

O Papel dos Sistemas de Armazenamento a Hidrogênio nas Redes Elétricas: Uma Discussão no Contexto dos Serviços Ancilares

Antonio Marcos Fernandes Filho
Departamento de Engenharia Elétrica
(DEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Fortaleza, Brasil
marcos.fernandes@alu.ufc.br

Walter Viana de Sousa
Departamento de Engenharia Elétrica
(DEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Fortaleza, Brasil
walterviana@alu.ufc.br

Ruth Pastora Saraiva Leão
Departamento de Engenharia Elétrica
(DEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Fortaleza, Brasil
rleao@dee.ufc.br

Lucas Silveira Melo
Departamento de Engenharia Elétrica
(DEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Fortaleza, Brasil
lucassmelo@dee.ufc.br

Domenico Sgrò
Departamento de Engenharia Elétrica
(DEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Fortaleza, Brasil
domenico@dee.ufc.br

Raquel Cristina Filiagi Gregory
Departamento de Engenharia Elétrica
(DEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Fortaleza, Brasil
rgregory@dee.ufc.br

Resumo— O aumento da demanda por eletricidade e a crescente participação de fontes renováveis variáveis impõem novos desafios à operação dos sistemas elétricos de potência (SEP). A prestação de serviços ancilares, por meio de sistemas de armazenamento de energia a hidrogênio, tem potencial para proporcionar flexibilidade operacional no gerenciamento de recursos energéticos e manter a qualidade de energia nos SEP. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho consiste em realizar um estudo envolvendo serviços ancilares e sistemas de armazenamento a hidrogênio, a fim de identificar como esses sistemas podem contribuir com a operação segura e confiável das redes elétricas. Além disso, o trabalho apresenta um mapeamento sistemático sobre o tema, de forma a identificar as principais tendências de uso dessa tecnologia para os fins aqui postos. Nesse aspecto, a partir dos 14 trabalhos, foram identificados nove tipos de serviços ancilares: resposta inercial virtual, resposta rápida de frequência, resposta primária de frequência, regulação de frequência, reserva girante, reserva não girante, reserva suplementar, capacidade de rampa flexível e suporte de energia reativa. Além disso, os resultados indicaram que 50% das publicações são oriundas do continente asiático, com cerca de 45,45% dos trabalhos correlatos ao tema de controle de frequência secundário.

Palavras chave— serviços ancilares, sistemas de hidrogênio, tecnologias de armazenamento, qualidade de energia

I. INTRODUÇÃO

A descarbonização e a transição energética são temas centrais no cenário global, justificados pela necessidade de mitigar os impactos das mudanças climáticas e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis [1]. Diante dos compromissos internacionais para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), os países buscam alternativas sustentáveis que garantam a segurança energética sem comprometer o crescimento econômico.

A transição energética para um sistema de energia não fóssil é impulsionada, principalmente, pela integração de fontes renováveis nos sistemas elétricos de potência (SEP) [1]. No contexto mundial, as fontes renováveis representam

apenas 14,7% da matriz energética e 28,7% da matriz elétrica. No Brasil, a participação de renováveis atingiu 89,2% da matriz elétrica em 2023, número bastante expressivo quando comparado ao cenário mundial [2].

Ainda que historicamente haja predominância de energias renováveis na matriz elétrica brasileira, devido, principalmente, à predominância da geração hidrelétrica, o Balanço Energético Nacional (BEN) 2024 evidencia que o país caminha na trajetória da transição energética sob o aspecto da diversificação das fontes de energia, reduzindo a dependência de uma única fonte primária. Segundo dados do BEN 2024, a geração de energia eólica e solar aumentou de 17,4% e 68,1%, respectivamente, em relação ao ano anterior [2].

Além disso, de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024, as emissões de GEE provenientes da geração elétrica no Brasil totalizaram 38,9 milhões de toneladas de gás carbônico em 2023, uma queda de 6% em relação a 2022 e uma queda acumulada de 59% desde 2014 [3]. O aumento da participação da geração solar e eólica na matriz elétrica brasileira reflete diretamente na redução de emissão de GEE.

Em contrapartida, o aumento da penetração de fontes renováveis variáveis implica em mudanças na operação dos sistemas de energia elétrica [4]. Sem uma coordenação adequada, o crescimento de fontes renováveis variáveis pode criar desafios técnicos e operacionais ao SEP [5] devido, principalmente, à natureza estocástica dessas fontes [6]. A cobertura intermitente de nuvens, no caso da energia solar, e as variações frequentes na velocidade dos ventos, no caso da energia eólica, podem causar desbalanços repentinos na produção de energia [4].

A elevada participação de fontes renováveis variáveis, devido à sua intrínseca variabilidade, impacta a qualidade da energia no sistema, causando distúrbios de frequência e tensão [6]. Esses distúrbios geram problemas de estabilidade, falhas em dispositivos eletrônicos de potência, redução na eficiência da rede e acionamento inadequado de sistemas de proteção [5]. Além disso, a conexão de geração à rede através de conversores de potência reduz a inércia do sistema, o que pode levar a oscilações mais severas [4].

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Para evitar a deterioração da qualidade de energia elétrica, muitos países reduzem ou limitam temporariamente a conexão de geração renovável variável à rede [6]. Além de reduzir a receita do empreendimento, esse fato compromete a sustentabilidade da rede elétrica, que poderá depender de outros recursos, muitas vezes provenientes de fontes fósseis. Diante disso, há um interesse global em maximizar a capacidade de hospedagem de fontes renováveis e, simultaneamente, minimizar a restrição da sua conexão à rede [7].

Para superar os desafios mencionados, é altamente recomendável o uso de novas tecnologias que aumentem a flexibilidade do sistema [8]. Com isso, os operadores de sistemas de transmissão e distribuição terão as ferramentas necessárias para garantir a integridade, a confiabilidade e a resiliência do sistema elétrico, atuando de forma preventiva no controle de contingências [9].

Nesse cenário, a integração de sistemas de armazenamento de energia à rede elétrica apresenta-se como uma solução em relação a diversos aspectos, como resposta inercial, controle de frequência (primário, secundário e terciário), despacho econômico e controle de tensão [8].

Dentre as tecnologias de armazenamento, os sistemas de hidrogênio renovável destacam-se como uma fonte de energia limpa e versátil, com potencial para superar os desafios de intermitência associados à geração renovável variável. Além disso, esses sistemas podem mitigar distúrbios que impactam a qualidade de energia e oferecer maior flexibilidade operacional, promovendo serviços ancilares à rede elétrica [7].

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar os principais aspectos relacionados aos serviços ancilares proporcionados pela integração de sistemas de armazenamento de energia, com ênfase aos sistemas de armazenamento baseados em hidrogênio. Além disso, parte dos estudos realizados nesta revisão baseia-se em protocolos sistemáticos, com o objetivo de fornecer uma análise aprofundada da literatura relacionada aos sistemas de armazenamento de hidrogênio para prestação de serviços ancilares à rede elétrica.

O presente artigo está estruturado da seguinte forma: na Seção II estão presentes os principais fenômenos eletromagnéticos que afetam a qualidade de energia e os principais tipos de serviços ancilares de suporte à rede elétrica; na Seção III são apresentadas as tecnologias de armazenamento de energia, com ênfase nos sistemas de armazenamento a hidrogênio, e como estes contribuem para a prestação de serviços ancilares; na Seção IV são apresentadas a metodologia e os resultados do mapeamento sistemático; e a Seção V contempla as conclusões do estudo realizado.

II. QUALIDADE DE ENERGIA E SERVIÇOS ANCILARES

O avanço contínuo das novas tecnologias tem impulsionado a consolidação de estratégias que promovem a transição energética em um contexto global. No entanto, essas inovações também introduzem novas complexidades, aumentando as preocupações relacionadas à qualidade da energia elétrica, pois podem gerar diversos distúrbios que afetam a confiabilidade dos suprimentos. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de estratégias capazes de contribuir com serviços de suporte à rede, popularmente denominados por serviços ancilares, os quais desempenham um papel

essencial na promoção da flexibilidade dos sistemas elétricos de potência.

De fato, há uma estreita relação entre serviços ancilares e a qualidade da energia elétrica. Nesta seção, ambos os conceitos serão apresentados e caracterizados com o objetivo de embasar as discussões que serão desenvolvidas nas próximas seções.

A. Qualidade da energia elétrica

Os operadores de rede são responsáveis por assegurar o fornecimento de energia elétrica. Para isso, devem garantir que a energia fornecida atenda aos padrões de qualidade, geralmente definidos por normas e órgãos reguladores, que estabelecem limites aceitáveis para os indicadores de qualidade do produto e do serviço prestado [10].

No tocante à qualidade do produto, uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos é avaliada para mensurar a qualidade da energia do sistema elétrico. De acordo com [11], os fenômenos podem ser classificados nas seguintes categorias: transitórios, variações de tensão de curta duração, variações de longa duração, desequilíbrios, distorções na forma de onda, flutuações de tensão e variações de frequência. A Tabela I apresenta as magnitudes e durações típicas que caracterizam alguns destes fenômenos eletromagnéticos.

TABELA I. MAGNITUDES E DURAÇÕES TÍPICAS DE FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS

<i>Fenômeno</i>	<i>Duração típica</i>	<i>Magnitude típica</i>
Afundamento de tensão	De 0,5 ciclo a 60 segundos	0,1 a 0,9 p.u.
Elevação de tensão	De 0,5 ciclo a 60 segundos	1,1 a 1,8 p.u.
Flutuação de tensão	Intermitente	0,1 a 7 %
Interrupções sustentadas	Superior a 1 minuto	Inferior a 0,1 p.u.
Harmônicos	Regime permanente	1 a 20%
Variações de frequência	Inferior a 10 segundos	$\pm 1,0$ Hz

É oportuno salientar que esses mesmos fenômenos são também reconhecidos a nível nacional, sendo caracterizados no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST [12]. Todavia, as magnitudes e durações dos distúrbios podem variar daquelas identificadas na Tabela 1.

De acordo com [11], as principais causas associadas a cada um destes fenômenos são:

- Afundamento de tensão: manobra de grandes blocos de potência, partida de grandes motores e faltas elétricas;
- Elevação de tensão: faltas em sistemas não aterrados ou aterrados por alta resistência, desconexão de grandes cargas e energização de banco de capacitores;
- Flutuação de tensão: presença de cargas com variação cíclica de potência, como: fornos a arco e máquinas de solda;
- Interrupções sustentadas: acidentes envolvendo linhas de transmissão e alimentadores de distribuição, e coordenação precária da proteção;

- Harmônicos: conexão de cargas não lineares, forte presença de conversores de eletrônica de potência na indústria e nas fontes renováveis variáveis;
- Variações de frequência: desbalanços repentinos entre oferta e demanda de energia elétrica decorrentes da presença de fontes renováveis variáveis.

No contexto das fontes de energia renováveis, os distúrbios elétricos na rede acarreta em redução da vida útil dos equipamentos, especialmente dos conversores eletrônicos, além de desconexão, falhas na reconexão à rede e interrupções não programadas [9]. Ademais, do ponto de vista financeiro, estima-se que os problemas relacionados com a qualidade da energia resultam em um custo anual de 10 bilhões de euros às economias da União Europeia e que as perdas financeiras por falta de energia nos Estados Unidos se aproximem de 100 bilhões de dólares por ano [10].

Diante disso, ressalta-se a necessidade de buscar alternativas para a prestação de serviços ancilares que reduzam o impacto de problemas de qualidade de energia e aumentem a flexibilidade do sistema elétrico.

B. Serviços ancilares

Serviços ancilares são recursos de suporte essenciais para assegurar a estabilidade, confiabilidade e segurança da rede elétrica. Eles complementam as funções primárias de geração, transmissão e distribuição de energia, garantindo que o sistema opere dentro de limites aceitáveis de frequência e tensão, além de permitir a adaptação às variações na demanda e na geração [13]. Dessa forma, auxiliam os operadores do mundo inteiro na operação dos sistemas interligados e na entrega de uma energia de qualidade ao consumidor final [9].

A necessidade de serviços ancilares em sistemas de energia é influenciada por fatores principais, como a penetração de energias renováveis, a descentralização da geração e o crescimento da demanda. Além disso, outros aspectos também podem impactar essa necessidade, incluindo a idade e o estado da infraestrutura da rede elétrica, a localização dos centros de carga e geração, bem como a presença de cargas sensíveis e prioritárias, como hospitais e data centers [1].

As principais categorias de serviços ancilares são:

1) *Resposta inercial*: capacidade de determinados recursos de fornecer uma resposta rápida às variações de frequência no sistema elétrico, semelhante à inércia proporcionada por geradores síncronos tradicionais [14]. Serviços relacionados à resposta inercial incluem:

- Inércia virtual: atua de forma imediata ao detectar a taxa de variação da frequência (RoCoF), desacelerando flutuações bruscas, que é o princípio da resposta inercial, criando uma janela de tempo para que outros mecanismos, como o controle primário de frequência, possam atuar [15].
- Resposta rápida de frequência: envolve o uso de tecnologias como sistemas de armazenamento de energia e controles avançados de potência em inversores para estabilizar a frequência da rede de forma quase imediata [16].

2) *Controle primário de frequência*: responsável por sustentar a frequência no intervalo de tempo subsequente ao

suporte inicial fornecido pela resposta inercial, garantindo a estabilidade e a qualidade da energia elétrica [17].

3) *Controle secundário de frequência*: desempenha um papel fundamental na estabilização da frequência elétrica e no equilíbrio entre geração e demanda em um sistema interligado. Ele é a próxima camada de controle após o controle primário de frequência e atua de forma mais lenta, em uma escala de minutos, para corrigir desvios residuais na frequência e garantir a distribuição eficiente de energia entre as áreas do sistema. Inclui serviços como:

- Regulação de frequência: refere-se à capacidade de ajuste centralizado de potência ativa para manter a frequência nominal do sistema elétrico durante a operação normal [1].
- Reserva girante: um serviço ancilar essencial para a estabilidade da rede elétrica, garantindo uma capacidade de potência ativa sincronizada e pronta para ser acionada rapidamente em caso de necessidade [18].
- A reserva não girante: refere-se à capacidade de fornecimento de potência ativa que pode ser acionada em poucos minutos em situações de contingência [19].

4) *Controle terciário de frequência*: atua para corrigir desvios de frequência que não foram totalmente compensados pela regulação primária e secundária, como uma reserva suplementar. Tem como objetivo restaurar os níveis de reserva girante e não girante ao estado de pré-contingência. Deve ser acionada dentro de 15 minutos após o início do evento e, no máximo, até 12 horas após sua ocorrência [1], [20].

5) *Controle de tensão*: responsável por manter a tensão do sistema dentro de limites aceitáveis, garantindo a qualidade da energia elétrica e o bom funcionamento dos equipamentos [1]. Inclui serviços como:

- Suporte de potência reativa: atua de forma dinâmica e contínua absorvendo ou fornecendo potência reativa para controlar a tensão da rede [21].
- Regulação de tensão: ajusta a tensão em pontos específicos do sistema, como em subestações ou em pontos de conexão de consumidores, para garantir que esteja dentro de limites adequados.

6) *Serviços de apoio à partida*: responsável por garantir a partida de geradores em situações de emergência, como em casos de apagão. Inclui serviços como:

- Auto restabelecimento integral (*black start*): permite a partida de geradores e recomposição total do sistema sem a necessidade de energia externa.
- Auto restabelecimento parcial: facilitam a partida de geradores, como o fornecimento de energia para equipamentos auxiliares e o controle de sincronismo. Pode necessitar de alguma energia externa.

7) *Serviços de apoio à rede*: conjunto de ações e recursos importantes para a operação do sistema, como:

- Reserva de energia: garante a disponibilidade de energia para atender a picos de demanda ou

contingências, utilizando recursos como usinas hidrelétricas e sistemas de armazenamento.

- Serviços de comunicação e controle: Permitem o monitoramento e o controle do sistema em tempo real, garantindo a sua operação segura e eficiente.
- Sistemas especiais de proteção: atuam de forma automática e coordenada, acionando dispositivos de proteção para isolar a área afetada e evitar que o problema se espalhe para o restante do sistema. O ERAC (Esquema Regional de Alívio de Carga) é um exemplo desse tipo de serviço.

Com o aumento de participação de fontes renováveis intermitentes na matriz energética em muitos países, agentes reguladores e operadores de rede têm sido demandados a incorporar requisitos específicos na regulamentação dos serviços ancilares.

Diante da inexistência de uma padronização na nomenclatura dos serviços ancilares, em [1] são sugeridas terminologias tanto para os serviços convencionais, como para os serviços que atendem às necessidades mais recentes dos sistemas de energia. As informações contidas na bibliografia foram adaptadas e sintetizadas na Fig. 1.

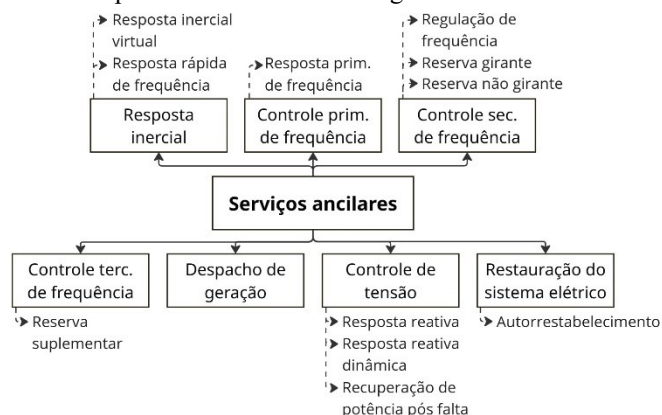


Fig. 1. Áreas de classificação de serviços ancilares.

III. TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os sistemas de armazenamento de energia (SAE) desempenham papel crucial na modernização e otimização da rede elétrica, especialmente no contexto da transição energética [13]. Enquanto serviço ancilar, o SAE desempenha um papel significativo na qualidade da energia elétrica e pode contribuir para:

- Regulação de frequência, injetando ou absorvendo energia em resposta a variações na frequência da rede.
- Suporte à tensão, fornecendo ou consumindo potência reativa para estabilizar a tensão da rede.
- Reserva de energia, fornecendo energia rapidamente em situações de emergência, para atender pico demanda ou quando há interrupções inesperadas.
- Suporte a cargas prioritárias, como hospitais e data centers, garantindo energia estável e de alta qualidade, mesmo diante de distúrbios na rede.
- Mitigação de intermitência de fontes renováveis, compensando as flutuações na geração de energia renovável variável.

No tocante à perspectiva econômica, há a possibilidade da aplicação de sistemas de armazenamento para fornecer créditos de capacidade que adiam ou reduzem os investimentos na atualização da infraestrutura de geração, transmissão e distribuição [22].

A. Classificação de sistemas de armazenamento de energia

De acordo com [9], os sistemas de armazenamento de energia podem ser classificados, segundo a forma de energia que a eletricidade é armazenada, em quatro categorias principais: mecânicos, térmicos, elétricos e químicos. A Fig. 2 apresenta um fluxograma com as principais tecnologias em cada uma das classificações citadas.

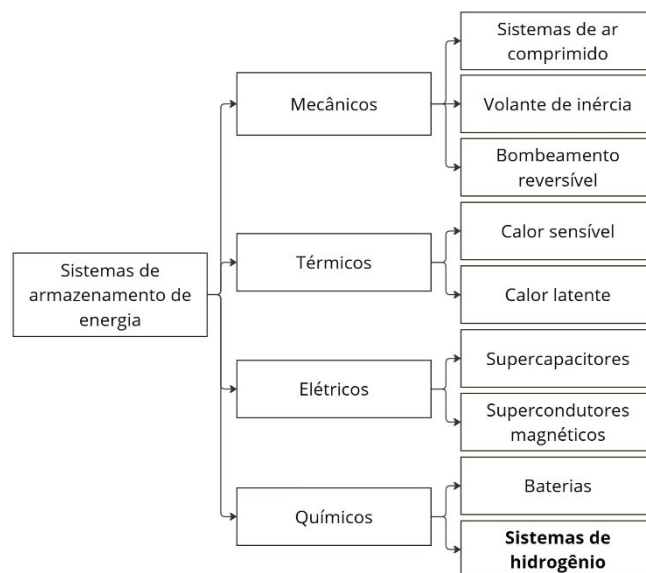


Fig. 2. Classificação dos sistemas de armazenamento de energia.

Os sistemas de armazenamento mecânicos utilizam o princípio da conversão de energia mecânica para armazenar e/ou liberar energia de acordo com a demanda da rede elétrica. As três formas de armazenamento mais populares são: ar comprimido, volantes de inércia e usinas de bombeamento reversíveis [9].

Já os sistemas térmicos armazenam energia na forma de calor para uso posterior uso, quer seja na forma de aquecimento, ou na forma elétrica. Essa tecnologia de armazenamento tem grande potencial em aplicações industriais, como sistemas de aquecimento e resfriamento [22].

As tecnologias elétricas de armazenamento de energia diferem das demais categorias, uma vez que não há processo de transformação de uma fonte de energia em outra. Neste caso, a energia é armazenada no campo eletromagnético, fazendo uso de dispositivos como supercapacitores e supercondutores magnéticos [9].

Dentre os sistemas químicos, os sistemas de armazenamento de energia em bateria (BESS) se destacam pela sua relevância na integração de fontes renováveis e na oferta de serviços ancilares. No entanto, os BESS apresentam algumas desvantagens, como ciclo de vida limitado, autodescarga, desafios relacionados ao descarte e potenciais riscos ambientais [6]. Além disso, a estimativa da degradação das baterias ainda não é completamente compreendida, pois dependente de diversos fatores, como: perfil de uso, tipo de solução química, condições ambientais e níveis de capacidade de armazenamento [4].

Em contrapartida, as células a combustível a hidrogênio destacam-se devido às suas excelentes características como combustível e à sua alta densidade de energia [22]. A célula a combustível a hidrogênio ganhou significativa popularidade devido ao grande potencial de produção de hidrogênio renovável de baixa emissão de carbono, sendo uma forte alternativa para a transição energética de setores de difícil descarbonização [6].

B. Hidrogênio como tecnologia de armazenamento de energia

O hidrogênio é amplamente usado nas indústrias de petróleo, química e ferro, sendo que quase toda a sua produção atual depende de combustíveis fósseis. No entanto, com o avanço da descarbonização e da transição energética, há uma tendência de substituição do hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis por hidrogênio renovável de baixa emissão de carbono. É válido mencionar que o hidrogênio é geralmente designado como “verde” quando é produzido por fontes renováveis de energia. De fato, a sua versatilidade permite integrá-lo a diferentes setores, inclusive os de transporte, aquecimento e sistemas multienergéticos [8].

Um sistema de armazenamento a hidrogênio, em que o recurso é produzido por meio da eletrólise da água, é essencialmente composto por eletrolisadores, tanques para armazenar o hidrogênio e células a combustível [6].

1) Eletrolisadores

Os eletrolisadores realizam a separação da molécula da água em hidrogênio e oxigênio, a partir do processo de eletrólise. Dentre as tecnologias mais promissoras, destacam-se os eletrolisadores alcalinos e os de membrana de troca de prótons (PEM) [23]. Os eletrolisadores têm grande potencial como carga controlável para mitigar oscilações na frequência de sistemas elétricos.

Essa aplicação aproveita a capacidade dos eletrolisadores de ajustar rapidamente sua demanda de energia, aumentando ou reduzindo sua produção de hidrogênio quase instantaneamente em resposta a variações de frequência [1]. Eles podem funcionar como uma carga flexível, sendo desligados ou reduzindo sua operação em momentos de baixa geração (escassez de energia) ou aumentando a carga em momentos de excesso de geração, como durante picos de produção renovável [4].

2) Células a combustível

O hidrogênio produzido pode ser consumido localmente ou armazenado, por um período de tempo curto ou longo, em tanques de armazenamento [4]. O hidrogênio armazenado pode ser, então, reeletrificado a partir da utilização de células a combustíveis. As células a combustível são dispositivos eletroquímicos que geram energia elétrica por meio de reações químicas sendo caracterizadas pela presença de dois eletrodos distintos: o ânodo e o cátodo [10]. Dentre as características mais importantes das células a combustível a hidrogênio, destacam-se a alta densidade de energia, alta densidade de potência, alta eficiência, maior confiabilidade e capacidade de integrar energias renováveis [10].

As células a combustível a hidrogênio podem ser aplicadas para melhorar a qualidade de energia. De acordo com [6], o controle do fluxo de energia ativa e reativa em compensadores com a integração de sistemas de hidrogênio, contribui para a

mitigação de afundamentos, flutuações e desequilíbrios de tensão, além de contribuir para a estabilidade transitória e reduzir a taxa de distorção harmônica.

Além disso, os sistemas de armazenamento a hidrogênio são uma solução dinâmica para o equilíbrio de oferta e demanda na rede elétrica [7], uma vez que os eletrolisadores são altamente controláveis e podem aumentar expressivamente o consumo de energia em tempos inferiores a um segundo [4]. Isto implica na produção de hidrogênio excedente que pode ser armazenado em tanques para posterior reeletrificação a partir das células a combustível [23].

C. Cenário nacional

Além das vantagens da integração de sistemas de hidrogênio à rede elétrica [24], o Brasil tem sido identificado como um mercado promissor para a produção de hidrogênio via eletrólise [25]. De acordo com o Plano Decenal da Expansão de Energia 2034 (PDE 2034), 9 projetos de hidrogênio verde na região nordeste já protocolaram processos de conexão à Rede Básica junto ao Ministério de Minas e Energia, acumulando uma demanda de 35,9 GW até 2038, que corresponde ao dobro do pico de carga atual da região [25].

Além disso, a operação e expansão de usinas hidrelétricas está cada vez mais desafiadora devido a um conjunto crescente de limitações ambientais e regulatórias. De acordo com [26], a combinação de sistemas de armazenamento a hidrogênio com a geração hidrelétrica é uma estratégia promissora para aumentar a eficiência energética, a resiliência do sistema e a sustentabilidade ambiental. Tal estratégia tem grande potencial de aplicabilidade para enfrentar os desafios da operação do sistema elétrico brasileiro com o aumento da geração renovável variável.

Com isso, justifica-se a realização de uma análise criteriosa da utilização de sistemas de armazenamento a hidrogênio para a prestação de serviços ancilares, a partir de um mapeamento sistemático.

IV. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO A HIDROGÊNIO E SERVIÇOS ANCILARES: UM MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA

Conforme mencionado, o hidrogênio, além de ser uma alternativa para o armazenamento de energia, é apontado como um recurso promissor para fornecer suporte à rede elétrica por meio de serviços ancilares [14], [15].

Nesse contexto, o estudo conduzido na presente seção objetivou realizar um mapeamento sistemático rigoroso da literatura envolvendo sistemas de armazenamento a hidrogênio e serviços ancilares, a fim de identificar as tendências e desafios do uso dessa tecnologia.

Naturalmente, os esforços realizados foram direcionados ao mapeamento de trabalhos que incorporam o conceito de sustentabilidade à produção do hidrogênio. Dessa forma, a literatura mapeada deve ser focada no hidrogênio produzido a partir de fontes de energia com baixa emissão de carbono.

Dito isso, a principal questão de pesquisa (QP) a ser respondida foi formulada da seguinte forma:

QP: Como os sistemas de armazenamento a hidrogênio podem contribuir para prestação de serviços ancilares à rede elétrica?

Para responder a essa pergunta, foi elaborado um protocolo de pesquisa no qual foram definidos diferentes critérios e estratégias para a busca, seleção e extração dos dados da pesquisa.

O processo inicia-se pela definição das palavras-chave, as quais devem flexionar com a questão de pesquisa e os objetivos definidos. As palavras-chave são, então, combinadas por meio de operadores lógicos para formar uma *string* de busca, cujo resultado é apresentado na sequência:

STRING: ("storage") AND ("hydrogen") AND ("renewable" OR "green" OR "low-carbon") AND ("use" OR "application" OR "integration") AND ("power system" OR "energy system" OR "utility" OR "off-grid" OR "stand-alone" OR "grid") AND ("ancillary" OR "power support" OR "stability" OR "flexible" OR "challenge").

A estratégia de busca foi aplicada em quatro bases de dados bibliométricas: *Engineering Village*, *IEEE Xplore*, *Scopus* e *Web of Science*. Inserindo a *string* nas fontes de busca, foram obtidos um total de 920 estudos.

Muito embora a *string* limite o escopo de busca, são necessários outros mecanismos de refino para seleção dos trabalhos. Nesse contexto, os critérios de seleção foram definidos com base em parâmetros temporais, de idioma e de aderência ao tema. Dito isso, foram selecionados apenas estudos primários e completos, publicados entre janeiro de 2020 e junho de 2024, e que utilizam o inglês como idioma oficial do texto. Todo e qualquer estudo que não atendeu aos critérios mencionados foi excluído.

Além disso, como estratégia de seleção, foi empregada a classificação escalonada dos estudos, a fim de contribuir com a mineração dos dados. Nesse contexto, o processo de seleção dos trabalhos foi conduzido em três etapas: triagem inicial (filtragem automática), leitura parcial do texto (*screening*) e leitura integral do texto (*full text screening*).

Ao final do processo de seleção, foram classificados 49 trabalhos, dos quais 14 foram capazes de responder à questão de pesquisa formulada. Portanto, a extração dos dados foi realizada com base nos 14 trabalhos selecionados.

A Fig. 3 ilustra o fluxo de condução do trabalho, conforme descrito anteriormente.

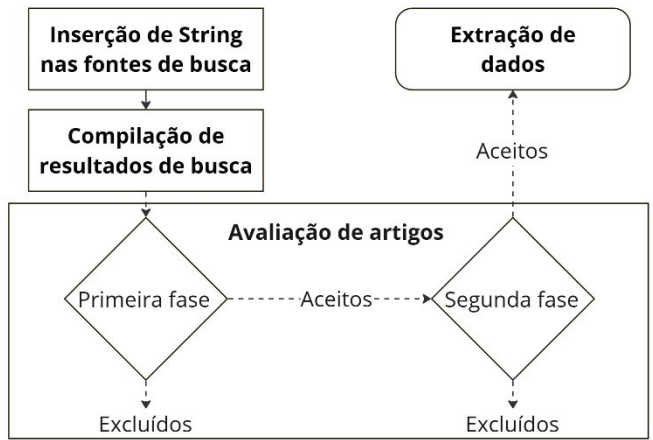


Fig. 3. Fluxograma do método do mapeamento sistemático.

A partir da extração dos dados, foram identificadas as regiões com maior número de publicações sobre o tema, destacando a Ásia como o continente com o maior número de

publicações, seguida pela Europa e pelas Américas, conforme ilustrado na Fig. 4.

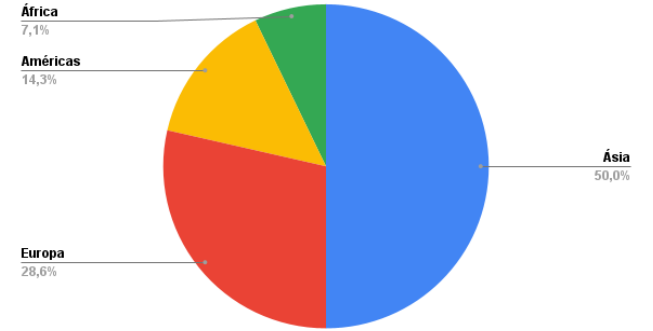


Fig. 4. Distribuição de trabalhos analisados por continente.

Os resultados da revisão indicaram a possibilidade de fornecimento de nove serviços de suporte à rede a partir do uso hidrogênio armazenado, são eles: resposta rápida de frequência, capacidade de rampa flexível, resposta primária de frequência, resposta reativa em regime permanente, reserva girante, reserva suplementar, reserva não girante, regulação de frequência e resposta inercial virtual. Os serviços catalogados foram organizados de forma cumulativa, conforme apresentado na Fig. 5.

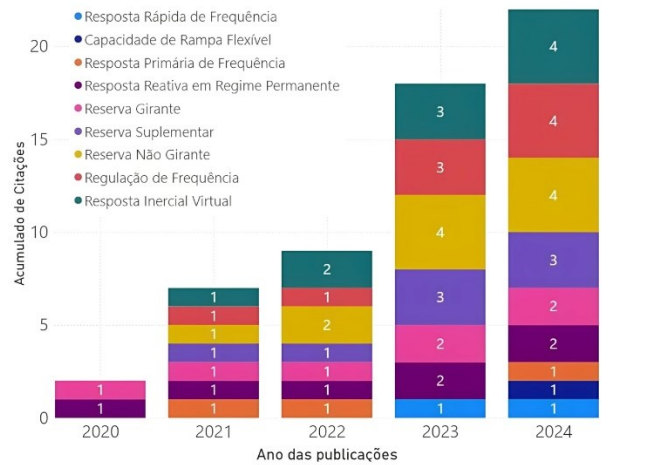


Fig. 5. Distribuição de trabalhos analisados por continente

Observa-se que três serviços apresentaram a mesma quantidade de citações no período analisado, com a resposta inercial virtual, a regulação de frequência e a reserva suplementar, registrando 4 citações cada.

Observa-se, também, um aumento na quantidade de estudos relacionados ao tema ao longo do período, bem como uma diversificação nos serviços ancilares analisados, passando de dois tipos (2020) para nove tipos diferentes (2024).

O ano de 2023 foi o período com maior número de publicações, com um aumento de 100% com relação ao acumulado de 2022. Entretanto, é importante salientar que foram analisados dados apenas até junho de 2024, havendo, portanto, uma lacuna para o ano de 2024. Todavia, de maneira geral, observa-se um crescente interesse em estudos que correlacionam hidrogênio verde com serviços ancilares.

Além de sua recorrência, a forma de atuação de cada serviço ancilar é um aspecto crucial para o alcance dos objetivos

específicos de cada projeto. A Fig. 6 apresenta os serviços mencionados de acordo com seu tempo de atuação.

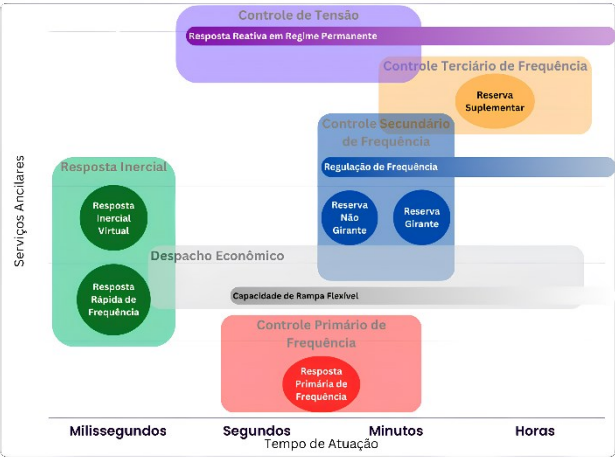


Fig. 6. Tempo de atuação dos serviços ancilares catalogados

Perceber-se, portanto, que o tempo de resposta varia a depender do tipo de serviço ancilar. Essa informação é relevante pois deve dialogar com a capacidade do sistema de armazenamento em atender aos requisitos de tempo de resposta. Nesse aspecto, as células a combustível são altamente controláveis. Todavia, o tempo de resposta pode variar a depender da tecnologia empregada. Esse fato deve ser considerado no projeto da solução envolvida.

A respeito do quantitativo discriminado por área de atuação dos serviços ancilares, a Fig. 7 exibe o percentual de citação de cada área correspondente ao acumulado no período analisado.

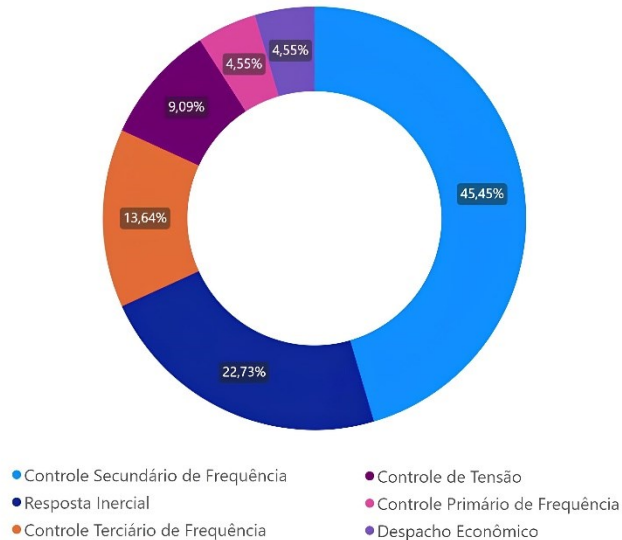


Fig. 7. Acumulado de citações por áreas dos serviços ancilares

Como ilustrado na Fig. 7, em termos gerais, os serviços ancilares relacionados ao controle secundário de frequência têm se destacado como os mais aplicados no contexto dos sistemas de armazenamento a hidrogênio como recurso de suporte à rede. Isso demonstra como os estudos têm evoluído na direção de soluções capazes de atuar sobre a regulação de frequência e sobre as reservas de potência, sendo este aspecto fundamental para que as fontes de energia renováveis possam contribuir com a estabilidade e ampliar seu alcance ao nível dos sistemas elétricos de grande porte.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo sobre um tema de grande relevância no contexto atual, qual seja, o uso de sistemas de armazenamento a hidrogênio para serviços de suporte à rede, um tópico diretamente relacionado à qualidade da energia elétrica.

Em um primeiro momento, buscou-se fundamentar os principais aspectos envolvendo a qualidade da energia elétrica, de forma a entender como ela se relaciona com o tema de serviços ancilares. Na sequência, foram salientados os principais aspectos envolvendo serviços ancilares e a sua importância para a rede elétrica. Em um terceiro momento, apresentou-se os principais tipos de sistemas de armazenamento, com destaque aos sistemas de armazenamento a hidrogênio, os quais se apresentam como solução estratégica no tocante à transição energética.

Por fim, realizou-se um mapeamento sistemático da literatura, a fim de identificar como os sistemas de armazenamento a hidrogênio podem contribuir para os serviços ancilares. Por meio dos 14 trabalhos selecionados, foi possível verificar o aumento do interesse em pesquisas relacionadas ao hidrogênio e aos serviços ancilares. Observou-se um crescimento no número de serviços analisados durante o período, com maior participação do continente asiático, representando 50% do número de publicações sobre o tema.

A ênfase nos serviços de controle secundário de frequência (45,45%) e resposta inercial (18,18%), no contexto do armazenamento de hidrogênio reflete sua importância para a estabilidade de sistemas elétricos com alta penetração de fontes renováveis. A resposta inercial é essencial para mitigar oscilações em redes de baixa inércia, enquanto o controle secundário de frequência ajusta a geração e restabelece a frequência após perturbações. Nesse cenário, o hidrogênio se destaca como uma solução versátil, fornecendo flexibilidade e suporte à rede, consolidando-se como um recurso estratégico para a transição energética e a integração segura de fontes renováveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- [1] Viola, L., Mohammadi, S., Dotta, D., Hesamzadeh, M. R., Baldick, R., & Flynn, D. (2024). Ancillary services in power system transition toward a 100% non-fossil future: Market design challenges in the United States and Europe. *Electric Power Systems Research*, 236, 110885.
- [2] EPE-EMPRESA, D. P. E. (2024). Balanço Energético Nacional, Relatório Síntese 2024. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- [3] EPE-EMPRESA, D. P. E. (2024). Anuário Estatístico De Energia Elétrica 2024. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- [4] Jain, R., Nagasawa, K., Veda, S., & Sprik, S. (2023). Grid ancillary services using electrolyzer-Based power-to-Gas systems with increasing renewable penetration. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 6, 100308.
- [5] Lam, D. H. C., Wong, J., Lim, Y. S., & Hee, J. C. Y. (2019). DSTATCOM-Fuel Cell System on Radial Low-voltage Distribution Network for Mitigating Voltage Rise Caused by High Penetration of Photovoltaic Systems. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*.

- [6] Wong, J., Lam, D. H. C., Lim, Y. S., San Thiam, H., & Chua, K. H. (2019, December). Viability Analysis on DSTATCOM-Fuel Cell for Mitigating Voltage Fluctuation in Large-scaled Photovoltaic System. In 2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES) (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Ali, A., Shaaban, M. F., & Mahmoud, K. (2024). Optimizing Hydrogen Systems and Demand Response for Enhanced Integration of RES and EVs in Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- [8] Čović, N., Pavić, I., & Pandžić, H. (2024). Multi-energy balancing services provision from a hybrid power plant: PV, battery, and hydrogen technologies. *Applied energy*, 374, 123966.
- [9] Sahoo, S., & Timmann, P. (2023). Energy storage technologies for modern power systems: A detailed analysis of functionalities, potentials, and impacts. *IEEE Access*, 11, 49689-49729.
- [10] Khaleel, M., Yusupov, Z., Alderoubi, N., Habeeb, L. J., Elmnifi, M., Mohammed, A., & Majdi, H. S. (2024). An Optimization Approaches and Control Strategies of Hydrogen Fuel Cell Systems in EDG-Integration Based on DVR Technology. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 57(2).
- [11] IEEE Std 1159-2019 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York, NY.
- [12] ANEEL (2021). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica.
- [13] Caldeira, C. A. Análise do fornecimento de serviços ancilares por um sistema de armazenamento de energia baseado em bateria em uma rede de distribuição. UFPB, 2022.
- [14] Dozein, M. G., De Corato, A. M., & Mancarella, P. (2022). Virtual inertia response and frequency control ancillary services from hydrogen electrolyzers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(3), 2447-2459.
- [15] Ribeiro, F. J., Lopes, J. A. P., Fernandes, F. S., Soares, F. J., & Madureira, A. G. (2023). The role of hydrogen electrolyzers in frequency related ancillary services: A case study in the Iberian Peninsula up to 2040. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 35, 101084.
- [16] Shi, T., Xu, Z., Gu, L., & Zhou, H. (2024). Research on Fast Frequency Response Control Strategy of Hydrogen Production Systems. *Electronics*, 13(5), 956.
- [17] Ennassiri, Y., Ferro, G., Robba, M., Damm, G., & Prado, E. O. (2024). Techno-Economic Assessment of a Large-Scale Electrolysis Plant in Hydrogen and Ancillary Service Markets. *IFAC-PapersOnLine*, 58(13), 140-145.
- [18] Dadkhah, A., Vahidi, B., Shafie - khah, M., & Catalão, J. P. (2020). Power system flexibility improvement with a focus on demand response and wind power variability. *IET Renewable Power Generation*, 14(6), 1095-1103.
- [19] Li, W., Du, P., & Lu, N. (2020). PFR ancillary service in low - inertia power system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(5), 920-930.
- [20] Cicénas, P., & Radziukynas, V. (2022). Developed transfer function allows hydro generators to enter the full range of ancillary services market. *Energies*, 15(2), 397.
- [21] Alpizar-Castillo, J., Ramirez-Elizondo, L., & Bauer, P. (2022). Assessing the role of energy storage in multiple energy carriers toward providing ancillary services: A review. *Energies*, 16(1), 379.
- [22] Liu, J., Hu, C., Kimber, A., & Wang, Z. (2020). Uses, cost-benefit analysis, and markets of energy storage systems for electric grid applications. *Journal of Energy Storage*, 32, 101731.
- [23] Vianna, P. C. P. Potencial para produção de hidrogênio verde via eletrólise fotovoltaica da água para comunidades isoladas na Amazônia legal. UFSM, 2024.
- [24] Khaleel, M. M., Adzman, M. R., & Zali, S. M. (2021). An integrated of hydrogen fuel cell to distribution network system: Challenging and opportunity for D-STATCOM. *Energies*, 14(21), 7073.
- [25] EPE-EMPRESA. (2024). Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034: Transmissão de Energia.
- [26] Huang, B., Wang, D., Wu, D., Dumas, B., & Wendt, D. S. (2024, January). Modeling and Assessment of Integrated Hydroelectric Power and Hydrogen Energy Storage. In 2024 IEEE Electrical Energy Storage Application and Technologies Conference (EESAT) (pp. 1-6). IEEE.
- [27] Ahmed, N., & Weber, H. (2021, September). A Novel Hydrogen Storage Power Plant Structure for High Renewable Energy Penetration. In NEIS 2021; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems (pp. 1-6). VDE.
- [28] Deng, W., Pei, W., Zhuang, Y., Li, N., Zhang, X., Yang, Y., & Kong, L. (2021, September). Integration control of renewable energy/hydrogen energy system based on flexible DC interconnection. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2022, No. 1, p. 012032). IOP Publishing.
- [29] Farag, H. E., Al-Obaidi, A., Khani, H., El-Taweel, N., El-Saadany, E. F., & Zeineldin, H. H. (2020). Optimal operation management of distributed and centralized electrolysis-based hydrogen generation and storage systems. *Electric Power Systems Research*, 187, 106476.
- [30] Gu, Z., Pan, G., Gu, W., Qiu, H., & Lu, S. (2023). Robust optimization of scale and revenue for integrated power-to-hydrogen systems within energy, ancillary services, and hydrogen markets. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [31] Guerra, K., Gutiérrez-Alvarez, R., Guerra, O. J., & Haro, P. (2023). Opportunities for low-carbon generation and storage technologies to decarbonise the future power system. *Applied Energy*, 336, 120828.
- [32] Hafsij, O., Abdelkhalek, O., Mekhilef, S., Soumeur, M. A., Hartani, M. A., & Chakar, A. (2022). Integration of hydrogen technology and energy management comparison for DC-Microgrid including renewable energies and energy storage system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102121.
- [33] Maluenda, M., Córdova, S., Lorca, Á., & Negrete-Pincetic, M. (2023). Optimal operation scheduling of a PV-BESS-Electrolyzer system for hydrogen production and frequency regulation. *Applied Energy*, 344, 121243.
- [34] MansourLakouraj, M., Niaz, H., Liu, J. J., Siano, P., & Anvari-Moghaddam, A. (2021). Optimal risk-constrained stochastic scheduling of microgrids with hydrogen vehicles in real-time and day-ahead markets. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128452.
- [35] Medved', D., Martinko, D., Kolcun, M., Király, J., Shavolkin, O., & Shvedchikova, I. (2023, May). Analysis of Dynamic Events in the Network During the Operation of a SOFC Hydrogen Fuel Cell. In 2023 23rd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) (pp. 1-6). IEEE.
- [36] Migliari, L., Micheletto, D., & Cocco, D. (2024). A hydrogen-fuelled compressed air energy storage system for flexibility reinforcement and variable renewable energy integration in grids with high generation curtailment. *Energy Conversion and Management*, 306, 118308.
- [37] Shi, R., Tang, K., & Lee, K. Y. (2023). Optimal Configuration of Self-Consistent Microgrid System with Hydrogen Energy Storage for Highway Service Area. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 7960-7965.
- [38] Wang, P., Chen, X., Zhang, Y., Zhang, L., & Huang, Y. (2024). Fractional-Order Load Frequency Control of an Interconnected Power System with a Hydrogen Energy-Storage Unit. *Fractal and Fractional*, 8(3), 126.
- [39] Xuan, J., Chen, Z., Zheng, J., Zhang, Z., & Shi, Y. (2023). Optimal planning of hybrid electric-hydrogen energy storage systems via multi-objective particle swarm optimization. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1034985.
- [40] Zhou, L., & Zhou, Y. (2023). Study on thermo-electric-hydrogen conversion mechanisms and synergistic operation on hydrogen fuel cell and electrochemical battery in energy flexible buildings. *Energy Conversion and Management*, 277, 116610.