiabilidade energética	Monitoramento contínuo e respostas rápidas as falhas	Aumento da estabilidade e a confiabilidade dos sistemas energéticos

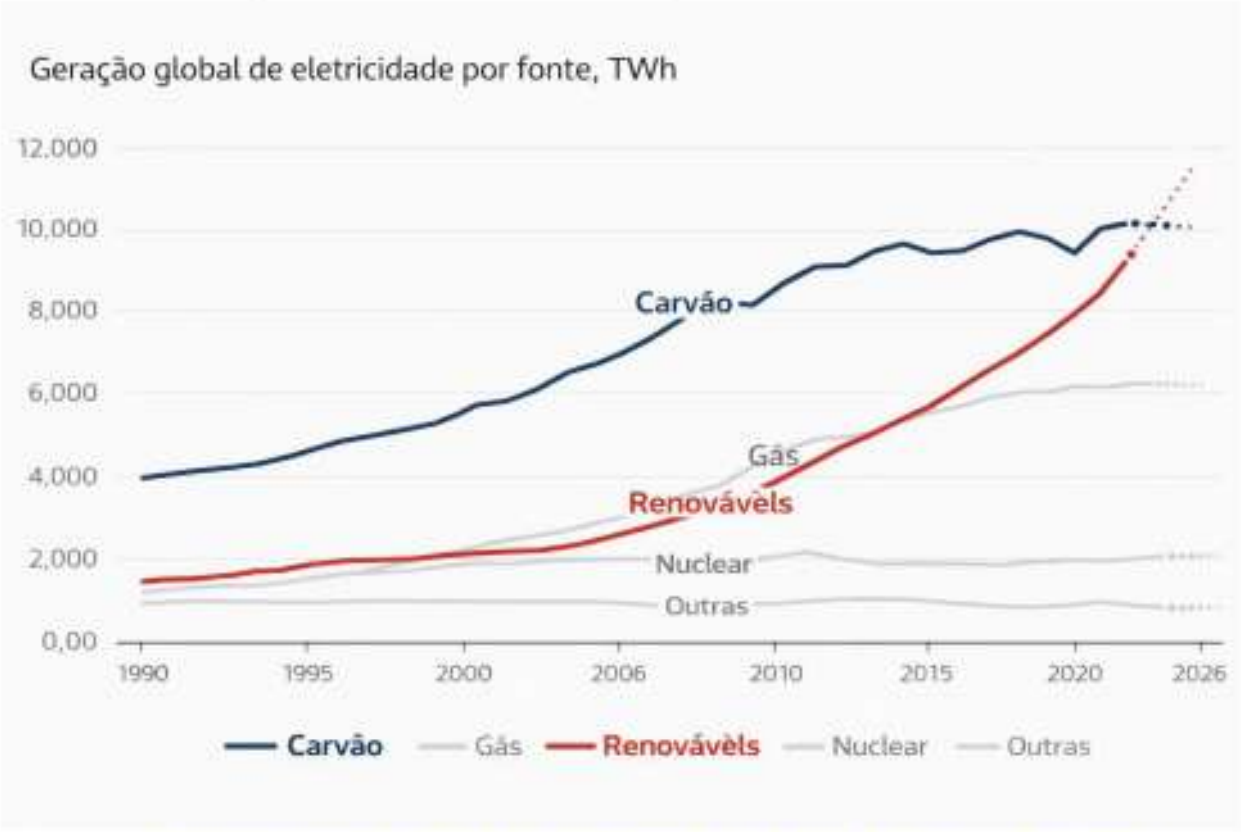
Fonte: DMAP Learning (2024).

4.6 Papel da *Internet of Energy* (IoE) no Crescimento das Energias Renováveis

O crescimento das energias renováveis ao longo dos últimos anos, ocorre de forma crescente e contínua, impulsionada pela expansão da inteligencia artificial e eletrificação dos transportes. No gráfico da Figura 19, observa-se um crescimento continuo da participação das energias renováveis na matriz elétrica global.

O gráfico da Figura 19, mostra a geração da eletricidade por fontes de energia ao longo dos anos 1990 até 2026. Pode-se verificar que entre as fontes de geração de eletricidade, as energias renováveis são as fontes que apresentam um crescimento rápido e contínuo principalmente a partir do ano 2000 cresceu de 1500 TWH para acima de 10 000 TWH em 2026. Esse avanço resulta com o comportamento mais estável em relação ao uso de combustíveis fósseis no mundo, como o carvão que apesar de atingir níveis elevados de utilização em 2026 está muito próximo de 10 000 TWH, mas apresenta sinais de estagnação no seu crescimento nos últimos anos. Outras fontes como a gás natural apresenta um crescimento moderado e a energia nuclear que permanece quase constante ao longo desses anos apresentado crescimento muito lento, devido a complexidade de extração do Urânio e o seu uso para diversas atividade nucleares.

Figura 19 – Crescimento das Energias Renováveis em 2026



Fonte: (Observatório Sistema Fiep / Painel de Indicadores de Mudanças Climáticas de Curitiba, 2026)

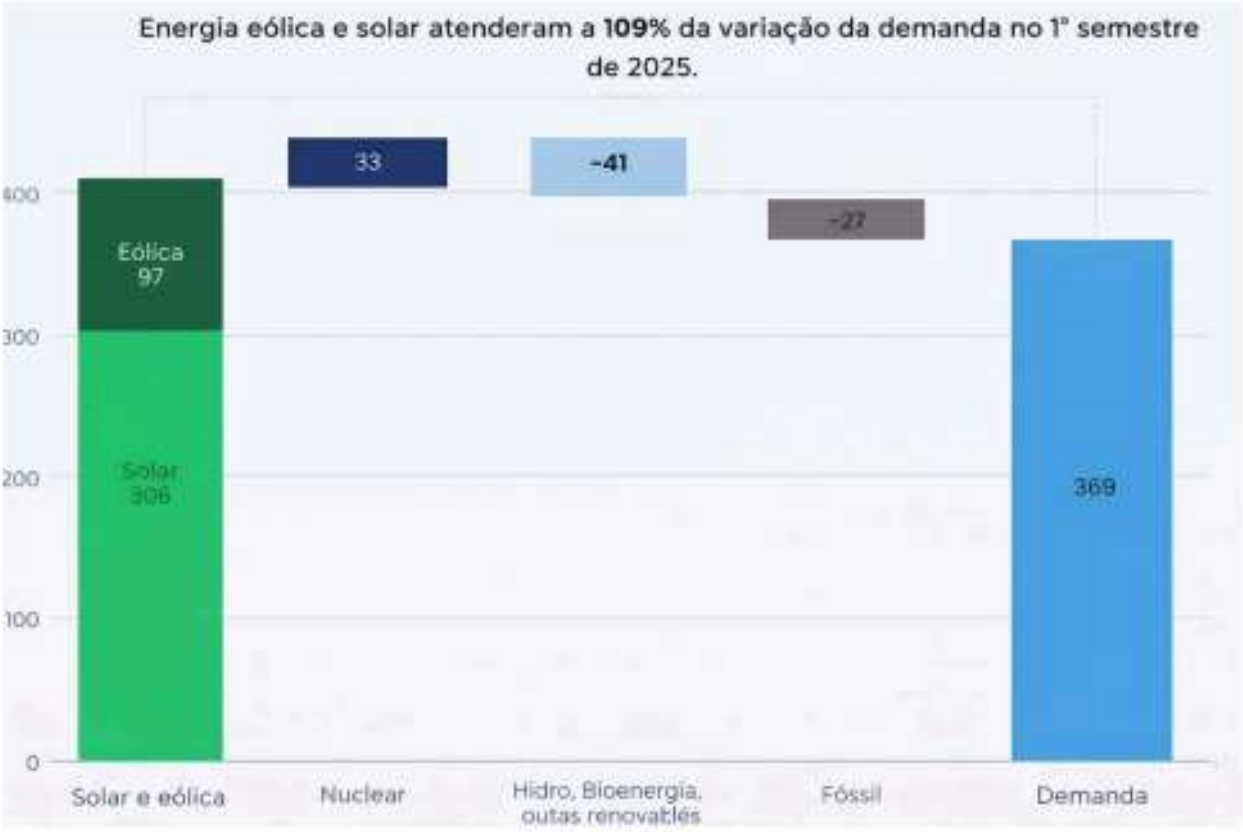
Esse cenário reforça o papel central das energias renováveis na transição energética global, impulsionadas por políticas climáticas e inovação tecnológica. Essa rápida expansão demonstra uma mudança estrutural no sistema energético, posicionando as renováveis como as fontes protagonistas para uma matriz energética sustentável.

Neste contexto marcado pelo crescimento acelerado das energias renováveis, a IoE torna-se essencial para gerir a nova matriz energética, com alta concentração de fontes de energias intermitentes e descentralizadas. A sua integração permite otimizar o equilíbrio entre a geração da demanda energética e oferta energética necessária, assim como conectar a rede elétrica e as fontes energéticas a dispositivos de comunicação que possibilita a coleta de dados de todo sistema, aumentando a confiabilidade e consolidando a *Internet of Energy* (IoE) como tecnologia promissora para a completa transição energética.

4.7 Geração de Eletricidade por Energia Solar e Eólica: O Papel da IoE no Atendimento a Demanda Elétrica Global em 2025

O gráfico da Figura 20, evidencia como a geração de energia solar e eólica se destacou no primeiro semestre de 2025 a nível global para atendimento dos objetivos de descarbonização do planeta. Esse avanço demonstra que a expansão acelerada dessas fontes na matriz elétrica mundial, demonstra não apenas a sua expansão acelerada, mas sua crescente capacidade de atender à demanda energética mundial, consolidando essas duas fontes como protagonistas na matriz energética.

Figura 20 – Crescimento das Energias Solar e Eólica em TWH-2025



Fonte: (Ember, 2025)

O desempenho das fontes solar e eólica, explica-se por uma combinação de fatores tecnológicos, econômicos e políticos. Em termos econômicos a redução de custos de instalação e operação dessas tecnologias tornou-as mais competitivas em relação aos fontes fósseis, os avanços tecnológicos como (Células PERC, Células bifaciais, Turbinas de grande porte e controle aerodinâmico avançado), aumentam a eficiência dos painéis solares e turbinas eólicas, ampliando suas capacidades de geração.

Outro fator importante é o forte apoio político para aproveitamento dessas fontes, através

de políticas públicas e investimentos internacionais voltados à descarbonização, impulsionados por acordos climáticos e metas de neutralidade de carbono. Portanto, com esse avanço torna-se indispensável o uso sistemas digitais para controlar a intermitência das fontes onde a IoE destaca-se como potencial para garantir o funcionamento mais eficiente dessas tecnologias e assim como a sua maturação futura de forma resiliente para a transição energética.

5

Considerações Finais

O estudo da *Internet of Energy* (IoE), evidencia-se como um campo em rápida expansão sustentado por tecnologias evoluídas voltadas a otimização, integração e gestão inteligente de sistemas energéticos. As tendências observadas ao longo desta pesquisa demonstram que a IoE evolui de um tema emergente para um campo maduro que está se consolidando em pesquisas e investigações científicas, caracterizado pelo crescimento contínuo das publicações, pelo aumento do impacto das citações e uma base teórica robusta. Esse processo de maturação científica constitui aspecto fundamental para direcionamento das pesquisas futuras para o avanço do estudo dessa tecnologia.

De modo geral, os resultados confirmam que a IoE, configura-se como um campo multidisciplinar com elevada colaboração científica entre autores, instituições e países. O destaque das áreas da Engenharia Elétrica e Eletrônica, Computação, Telecomunicações e Sustentabilidade posiciona a IoE como um vetor estratégico para o avanço tecnológico em especial no cenário de uma rápida transição energética e da integração de fontes renováveis aos sistemas elétricos. A análise bibliométrica realizada permitiu identificar os autores mais influentes e os países líderes na produção do conhecimento sobre essa área, fornecendo uma base teórica forte para a profundação do estudo nessa área.

De modo geral, o caráter internacional *Internet of Energy* (IoE) favorece a ampla difusão dessa tecnologia em diversas regiões do mundo,fortalecendo a sua aplicação prática para os países em vias de desenvolvimento. Nesse contexto, a IoE apresenta elevado potencial com contribuição para a sustentabilidade socioeconômica e ambiental, ao possibilitar maior eficiência energética, redução das perdas, melhorar o aproveitamento das potencialidades energéticas regionais e ampliação da participação das energias renováveis na matriz energética.

Dessa forma a *Internet of Energy* (IoE), deve ser compreendida não só como uma inovação tecnológica, mas como um elemento estruturante da transição energética, pela sua capacidade de integrar as fontes de energias renováveis e reduzir as emissões, desde que é

acompanhada por políticas públicas inclusivas, adaptadas à realidade de cada país em especial os países em vias de desenvolvimento.

No que se refere a transição energética, o estudo evidencia que para atingir as metas de transição não se deve resumir na substituição dos combustíveis fósseis para as energias renováveis,mas sim uma mudança estrutural no sistema energético envolvendo aspectos tecnológicos, regulatórios, socioambiental e econômico.Observa-se também o papel da eficiência energética como estratégico para a descarbonização pela redução da demanda energética desde na geração, transmissão e consumo energético. A eletrificação do sector do transporte e as tecnologias de monitoramento em tempo real associadas as matrizes energéticas predominantemente renovável consolida a energia elétrica como o vetor da transição energética.

Portanto, conclui-se que o estudo da *Internet of Energy* (IoE) assume um papel importante no cenário energético global. Sua implementação prática representa uma solução promissora para apoiar o cumprimento dos pactos energéticos internacionais e para impulsionar sistemas energéticos mais inteligentes, resilientes e sustentáveis, contribuindo de forma significativa para a transição energética e para o desenvolvimento equilibrado em escala mundial.

5.1 Trabalhos Futuros

Em consequência desse estudo, sugere-se a continuidade das pesquisas sobre a *Internet of Energy* (IoE) enquanto a tecnologia promissora para a digitalização e modernização de sistemas energéticos. Estudos futuros podem aprofundar a análise da evolução científica deste campo, ampliando recorte temporal e incorporação de novas bases de dados para acompanhar as novas tendências evolutivas dessa área, assim como a integração da IoE e eficiência energética em sistemas de microrredes renováveis, avaliação técnico-econômico da sua implementação em países em desenvolvimento, análise das tecnologias emergentes, armazenamento avançado e hidrogênio verde, a estabilidade e confiabilidade dos sistema energéticos descarbonizados.

Referências

Aisha Solutions. *Considerações sobre a Transição Energética no Século XXI*. 2023. Acesso em: 07 fev. 2026. Disponível em: <https://aishasolutions.com.br/consideracoes-sobre-transicao-energetica-no-seculo-xxi/>. Citado na página 39.

AL-SHETWI, A. Q. et al. Digital twin technology for renewable energy, smart grids, energy storage and vehicle-to-grid integration: Advancements, applications, key players, challenges and future perspectives in modernising sustainable grids. *IET Smart Grid*, Wiley Online Library, v. 8, n. 1, p. e70026, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/stg2.70026>. Citado na página 32.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An r-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, Elsevier, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>. Citado na página 46.

BATOOL, A.; ZOWGHI, D.; BANO, M. Responsible ai governance: a systematic literature review. *arXiv preprint arXiv:2401.10896*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10896>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

BISWAS, P. et al. An extensive and methodical review of smart grids for sustainable energy management-addressing challenges with ai, renewable energy integration and leading-edge technologies. *IEEE Access*, IEEE, 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10869464>. Citado 4 vezes nas páginas 17, 30, 32 e 33.

BloombergNEF. *BloombergNEF Finds Global Energy Transition Investment Reached Record $2.3 Trillion in 2025, Up 8% from 2024*. 2026. Acesso em: 07 fev. 2026. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/bloombergnef-finds-global-energy-transition-investment-reached-record-2-3-trillion-in-2025-up-8-from-20>. Citado na página 41.

CAMPANA, P. et al. Smart grids and sustainability: The impact of digital technologies on the energy transition. *Energies*, MDPI, v. 18, n. 9, p. 2149, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en18092149>. Citado na página 15.

CAPRA, C. F. The smart city and its citizens: Governance and citizen participation in amsterdam smart city. In: *Smart Cities and Smart Spaces: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. IGI Global Scientific Publishing, 2019. p. 1407–1427. Disponível em: <https://www.igi-global.com/chapter/the-smart-city-and-its-citizens/211349>. Citado na página 31.

CHEN, H. Renewable energy, security and environment. In: *Handbook of Security and the Environment*. Edward Elgar Publishing, 2021. p. 307–319. Disponível em: <https://doi.org/10.4337/9781789900668.00030>. Citado na página 14.

CODES, G. B. et al. Seoul. 2014. Disponível em: <https://www.usgbc.org/sites/default/files/Seoul.pdf>. Citado na página 31.

DMAP Learning. *O que é Internet das Coisas para Energia (Internet of Things for Energy)*. 2024. Acesso em: 30 mar. 2026. Disponível em: <https://dmaplearning.com/glossario/o-que-e-internet-das-coisas-para-energia-internet-of-things-for-energy/>. Citado na página 54.

DONTHU, N. et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, Elsevier, v. 133, p. 285–296, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>. Citado na página 45.

ECK, N. V.; WALTMAN, L. Software survey: Vosviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics*, Akadémiai Kiadó, co-published with Springer Science+ Business Media BV ..., v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010. Disponível em: <https://akjournals.com/view/journals/11192/84/2/article-p523.xml>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

Ecovalor. *Transição Energética no Brasil: O Papel das Energias Renováveis na Jornada de Descarbonização*. 2026. Acesso em: 08 fev. 2026. Disponível em: <https://ecovalor.eco.br/transicao-energetica-no-brasil>. Citado na página 16.

Ember. *Global Electricity Mid-Year Insights 2025*. 2025. Acesso em: 02 abr. 2026. Disponível em: <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-mid-year-insights-2025/>. Citado na página 56.

European Environment Agency. *Energy efficiency — using less energy for the same output and minimising energy waste*. 2025. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/energy-efficiency>. Accessed: 2026-02. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

FANG, X. et al. Smart grid—the new and improved power grid: A survey. *IEEE communications surveys & tutorials*, Ieee, v. 14, n. 4, p. 944–980, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6099519?casa_token=6Tc98tO92-gAAAAA:C87OmccMrDmiGn2xd_sdm7shEqhm3Q26d1_MnA6j6Cv2x_ZD6chwVP3hN2Tc-SZi5WfwF6tq6tuv>. Citado na página 32.

FI Group Brasil. *A Transição Energética e o Papel das Novas Tecnologias*. 2025. Acesso em: 07 fev. 2026. Disponível em: <https://www.fi-groupbr.com/pt/a-transicao-energetica-e-o-papel-das-novas-tecnologias/?utm_source=chatgpt.com>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

GALPEROVA, E.; MAZUROVA, O. Digitalization and energy consumption. In: ATLANTIS PRESS. *VIth International Workshop'Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security'(IWCI 2019)*. 2019. p. 55–61. Disponível em: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/iwci-19/125917302>. Citado na página 36.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. Ediitora Atlas SA, 2008. Disponível em: <https://www.feata.edu.br/downloads/revistas/economiaepesquisa/v3_artigo01_globalizacao.pdf>. Citado na página 36.

GUO, H. et al. Review of energy routers applied for the energy internet integrating renewable energy. In: IEEE. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*. 2016. p. 1997–2003. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7512602>. Citado na página 28.

HUANG, A. Q. et al. The future renewable electric energy delivery and management (freedm) system: The energy internet. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 1, p. 133–148, 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5634051?casa_token=AMycy7kthh0AAAAA:SvmOLdwJJSjESb48QewYgPzNpcMFir49yuwlBL5IDdN2JkAuH4g6JEAEPOsL3NVH4O0Gg1_RCigI>. Citado na página 26.

HUANG, J. et al. The application and challenge of energy router in energy internet. *Energy Internet*, Wiley Online Library, v. 1, n. 1, p. 14–26, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/ein2.12006>. Citado 4 vezes nas páginas 22, 25, 28 e 29.

HUGH, Q.; SORIA, F. Internet of energy (ioe): A scalable architecture for smart grid applications. *National Journal of Intelligent Power Systems and Technology*, p. 25–33, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.17051/NJIPST/01.04.04>. Citado na página 24.

HUSSAIN, H. M. et al. What is energy internet? concepts, technologies, and future directions. *IEEE access*, IEEE, v. 8, p. 183127–183145, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9216056>. Citado 7 vezes nas páginas 21, 22, 23, 24, 27, 30 e 35.

HUSSAIN, S. S. et al. The emerging energy internet: Architecture, benefits, challenges, and future prospects. *Electronics*, MDPI, v. 8, n. 9, p. 1037, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics8091037>. Citado na página 36.

International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2023*. Paris, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Citado na página 42.

International Renewable Energy Agency. *International Renewable Energy Agency (IRENA)*. Abu Dhabi: [s.n.], 2016. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Renewable_Energy_in_Cities_2016.pdf>. Citado na página 36.

International Renewable Energy Agency (IRENA). *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf>. Citado na página 43.

KABALCI, Y. et al. Internet of things applications as energy internet in smart grids and smart environments. *Electronics*, MDPI, v. 8, n. 9, p. 972, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics8090972>. Citado na página 35.

KAFLE, Y. R. et al. Towards an energy internet. In: *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. IEEE, 2016. p. 1–6. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311251136_Towards_an_internet_of_energy>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.

KIKUCHI, A. Y.; BETTERI, L. A.; ARAÚJO, L. S. Iot–internet das coisas: um levantamento sobre as tendências tecnológicas atuais. *Revista Interface Tecnológica*, v. 18, n. 2, p. 118–130, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31510/infa.v18i2.1211>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

LAKHAN, A. et al. Beds: Blockchain energy efficient ioe sensors data scheduling for smart home and vehicle applications. *Applied Energy*, Elsevier, v. 369, p. 123535, 2024. Citado na página 24.

LAROUSSI, I.; HUAN, L.; XIUSHENG, Z. How will the internet of energy (ioe) revolutionize the electricity sector? a techno-economic review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 72, p. 3297–3311, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.323>. Citado na página 24.

MA, Y. et al. An overview of energy routers. In: *Proceedings of the 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. IEEE, 2017. p. 4104–4108. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/318692935_An_overview_of_energy_routers>. Citado na página 26.

MAHADIK, S.; GEDAM, M.; SHAH, D. Environmental sustainability with smart grid sensors. *Frontiers in Artificial Intelligence*, v. 7, p. 1510410, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1510410>. Citado na página 17.

MALOBERTI, F. et al. *A short history of circuits and systems*. River Publishers, 2016. Disponível em: <https://ieee-cas.org/files/ieeecass/2022-01/a_short_history_of_circuits_and_systems-_ebook-_web.pdf>. Citado na página 32.

MISHRA, P.; SINGH, G. Energy management systems in sustainable smart cities based on the internet of energy: A technical review. *Energies*, MDPI, v. 16, n. 19, p. 6903, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16196903>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

Observatório Sistema Fiep / Painel de Indicadores de Mudanças Climáticas de Curitiba. *Energias renováveis ganham escala e devem consolidar virada histórica na geração elétrica em 2026*. 2026. Publicado em: 19 jan. 2026. Acesso em: 30 mar. 2026. Disponível em: <https://www.paineldemudancasclimaticas.org.br/noticia/energias-renovaveis-superam-carvao-eletricidade-global>. Citado na página 55.

ORUMWENSE, E. F.; ABO-AL-EZ, K. M. Internet of things for smart energy systems: A review on its applications, challenges and future trends. *AIMS electronics and electrical engineering*, AIMS Press (United States), 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11189/9811>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

SHAH, J.; KOTHARI, J.; DOSHI, N. A survey of smart city infrastructure via case study on new york. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 160, p. 702–705, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919317247>. Citado na página 31.

SIANO, P. Demand response and smart grids—a survey. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 30, p. 461–478, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.022>. Citado na página 36.

SILVA, W. M. d. *Integração de dispositivos elétricos inteligentes de abordagem legada em sistemas Smart Grid baseados na IoT*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/32053>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

StatRanker. *Top 100 Countries by Share of Renewable Energy in Power Generation, 2025*. Sem data de publicação. Acesso em: 07 fev. 2026. Disponível em: <https://statranker.org/climate/top-100-countries-by-share-of-renewable-energy-in-power-generation-2025/>. Citado na página 42.

STRIELKOWSKI, W. et al. Internet of energy (ioe) and high-renewables electricity system market design. *Energies*, MDPI, v. 12, n. 24, p. 4790, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12244790>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

TASHIRO, K.; TAKAHASHI, R.; HIKIHARA, T. Feasibility of power packet dispatching at in-home dc distribution network. In: IEEE. *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. 2012. p. 401–405. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2012.6486017>. Citado na página 28.

TAVAKOLI, J. Smil, vaclav. energy transitions: global and national perspectives. *CHOICE: Current Reviews for Academic Libraries*, American Library Association CHOICE, v. 54, n. 11, p. 1664–1665, 2017. Disponível em: <http://www.ala.org/acrl/choice/about>. Citado na página 39.

VEELEN, B. V.; HORST, D. V. D. What is energy democracy? connecting social science energy research and political theory. *Energy research & social science*, Elsevier, v. 46, p. 19–28, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.010>. Citado na página 36.

VIJAYAPRIYA, T.; KOTHARI, D. P. Smart grid: an overview. *Smart Grid and Renewable Energy*, Scientific Research Publishing, v. 2, n. 4, p. 305–311, 2011. Disponível em: <(http://www.SciRP.org/journal/sgre>. Citado na página 33.

WOLNIAK, R. Smart mobility in smart city–copenhagen and barcelona comparision. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*, 2023. Disponível em: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-8ea8daa6-8588-4381-84b1-7bd0586f0668>. Citado na página 31.

World Bank. *Digital Development for Energy Systems*. Washington, DC: [s.n.], 2018. Disponível em: <WorldBankâĂŞDigitalDevelopmentforEnergySystems(2018)>. Citado na página 36.

ZHANG, J. et al. City brain: practice of large-scale artificial intelligence in the real world. *IET Smart Cities*, Wiley Online Library, v. 1, n. 1, p. 28–37, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-smc.2019.0034>. Citado na página 31.

ZHANG, J.; WANG, W.; BHATTACHARYA, S. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic. In: IEEE. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. 2012. p. 1–8. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175637>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric methods in management and organization. *Organizational research methods*, Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>. Citado na página 45.