

Mapeamento Sistemático de Projetos em Sistemas de Energia Transativos no Contexto das Smart Grids

Ana Carolina Garcia Cordeiro
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
acarolinagc2@gmail.com

Ruth Pastora Saraiva Leão
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
rleao@dee.ufc.br

Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
rfurtado@dee.ufc.br

Lucas Silveira Melo
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
lucassmelo@ufc.br

Levi dos Santos Nogueira
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
levisnog@gmail.com

Raquel Cristina Filiagi Gregory
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
rgregory@dee.ufc.br

Abstract—A crescente integração de Recursos Energéticos Distribuídos e a transição para uma economia de baixo carbono têm impulsionado a evolução das redes elétricas inteligentes, modernizando o setor elétrico. Nesse contexto, os Sistemas de Energia Transativos (TES) emergem como uma solução promissora para otimizar a gestão de energia e melhorar a qualidade da energia. Este artigo apresenta um mapeamento sistemático de projetos e aplicações práticas em Sistemas de Energia Transativos no contexto das redes elétricas inteligentes, a fim de identificar tendências e desafios. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, selecionando 42 trabalhos sobre o tema. Os artigos destacam a crescente adoção de TES em todo o mundo, bem como o uso de fontes de energia renovável. Os principais desafios, como altos custos operacionais, preocupações com segurança cibernética, questões regulatórias e complexidade computacional, foram identificados. O estudo fornece insights sobre o estado atual dos TES e seu potencial para aumentar a eficiência energética e a sustentabilidade nos sistemas de energia.

Keywords—sistemas de energia transativos, smart grids, mapeamento sistemático, qualidade da energia elétricas, fontes de energia renovável.

I. INTRODUÇÃO

A gestão das redes de distribuição de energia elétrica tem se tornado um desafio crescente nos últimos anos, impulsionada pelo aumento da demanda e pela proliferação de recursos energéticos distribuídos (DER), especialmente os renováveis. A necessidade de reduzir as emissões de gases poluentes, adotada por um número cada vez maior de países, tem influenciado de maneira significativa a forma como a energia é gerada e consumida [1].

O ano de 2023 testemunhou um marco notável na trajetória da energia renovável, com um crescimento global de 13,9%, atingindo a marca de 3870 GW em capacidade instalada. Os dados divulgados pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) revelam um avanço significativo, protagonizado principalmente pela energia solar fotovoltaica e eólica. No período entre 2010 e 2023, a energia solar fotovoltaica, impulsionada por avanços tecnológicos e custos decrescentes, multiplicou sua capacidade em 40 vezes, enquanto a energia eólica expandiu sua capacidade em seis vezes no mesmo período [2].

A expansão das energias renováveis variáveis traz consigo desafios complexos para a rede elétrica. A intermitência das fontes de energia renovável (FER) dificulta o equilíbrio entre oferta e demanda [3]. A previsão da geração em longos períodos também se mostra um desafio [4].

Adicionalmente, a qualidade da energia pode ser afetada, com variações de tensão e problemas de estabilidade, devido às oscilações de potência [4],[5].

Diante dos desafios energéticos atuais, o uso de estratégias inteligentes para otimizar os recursos é crucial. As Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*) destacam-se nesse cenário, integrando tecnologias de telecomunicações e sensoriamento para aprimorar a gestão energética. Com fluxo bidirecional de informações e eletricidade, as *Smart Grids* promovem maior engajamento dos consumidores, interoperabilidade entre agentes e acesso à informação, resultando em benefícios como flexibilidade, confiabilidade, sustentabilidade e eficiência aprimoradas [6],[7].

Nos últimos anos, um conceito inovador tem se destacado no cenário das *Smart Grids*: os Sistemas de Energia Transativos (do inglês, TES). Eles oferecem uma nova forma de gerenciar e distribuir energia, promovendo um mercado mais eficiente, transparente e democrático. Em um sistema de energia transativo, a energia é vista como um bem que pode ser negociado e trocado entre os participantes do mercado. Consumidores e geradores, sejam eles grandes empresas ou pequenos produtores, podem comprar e vender energia uns para os outros, utilizando plataformas digitais e tecnologias de comunicação [8].

Os TES incentivam o consumo consciente de energia, permitindo que os usuários reajam a preços em tempo real e ajustem seus hábitos de acordo com a disponibilidade e o custo da energia. Ao otimizar o uso da energia e incentivar a concorrência entre os participantes do mercado, os TES podem contribuir para a redução dos custos da energia para os consumidores [9].

Apesar de todas as vantagens, a implementação de sistemas de energia transativos ainda enfrenta desafios quanto ao seu aspecto prático. Em um cenário de transformação energética e diante da necessidade de novas abordagens para a operação e o mercado de energia elétrica, especialmente no contexto das redes elétricas inteligentes, este artigo tem como objetivo realizar um mapeamento sistemático de projetos e aplicações práticas em Sistemas de Energia Transativos. O estudo se propõe a atingir os seguintes objetivos específicos: identificar e analisar projetos e aplicações práticas de TES em diferentes contextos e escala; avaliar as tendências e desafios relacionados à implementação e ao desenvolvimento de TES; e, fornecer insights valiosos para pesquisadores, empresas e formuladores de políticas sobre o estado da arte e as perspectivas futuras dos TES.

O artigo está estruturado em 5 seções. A seção I apresenta a introdução do trabalho. A seção II discorre sobre *smart grids* e TES. A seção III descreve as diretrizes para o mapeamento sistemático. A seção IV apresenta os resultados do mapeamento sistemático de projetos e aplicações de TES e finalmente a seção V traz as conclusões.

II. FUNDAMENTOS SOBRE SMART GRIDS E SISTEMAS DE ENERGIA TRANSATIVOS

A. Smart Grids

O conceito de *Smart Grids* (SG) está relacionado com a concepção de uma rede elétrica com funcionalidades avançadas e que incorpora uma variedade de tecnologias de informação e comunicação. Uma SG tem como principais aspectos a melhoria da eficiência, confiabilidade e sustentabilidade da rede elétrica [10].

As redes inteligentes representam uma evolução significativa em relação às redes elétricas tradicionais. Enquanto a rede tradicional é meramente responsável pela distribuição de energia elétrica de forma unidirecional, a SG permite fluxo bidirecional de informações e eletricidade, sendo capaz de tomar decisões e comunicá-las [11], [12].

A Figura 1 ilustra a integração entre os recursos energéticos distribuídos (REDs) e a infraestrutura de informação e comunicação, fundamental para garantir o fornecimento de energia de um modo mais eficiente, seguro e confiável.

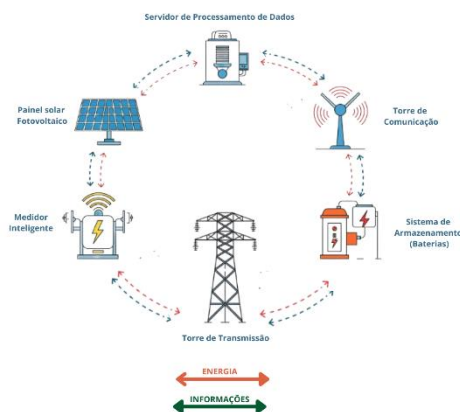


Figura 1 - Representação do fluxo de energia e informações em uma rede com diferentes recursos energéticos distribuídos

As SGs são caracterizadas pela tecnologia digital, controle abrangente, sensores distribuídos, automonitoramento, *self-healing* e alta capacidade de adaptação. Elas são mais flexíveis e resilientes, graças à integração de tecnologias digitais e à participação ativa dos consumidores [13].

Portanto, as SG fornecem uma base para a implementação de sistemas de energia transativos. Para isso, vários requisitos são essenciais, tais como comunicação bidirecional, sinergia entre Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) e a rede elétrica, supervisão inteligente e remota, infraestrutura avançada de medição inteligente [9].

B. Sistemas de Energia Transativos

De acordo com [14], “energia transativa” refere-se a um conjunto de mecanismos econômicos e de controle que permite o balanceamento dinâmico da demanda e da oferta de energia em toda a infraestrutura elétrica, utilizando o valor

como parâmetro operacional. Os Sistemas de Energia Transativos combinam abordagens baseadas no mercado com sistemas de controle automatizados para gerenciar transações de energia em toda a infraestrutura elétrica, da geração ao consumo, incluindo redes de transmissão e distribuição [9], [16]. É característico do TES usar sinais de preço para incentivar a participação e orientar a tomada de decisões por consumidores e produtores [15]. Ainda, o TES facilita ajustes em tempo real na oferta e demanda de energia para manter a estabilidade e a eficiência da rede.

Esses sistemas demandam uma interação complexa de várias tecnologias: medidores inteligentes, recursos de geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia, aparelhos inteligentes, plataformas e softwares sofisticados. A interoperabilidade garante que essas diversas tecnologias possam “conversar” entre si, compartilhando dados e coordenando ações. Todas as entidades participantes do TES, de grandes concessionárias a prosumidores residenciais, precisam ser capazes de se comunicar e transacionar perfeitamente [17]. A interoperabilidade oferece a base para a escalabilidade. À medida que os TES crescem e evoluem, eles precisarão acomodar novos participantes, tecnologias e mecanismos de mercado. A capacidade “*plug-and-play*” é essencial para a viabilidade e expansão dos sistemas no longo prazo.

Os requisitos fundamentais para a implementação do TES, em consonância com [14], são: uso de métodos de otimização altamente coordenados; confiabilidade e controle do sistema; integração de energia renovável e outros DERs; participação não discriminatória de participantes qualificados; interfaces observáveis e auditáveis; escalabilidade e adaptabilidade.

A aplicação dos TES oferece diversos benefícios para a gestão e operação do sistema elétrico. Com base em [19] e [20], destacam-se os seguintes pontos principais: melhor utilização dos ativos da rede; otimização de custos; maior resiliência e confiabilidade; maior controle sobre o uso de energia pelos consumidores; incentivo ao uso de fontes de energia renovável, gestão eficiente da rede e descentralização da gestão operativa da rede elétrica.

Os mercados de energia transativos representam uma evolução importante nos mercados de energia, permitindo transações mais dinâmicas e flexíveis. Os mercados de energia transativos se relacionam com os mercados de eletricidade através de negociações econômicas, nas quais operadores de rede, usuários finais e demais agentes interessados fornecem lances e ofertas para trocar energia de forma a maximizar os ganhos de cada parte [18].

Nos TES, diversas estruturas de mercado podem coexistir, cada qual com suas características e mecanismos [21], [22]. As principais estruturas são aqui resumidas:

- Mercados Bilaterais: Produtores e consumidores negociam diretamente entre si, estabelecendo preços e condições de troca de energia.
- Mercados de Leilão: Um operador de mercado centraliza as ofertas de compra e venda de energia, realizando leilões periódicos para definir os preços e a alocação da energia.
- Mercados Ponto-a-Ponto (P2P): Os participantes negociam diretamente entre si, utilizando plataformas digitais para facilitar as transações.

- Mercados de Energia Comunitários: Os membros de uma comunidade energética (como um bairro, um condomínio ou um grupo de empresas) se unem para gerar, consumir e trocar energia entre si.
- Mercados Híbridos: Combinam diferentes estruturas de mercado, como mercados P2P e de energia comunitários, para atender às necessidades específicas de cada participante. Esse modelo permite que os participantes, sejam eles agregadores, microrredes ou prosumidores, negociem diretamente entre si, promovendo maior cooperação e garantindo a privacidade dos clientes.

A escolha da estrutura de mercado mais adequada para cada sistema depende de diversos fatores, como o tamanho do mercado, o número de participantes, a infraestrutura disponível e os objetivos dos participantes.

III. DIRETRIZES PARA O MAPEAMENTO SISTEMÁTICO

Neste tópico apresenta-se a metodologia desenvolvida para a condução das pesquisas realizadas neste trabalho. Para atingir as metas pretendidas, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, baseada nas premissas estabelecidas em [23]. O objetivo dessa revisão consistiu em mapear os principais projetos e aplicações práticas envolvendo Sistemas de Energia Transativos, de forma a identificar as tendências e desafios reais na atualidade.

A Revisão Sistemática (RS) tem como principal propósito identificar, analisar e interpretar dados de pesquisa relacionados a um determinado tópico de interesse. A realização de uma revisão com base em uma abordagem sistemática, resulta em um processo controlado e com elevado rigor científico, garantindo a auditabilidade, reprodutibilidade e maior imparcialidade, evitando vieses e identificando as lacunas existentes na pesquisa [23].

Na gestão da RS, foram utilizados os seguintes recursos:

- Formulários de pesquisa (Microsoft Excel): Planilha estruturada para organizar as informações em abas específicas para cada etapa da revisão;
- Plataforma Rayyan.ai: Plataforma online que reúne um conjunto de recursos para apoio à mineração dos dados, tal como importação e processamento de dados bibliométricos (arquivos RIS, BibTex e CSV), identificação de arquivos duplicados e com elevada similaridade, revisão colaborativa, dentre outros [24].

Essencialmente, a RS é estruturada em três etapas: Planejamento, Condução e Publicação dos Resultados. Portanto, na presente seção, são descritas as etapas do processo de revisão sistemática de forma detalhada, desde a definição do protocolo de pesquisa até a seleção dos estudos, cujos resultados são discutidos na seção IV.

A. Planejamento

Na etapa de Planejamento é definido o protocolo de pesquisa. O protocolo consiste em registrar todas as regras e estratégias que serão consideradas para a seleção dos trabalhos de acordo com os objetivos da pesquisa. Portanto, para a consolidação do protocolo é necessário, primeiramente, definir o título e objetivos da RS. A partir dessa definição, são formuladas as questões de pesquisa, as quais nortearão todo o processo de revisão.

Usualmente, formula-se uma questão de pesquisa alinhada aos objetivos da RS, sendo esta denominada por questão principal ou primária (QP). Podem também ser incluídas questões secundárias (QS), as quais deverão estar diretamente relacionadas à QP.

Para este artigo, o objetivo da revisão sistemática consistiu em realizar um mapeamento da literatura científica sobre projetos e aplicações práticas envolvendo TES, a fim de identificar tendências e desafios de sua implementação. Assim, foram formuladas as questões de pesquisa indicadas no Quadro 1.

QUADRO 1. QUESTÕES DE PESQUISA

ID	QUESTÕES
QP	Quais os principais projetos/aplicações práticas envolvendo TES?
QS1	Quais os países/regiões envolvidos?
QS2	Quais as fontes de energia renovável utilizadas?
QS3	Quais os recursos energéticos empregados?
QS4	Quais os principais interesses de pesquisa ou áreas de estudo?
QS5	Quais os principais desafios evidenciados?

Um ponto relevante da revisão, consiste em realizar a busca sistemática propriamente dita. Para que ela seja feita de forma assertiva, foi formulada uma *string* de busca.

O Quadro 2 apresenta a formulação da *string* implementada, na qual as palavras-chave relativas a cada termo referência são conectadas por operadores lógicos “OR”. Por fim, as sentenças resultantes de cada linha são conectadas umas às outras por meio de operadores lógicos “AND”. Ressalta-se que os termos definidos com o símbolo (*) generalizam as terminações de palavras que tenham o mesmo significado, mas com pequenas variações, i.e., “smart grid” e “smart grids”.

QUADRO 2. FORMULAÇÃO DA STRING DE BUSCA

TERMO REFERÊNCIA	PALAVRA-CHAVE
Redes Elétricas Inteligentes	Smart Grid*, Microgrid*
Energia Transativa	Transactive Energy, Transactive Energy System, Transactive Market
Projeto	Project*, Real Case*
STRING: ("Smart Grid*" OR "Microgrid*") AND ("Transactive Energy" OR "Transactive Energy System" OR "Transactive Market") AND ("Project*" OR "Real Case*")	

Muito embora a *string* permita limitar o escopo de busca, nem todos os trabalhos filtrados serão objeto de interesse da pesquisa. Logo, também deve constar no protocolo os critérios de seleção dos estudos (CS), podendo ser do tipo inclusão (I) ou exclusão (E). O Quadro 3 apresenta os critérios adotados.

QUADRO 3. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS

ID	DESCRIÇÃO
CS1	(I) Estudos completos publicados entre 2020 e 2024
CS2	(I) Estudos que utilizam Português ou Inglês como idioma oficial do texto

CS3	(I) Estudos focados em projetos e aplicações práticas de Sistemas de Energia Transativos
CS4	(E) Estudos que não atendem aos critérios de inclusão
CS5	(E) Estudos secundários (<i>survey, review, etc.</i>)
CS6	(E) Estudos duplicados ou com similaridade superior a 80%*

*A avaliação utiliza recursos disponíveis na plataforma Rayyan.ai

Como fontes de busca, foram escolhidas as principais bases de dados bibliométricas e/ou repositórios de trabalhos científicos na área de engenharia, quais sejam, *Web of Science*, *Scopus*, *IEEE Xplore* e *Engineering Village*.

Por fim, ainda no Planejamento, devem ser definidas todas as estratégias para a realização da pesquisa. Neste trabalho, foram definidas as seguintes estratégias:

- Estratégia de busca: Inserção da *string* nas fontes de busca.
- Estratégia de seleção dos estudos:
 - (S1) Filtragem automática de trabalhos (fontes de busca e Rayyan.ai);
 - (S2) Leitura de título e abstract dos trabalhos classificados em (S1);
 - (S3) Leitura dos trabalhos completos classificados em (S2).
- Estratégia de extração dos dados: preenchimento de formulário de extração a partir dos trabalhos selecionados em (S3).
- Estratégia de sumarização dos dados: análises qualitativas e quantitativas dos dados extraídos.
- Estratégia de publicação dos resultados: construção de uma plataforma interativa, utilizando *Business Intelligence* (BI), contendo o repositório dos dados bibliométricos e as análises estatísticas.

Findada a etapa de Planejamento, procede-se à etapa de Condução. É relevante ressaltar, todavia, que o protocolo deverá ser avaliado e ajustado quantas vezes necessário, de forma a contribuir com a qualidade dos resultados da pesquisa.

B. Condução

A etapa de Condução é iniciada pela busca sistemática propriamente dita, na qual insere-se a *string* nas fontes de busca definidas no protocolo. A Figura 2 apresenta o quantitativo dos resultados de busca por fonte.

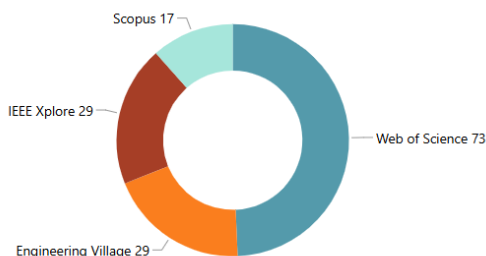


Figura 2 – Quantitativo dos resultados de busca por fonte

Na etapa de condução, os dados bibliométricos (arquivos CSV, RIS BibTex, etc.) devem ser compilados para que se proceda à seleção dos estudos e extração dos dados. Neste trabalho optou-se pela utilização da plataforma Rayyan.ai com esse propósito, haja vista as inúmeras vantagens mencionadas.

Dessa forma, com base nas estratégias definidas, foram selecionados 42 trabalhos. Esse resultado foi obtido a partir da execução dos três estágios da estratégia de seleção dos estudos (S1, S2 e S3). A Figura 3 ilustra o quantitativo de trabalhos classificados por estágio, bem como o resultado final da seleção.

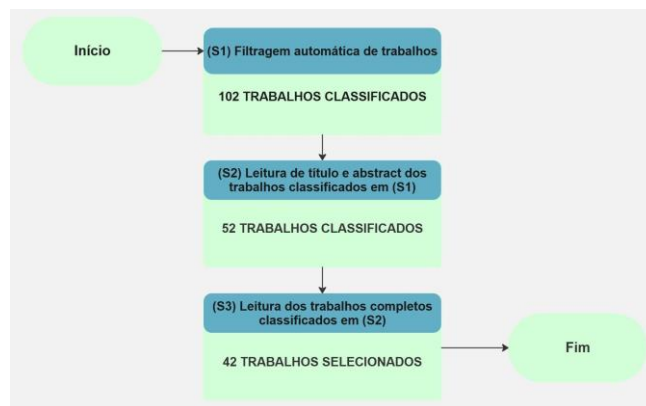


Figura 3 – Trabalhos classificados em cada estágio de seleção

Findando o processo de seleção, procede-se à extração dos dados. Conforme mencionado, a estratégia dessa etapa consistiu no preenchimento do formulário de extração, o qual contém as respostas às questões de pesquisa para os 42 trabalhos selecionados. Cabe mencionar que, além da questão primária, todos os trabalhos selecionados devem ser capazes de responder ao menos uma questão secundária. Logo, as questões QS1 e QS4 foram respondidas por 100% dos trabalhos. A QS2 foi respondida por 69% dos trabalhos. A QS3 por 45,2% e a QS5 por 54,8% dos trabalhos.

C. Publicação de Resultados

A etapa de Publicação de Resultados consiste, fundamentalmente, na apresentação dos resultados da pesquisa. Neste trabalho optou-se pelo desenvolvimento de uma plataforma interativa utilizando ferramentas de *Business Intelligence* (BI), a qual servirá como repositório de informações bibliométricas da literatura selecionada pela RS, bem como das análises estatísticas obtidas a partir dos resultados da pesquisa.

O objetivo de apresentar os resultados neste formato deve-se à capacidade dessas ferramentas de gerar relatórios e *dashboards* personalizados a partir de diversas fontes de dados. Além disso, elas organizam e processam as informações, facilitando a análise desses dados e fornecendo uma visualização interativa. Uma vez que os estudos conduzidos neste trabalho se tratam de parte dos desenvolvimentos previstos em um projeto de pesquisa, a ferramenta desenvolvida servirá como mecanismo de apoio às pesquisas a serem realizadas no âmbito do projeto.

Ressalta-se que as informações das publicações selecionadas estão disponíveis no Repositório de Dados Bibliométricos, o qual poderá ser acessado em [46].

IV. MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DE PROJETOS E APLICAÇÕES PRÁTICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA TRANSATIVOS

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados da RS à luz dos 42 trabalhos selecionados e das questões de pesquisa formuladas no Quadro 1.

Conforme mencionado no tópico III.B, nem todos os trabalhos analisados responderam integralmente às questões de pesquisa. Assim, serão apresentados apenas os resultados correspondentes às informações efetivamente abordadas nos estudos selecionados.

A. Quanto aos principais países/regiões envolvidos

Na Figura 4, apresenta-se a distribuição em mapa dos trabalhos de acordo com o país/região de origem da publicação.



Figura 4 – Distribuição dos trabalhos em mapa de acordo com o país/região de origem

Nota-se, portanto, a variedade de países/regiões nos quais os projetos e aplicações práticas de Sistemas de Energia Transativos estão sendo desenvolvidos.

De forma complementar, a Figura 5 apresenta uma visão quantitativa dessa distribuição, porém focada nos países e regiões mais representativos. Conforme evidenciado, os países que mais se destacam na implementação de projetos envolvendo Sistemas de Energia Transativos são os Estados Unidos (29,31%), China (20,69%), Austrália (6,90%), Índia (6,90%), Canadá (5,17%), Arábia Saudita (3,45%), Catar (3,45%), Irã (3,45%) e Brasil (1,72%); e a região da União Europeia (18,97%).

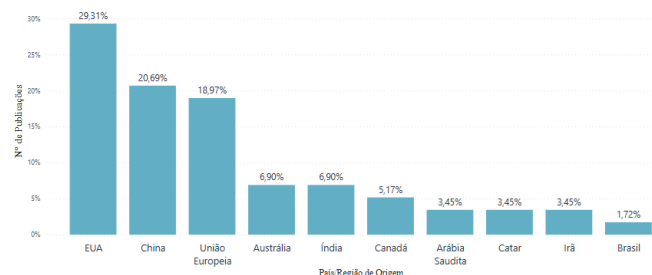


Figura 5 – Distribuição percentual dos trabalhos por país/região de origem

É válido mencionar que o conceito de energia transativa teve origem nos Estados Unidos. Além disso, o país conta com uma infraestrutura avançada no tocante às *Smart Grids*, bem como um forte investimento em tecnologia, razão pela qual apresenta o maior volume de publicações no tema.

Também é possível observar que os países da União Europeia, Oriente Médio e Ásia também estão investindo no desenvolvimento de projetos de energia transativa. Isso demonstra um interesse global em desenvolver sistemas e tecnologias que contribuam para o aumento da confiabilidade e a eficiência das redes elétricas.

Outro ponto meritório de destaque é que boa parte das publicações são feitas de forma colaborativa entre

pesquisadores de vários países, os quais apresentam pontos de vista diferentes. Isso demonstra que o TES pode atender a interesses diversificados no tocante às questões políticas, econômicas, sociais e tecnológicas.

B. Quanto às principais fontes de energia renovável utilizadas

A Figura 6 ilustra as principais fontes de energia renovável identificadas na literatura selecionada, quais sejam, Energia Solar Fotovoltaica, Energia Eólica e Hidrelétricas.

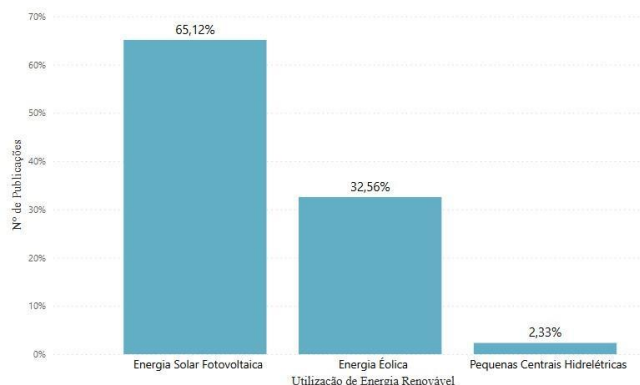


Figura 6 – Distribuição dos trabalhos de acordo com a utilização de energia renovável

Nota-se, portanto, que 65,12% das publicações mencionam a Energia Solar Fotovoltaica em seus estudos, enquanto 32,56% dos trabalhos citam a Energia Eólica. Uma terceira fonte renovável é mencionada em 2,33% dos trabalhos, são as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH).

Um ponto relevante a ser avaliado é como os sistemas de energia transativos estão inseridos no contexto da transição energética e sustentabilidade das redes elétricas. Nesse aspecto, os resultados da revisão permitiram estratificar o número de trabalhos que utilizam Fontes de Energia Renovável (FER) *versus* aqueles que não utilizam ou não mencionam explicitamente essa questão. A Figura 7 ilustra essa relação em termos quantitativos, na qual é possível observar que os trabalhos que utilizam energia renovável em seus estudos representam uma parcela de 76,79% do total.

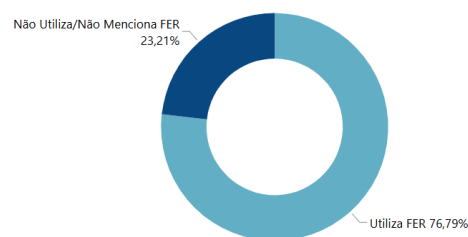


Figura 7 – Percentual de trabalhos que utilizam fontes de energia renovável (FER) em seus estudos

C. Quanto aos tipos de recursos energéticos utilizados

A Figura 8 apresenta a relação percentual do número de citações de todos os recursos energéticos mapeados pela revisão sistemática, quais sejam, FERs (solar fotovoltaica, eólica e PCHs), sistemas de armazenamento em baterias, veículos elétricos e geradores a diesel (cogeração).

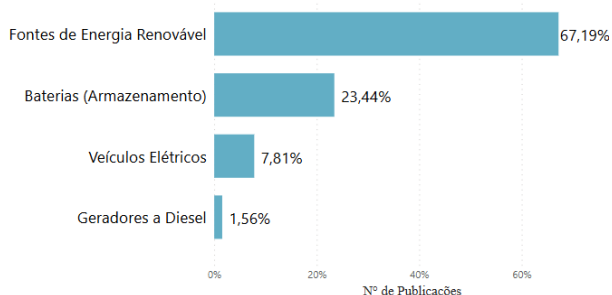


Figura 8 – Distribuição dos recursos energéticos por número de citações

De acordo com a figura, observa-se a predominância das fontes renováveis de energia, com 67,19% de participação no número de citações. Na sequência, tem-se os sistemas de armazenamento a baterias, representando 23,44% do total. Em menor proporção também aparecem os veículos elétricos (7,81%) e os geradores a diesel (1,56%).

Os resultados demonstram uma tendência de diversificação dos recursos energéticos distribuídos, com forte participação de FERs e sistemas de armazenamento a baterias. O aumento de fontes renováveis distribuídas, com predominância da solar fotovoltaica, demanda soluções flexíveis para o melhor aproveitamento energético. Um exemplo disso foi mencionado em [48], no qual esse recurso é empregado para armazenar a energia renovável excedente, permitindo seu uso posterior para alimentar diferentes tipos de aparelhos conforme a demanda energética. Esses aparelhos podem ser categorizados de acordo com sua flexibilidade de operação: ajustáveis, como ar-condicionado, que podem ser programados; flexíveis, como as máquinas de lavar, que podem operar em horários estratégicos; e inflexíveis, como iluminação, que requer energia contínua. Os benefícios dessa flexibilidade também são tratados no trabalho [43], no qual o sistema de armazenamento é utilizado para aumentar a participação dos consumidores na geração e gestão de energia nas smart grids.

Nota-se, também, a participação dos veículos elétricos (VE) nos estudos mapeados, os quais vêm ganhando destaque nos últimos anos. Nos trabalhos [29], [33], [36], [38] e [45] são realizados estudos envolvendo veículos elétricos, uma vez que o setor de transportes com VE se tornou um dos principais consumidores de eletricidade nos últimos anos. Nesse sentido, a integração dos VE no contexto de energia transativa tem sido explorada como uma estratégia para otimizar a gestão energética das microrredes. Modelados como cargas móveis e flexíveis, os veículos elétricos podem contribuir para a estabilidade do sistema ao ajustar seus perfis de carregamento e descarregamento conforme a demanda e o preço da eletricidade variada [33].

No tocante aos geradores a diesel, de acordo com a referência [44], este recurso pode ser empregado como recurso complementar à energia proveniente do sistema de distribuição, podendo ser utilizado para fornecer a parcela de energia necessária que não é suprida pelos recursos renováveis.

D. Quanto aos principais interesses de pesquisa identificados

A fim de verificar os principais assuntos de interesse das publicações selecionadas, realizou-se a classificação dos estudos em cinco categorias: Otimização/ Gerenciamento de

Recursos Energéticos, Plataforma de Co-simulação, Privacidade de Dados e Segurança Cibernética, Sistemas de Comunicação e Outros. A distribuição percentual dos trabalhos classificados é apresentada na Figura 9.

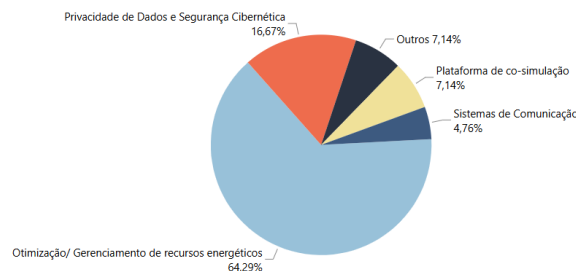


Figura 9 – Classificação dos trabalhos quanto ao tipo de estudo

A maioria dos trabalhos, cerca de 64,3%, focam na otimização de recursos energéticos. Estão englobados nesta categoria estudos que possuem o objetivo de maximizar a eficiência dos sistemas de energia transativos. Nesse contexto, nos trabalhos [25], [35] e [41], são propostas estratégias para otimizar a operação integrada de energia solar e armazenamento, gerenciar recursos para redução da demanda de pico e ampliar o uso eficiente de energia, além de calcular trocas de energia mais rentáveis para os prosumidores.

Com 16,67%, destacam-se as pesquisas sobre privacidade de dados e segurança cibernética, uma área fundamental para o avanço da energia transativa. Observa-se a crescente preocupação com a segurança nos sistemas, especialmente diante de diversas ameaças, como ataques cibernéticos e injeção de dados falsos no sistema. Nesse contexto, uma estratégia frequentemente comentada nos trabalhos dessa área, a exemplo das referências [31], [38] e [40], é o uso de tecnologias baseadas em *Distributed Ledger Technologies*, como o *blockchain*, que proporcionam um ambiente de negociação de energia mais seguro e eficiente. Além disso, no trabalho [26] é mencionado aspectos relacionados ao impacto causado por ataques de injeção de dados falsos.

As plataformas de co-simulação correspondem a 7,14% do total analisado, em que são apresentados simulações computacionais e desenvolvimento de plataformas que permitem projetar e validar o mercado de TE, avaliar a arquitetura de mercado, implementar TES em configurações realistas para garantir a transparência do comércio de energia. Em [30] e [32], são discutidos como as plataformas de co-simulação desenvolvidas são altamente coordenadas para a negociação de energia, permitindo não apenas projetar e validar o mercado de TE, mas também, garantir a transparência nas transações. Além disso, essas plataformas são capazes de rastrear os diferentes comportamentos de geração e consumo de energia dos prosumidores.

Embora menos abordado, com apenas 4,76% dos estudos, os sistemas de comunicação têm papel fundamental nos sistemas de energia transativa, permitindo a interação entre os usuários e garantindo a interoperabilidade do sistema. No trabalho [28] é implementado um software que permite aos usuários interagir com o mercado. Já em [37] é enfatizado a importância da interoperabilidade dentro da arquitetura de TE.

As publicações classificadas como “Outros” correspondem àquelas que não compreendem nenhuma das

classificações destacadas, mas que ainda são fundamentais para o entendimento e implementação de projetos em TES, a exemplo da implementação de negociação de energia *peer-to-peer* e modelagem dos preços de mercado [47].

E. Quanto aos principais desafios evidenciados

A Figura 10 apresenta os principais desafios evidenciados nos trabalhos analisados, bem como os respectivos percentuais de citação.



Figura 10 – Distribuição dos trabalhos em relação aos desafios evidenciados

Os estudos evidenciam inúmeros desafios na implementação prática de sistemas de energia transativos, entre os quais destaca-se o alto custo operacional, com 30,43% do total. Nessa categoria, foram classificados estudos que apresentam algum tipo de entrave operacional que limita a aplicação do TES. Conforme mencionado em [27], muitos prosumidores podem não ter ferramentas computacionais para otimizar seus benefícios e, assim, não usufruir das vantagens no mercado de TES. Já em [34], destaca-se os elevados custos necessários para a implementação de recursos como parques eólicos, usinas fotovoltaicas e sistemas de armazenamento de energia.

Em 17,39% dos estudos, menciona-se a complexidade computacional existente para a implementação de projetos envolvendo TES. Como indicado em [33] e [39], a dificuldade em lidar com grandes números de variáveis e algoritmos representa um desafio significativo, impactando na eficiência e no tempo de processamento dos processos.

As limitações de modelagem foram tratadas como um desafio em 17,39% das publicações, principalmente devido às incertezas presentes em diversos aspectos. Entre elas, destacam-se as incertezas na curva de geração de energia renovável, pelo fato de serem fontes intermitentes; e incertezas na curva de demanda de consumidores (prosumidores). Além disso, existem limitações associadas ao cálculo de perdas elétricas, que impactam na eficiência do sistema, bem como à variabilidade dos perfis de preço de energia, tornando a modelagem ainda mais complexa, como apresentado em [25].

A segurança cibernética também foi mencionada em 17,39% dos estudos analisados. Assim como apresentado no tópico anterior, existe uma grande preocupação com a privacidade e segurança dos dados em sistemas transativos, uma vez que podem ocorrer ataques virtuais e exposição indevida de informações [42].

As previsões de erros são mencionadas como desafios a serem superados em 13,04% dos estudos, sendo pontuadas as dificuldades em relação aos erros de previsão e aproximações dos lances pelos prosumidores, com a compra ou venda de

energia desnecessária, ocasionando transações incorretas, conforme documentado em [36].

Os critérios regulatórios constituem um ponto importante a ser discutido, mencionado em apenas 4,35% dos trabalhos. Embora citado como desafio apenas na referência [45], cabe ressaltar que foi realizada uma investigação nas 42 publicações para identificar quais delas integram o aspecto regulatório em seus estudos. Nesse contexto, apenas o trabalho conduzido em [45] incorpora a questão regulatória aos estudos realizados. Logo, infere-se que este assunto se trata de uma lacuna importante a ser superada, uma vez que os aspectos regulatórios são essenciais para a implementação dos TES.

Portanto, reforça-se a necessidade de investimentos em infraestrutura de comunicação e medição inteligente para que os TES possam funcionar de forma eficiente. Os TES precisam ser integrados aos sistemas existentes de gestão da rede elétrica, o que pode ser um processo complexo e desafiador. É preciso criar um marco regulatório claro e abrangente para os mercados TES, devendo garantir a segurança e a transparência das transações, proteger os consumidores e promover a concorrência justa entre os participantes do mercado. É necessário desenvolver plataformas tecnológicas robustas e escaláveis para suportar a gestão eficiente dos dados e das transações de mercados. Estas, por sua vez, devem oferecer segurança cibernética e interoperabilidade, sendo capazes de se comunicar e trocar informações com outros sistemas e plataformas.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um mapeamento sistemático de projetos e aplicações práticas de Sistemas de Energia Transativos no contexto das redes elétricas inteligentes. A revisão sistemática permitiu identificar os países/regiões com maior tendência de projetos e aplicações práticas em TES, destacando-se os Estados Unidos (29,31%), China (20,69%) e União Europeia (18,97%).

Os resultados também evidenciaram a integração do TES com os conceitos de sustentabilidade das redes elétricas inteligentes, visto que 76,79% dos trabalhos mencionam explicitamente as fontes de energia renovável em seus estudos. As FERs representaram 67,19% dos recursos utilizados, com maior participação da fonte solar fotovoltaica (65,12% de citações).

Os estudos selecionados apresentaram interesses de pesquisa diversificados, com maior participação de trabalhos focados em otimização/gerenciamento de recursos energéticos (64,29%) e na privacidade de dados e segurança cibernética (16,67%).

No tocante aos desafios, os elevados custos operacionais (30,43%), a complexidade computacional (17,39%) e a segurança cibernética (17,39%) foram os temas mais citados. A falta de padronização e a necessidade de avanços tecnológicos também representam obstáculos para a expansão desses sistemas. Dessa forma, este estudo contribuiu com a melhor compreensão do atual cenário de projetos envolvendo TES, além de fornecer subsídios para pesquisas e futuras implementações práticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA INTERNACIONAL PARA AS ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). *Perspectiva da transição energética mundial: caminho para 1,5°C - Sumário Executivo*. Abu Dhabi: IRENA, 2021.
- [2] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). *World Energy Outlook 2024*. Paris: IEA, 2024.
- [3] SONG, M.; MENG, J.; LIN, G.; CAI, Y.; GAO, C.; CHEN, T.; XU, H. Applications of the sharing economy in smart grids: shared energy storage and transactional energy. *The Electricity Journal*, 2022.
- [4] FRANCO, A. K. S. *Estudo de caso dos impactos da inserção de fontes renováveis intermitentes na rede de transmissão e distribuição elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)* – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- [5] CHAVES, B. F. R. *Estudos dos impactos da inserção de fontes renováveis de geração distribuída na seletividade e coordenação da proteção de sistemas elétricos. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)* – Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- [6] BLUMSACK, S.; FERNANDEZ, A. Ready or not, here comes the smart grid! *Energy 7th Biennial International Workshop on Advanced Energy Studies*, v. 37, n. 1, p. 61–68, 2012.
- [7] COLAK, I.; SAGIROGLU, S.; FULLI, G.; YESILBUDAK, M.; COVRIG, C.-F. A survey on the critical issues in smart grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 396–405, 2016.
- [8] CAMARINHA-MATOS, L. M. Collaborative smart grids – a survey on trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 65, p. 283–294, 2016.
- [9] ABRISHAMBAF, O.; LEZAMA, F.; FARIA, P.; VALE, Z. Towards transactive energy systems: an analysis on current trends. *Energy Strategy Reviews*, v. 26, 2019.
- [10] VELASQUEZ, W.; MOREIRA-MOREIRA, G. Z.; ALVAREZ-ALVARADO, M.S. Smart grids empowered by software-defined network: a comprehensive review of advancements and challenges. *IEEE Access*, v. 12, p. 63400–63416, 2024.
- [11] POWELL, J.; MCCAFFERTY-LEROUX, A.; HILAL, W.; GADSDEN, S. A. Smart grids: a comprehensive survey of challenges, industry applications, and future trends. *Energy Reports*, v. 11, p. 5760–5785, 2024.
- [12] SERRANO, H. O. M. *Gerenciamento de capacidade nas modernas redes de distribuição de energia elétrica. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)* – Universidade Estadual Paulista, 2023.
- [13] DILEEP, G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, v. 146, p. 2589–2625, fev. 2020.
- [14] GRIDWISE ARCHITECTURE COUNCIL. *GridWise Transactive Energy Framework Framework Version 1.0*. Tech. Rep. PNNL-22946, 2015.
- [15] GRIDWISE ARCHITECTURE COUNCIL. *Intro to Transactive Energy*. 2025.
- [16] PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY (PNNL). *Transactive Energy*.
- [17] IEEE BLOCKCHAIN INITIATIVE. *What is Transactive Energy?*
- [18] RAHIMI, F.; IPAKCHI, A.; FLETCHER, F. The changing electrical landscape: end-to-end power system operation under the transactive energy paradigm. *IEEE Power & Energy Magazine*, v. 14, p. 52–62, 2016.
- [19] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). *Transactive Energy Overview*.
- [20] IEEE BLOCKCHAIN INITIATIVE. *Transactive Energy Topics*.
- [21] SONG, M.; CAI, Y.; GAO, C.; CHEN, T.; YAO, Y.; MING, H. Transactive energy in power distribution systems: paving the path towards cyber-physical-social system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022.
- [22] ZIA, M. F.; ELBOUCHIKHI, E.; BENBOUZID, M.; GUERRERO, J. M. Microgrid transactive energy systems: a perspective on design technologies and energy markets. 2019.
- [23] NAKAGAWA et al. *Revisão sistemática da literatura em engenharia de software: teoria e prática*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017.
- [24] OUZZANI, MOURAD; HAMMADY, Hossam; FEDOROWICZ, Zbys; ELMAGARMID, Ahmed. Rayyan — a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, v. 5, 2016.
- [25] LIMA, D. A. et al. Toward a New Transactive Energy System with Distributed Energy Resources in Brazil: A Real Case Application. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT-LA)*, San Juan, PR, USA. IEEE, 2023.
- [26] DASGUPTA, R.; SAKZAD, A.; RUDOLPH, C. Impact analysis of false data injection attacks in transactive energy market-based micro-grid systems. In: *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT-Asia)*, IEEE, 2021.
- [27] T. L. VU AND K. SCHNEIDER, "Equitable Transactive Market Design to Coordinate Networked Microgrids with Mixed Ownership," 2024 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 2024.
- [28] W. T. COX AND T. CONSIDINE, "EML-CTS—Adaptable Open Source Transactive Energy—Architecture and Implementation," 2020 IEEE PES Transactive Energy Systems Conference (TESC), 2020.
- [29] P. MOURA, U. SRIRAM AND J. MOHAMMADI, "Sharing Mobile and Stationary Energy Storage Resources in Transactive Energy Communities," 2021 IEEE Madrid PowerTech, Madrid, Spain, 2021.
- [30] Y. CHEN, P. WU, Y. LI, P. ZHANG, J. YAN, M. GHAFOURI, AND Y. LIU, "Blockchain-based Co-Simulation Platform for Transparent and Fair Energy Trading and Management" In Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Blockchain and Secure Critical Infrastructure, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2023.
- [31] S. EISELE et al., "Blockchains for Transactive Energy Systems: Opportunities, Challenges, and Approaches," in *Computer*, vol. 53, no. 9, pp. 66–76, Sept. 2020.
- [32] MELO, L. S. *Modelo de simulação computacional multidomínio para análise de redes elétricas inteligentes com aplicação em transações econômicas de energia. Tese (Doutorado)* – Universidade Federal do Ceará, 2022.
- [33] Y. CAO et al., "Optimal Energy Management for Multi-Microgrid Under a Transactive Energy Framework With Distributionally Robust Optimization," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, Jan. 2022.
- [34] H. LI, T. JIN, C. NOVOA, "Facility and microgrid location-allocation for integrated supply chain and transactive energy operations", *Applied Mathematical Modelling*, Volume 119, 2023.
- [35] Y. GE, H. YE AND K. A. LOPARO, "Agent-Based Privacy Preserving Transactive Control for Managing Peak Power Consumption," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, Nov. 2020.
- [36] Y. XIAO, X. WANG, P. PINSON AND X. WANG, "Transactive Energy Based Aggregation of Prosumers as a Retailer," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11., July 2020.
- [37] J. FATTABI, M. SAMADI, M. EROL-KANTARCI, H. SCHRIEMER, "Transactive Demand Response Operation at the Grid Edge using the IEEE 2030.5 Standard", *Engineering*, Volume 6, 2020.
- [38] Q. YANG AND H. WANG, "Privacy-Preserving Transactive Energy Management for IoT-Aided Smart Homes via Blockchain," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, 15 July 15, 2021.
- [39] Y. XIA, Q. XU, Y. DING, L. SHI AND F. WU, "Generalized Nash Equilibrium Analysis for Peer-to-Peer Transactive Energy Market Considering Coupling Distribution Network Constraints," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 20, June 2024.
- [40] Q. YANG AND H. WANG, "Blockchain-Empowered Socially Optimal Transactive Energy System: Framework and Implementation," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, May 2021.
- [41] H. RAO BOKKISAM, R. MOHAN ACHARYA, SELVAN M.P., "Framework of transactive energy market pool for community energy trading and demand response management using an auction-theoretic approach", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 137, 2022.
- [42] H. R. BOKKISAM, S. SINGH, R. M. ACHARYA AND M. P. SELVAN, "Blockchain-based peer-to-peer transactive energy system for community microgrid with demand response management," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 198–211, Jan. 2022.
- [43] L. Gomes, Z. A. Vale and J. M. Corchado, "Multi-Agent Microgrid Management System for Single-Board Computers: A Case Study on Peer-to-Peer Energy Trading," in *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [44] M. TARIQ, S. ALI ABBAS KAZMI, A. ALTAMIMI, Z. A. KHAN, B. ALHARBI, H. ALAFNAN, H. ALSHEHRY, "Smart transactive energy based approach for planning and scheduling in multi-looped microgrid distribution network across planning horizon", *Heliyon*, Volume 10, 2021.
- [45] M. ARLT, D. P. CHASSIN AND L. LYNNE KIESLING. "Opening Up Transactive Systems: Introducing TESS and Specification in a Field Deployment", *Energies* 2021, 2021,
- [46] Repositório de dados bibliométricos: Análise da produção científica em projetos de sistemas de energia transativos, 2025. Disponível em: <https://abrir.link/lrsVr>
- [47] I. EL-SAYED, K. KHAN, X. DOMINGUEZ AND P. ARBOLEYA, "A Real Pilot-Platform Implementation for Blockchain-Based Peer-to-Peer Energy Trading," 2020 *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Montreal, QC, Canada, 2020, pp. 1–5
- [48] Q. YANG, H. WANG, T. WANG, S. ZHANG, X. WU, H. WANG, "Blockchain-based decentralized energy management platform for residential distributed energy resources in a virtual power plant", *Applied Energy*, Volume 294, 2021.