v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

MODELAGEM DE REDES HÍBRIDAS CA/CC PARA INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS

HYBRID AC/DC NETWORK MODELING FOR RENEWABLE ENERGY INTEGRATION

MODELADO DE REDES HÍBRIDAS CA/CC PARA LA INTEGRACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

Mauro Freitas Neto[1]

e7109082

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9082

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

A pesquisa examinou a modelagem de redes CA/CC e a integração de fontes renováveis, considerando arquiteturas, controle de conversores e capacidade de hospedagem, buscando-se responder ao seguinte problema de pesquisa: quais são os desafios, as topologias e os métodos de controle documentados para garantir a integração de fontes de energia em redes CA/CC? Assim, o objetivo geral consiste em mapear e sintetizar a literatura sobre as arquiteturas, as metodologias de controle e as avaliações dos impactos decorrentes da conexão de fontes de geração às redes CA/CC. Realizou-se uma revisão narrativa da literatura, de natureza básica, com abordagem qualitativa e finalidade descritiva e explicativa. Selecionaram-se artigos publicados entre 2020 e 2024, em português e inglês, gratuitos, completos e relacionados ao tema. Os resultados identificaram topologias radiais, em anel, em malha, com múltiplas portas, unipolares e bipolares. Em cenários específicos examinados pelos estudos incluídos, foram observados redução de perdas de 0,37% mediante reconfiguração, diminuição do fator de desequilíbrio de 28,26% para 1,23%, redução da distorção harmônica de 39,57% para 9,83% e manutenção da distorção da corrente abaixo de 5%. Em outro estudo, realizado no sistema IEEE de 39 barras, a capacidade analisada alcançou 300 MW, enquanto a inserção de 350 MW resultou em violações operacionais. Concluiu-se que arquitetura, modelagem, controle e avaliação devem atuar conjuntamente, orientando projetos e análises de redes em diferentes condições.

PALAVRAS-CHAVE: Redes CA/CC. Fontes renováveis. Conversores de potência. Capacidade de hospedagem.

ABSTRACT

This study examined AC/DC network modeling and the integration of renewable energy sources, considering network architectures, converter control, and hosting capacity, with the aim of addressing the following research question: what challenges, topologies, and control methods have been documented to ensure the integration of energy sources into AC/DC networks? Accordingly, the general objective was to map and synthesize the literature on network architectures, control methodologies, and assessments of the impacts resulting from the connection of generation sources to AC/DC networks. A narrative literature review was conducted, characterized as basic research with a qualitative approach and descriptive and explanatory purposes. Articles published between 2020 and 2024, in Portuguese and English, freely available in full text and related to the topic, were selected. The results identified radial, ring, mesh, multi-port, unipolar, and bipolar topologies. In specific scenarios examined by the included studies, a 0.37% reduction in losses through network reconfiguration, a decrease in the unbalance factor from 28.26% to 1.23%, a reduction in

[1] UFV, Especialista em Sistemas Fotovoltaicos Isolados e Conectados à Rede Elétrica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

harmonic distortion from 39.57% to 9.83%, and current distortion below 5% were reported. In another study, conducted using the IEEE 39-bus system, the analyzed hosting capacity reached 300 MW, whereas the insertion of 350 MW resulted in operational limit violations. It was concluded that architecture, modeling, control, and system assessment should be jointly considered to guide network design and analysis under different operating conditions.

KEYWORDS: *AC/DC networks. Renewable sources. Power converters. Hosting capacity.*

RESUMEN
Esta investigación examinó el modelado de redes de CA/CC y la integración de fuentes de energía renovable, considerando arquitecturas, control de convertidores y capacidad de alojamiento. El objetivo fue mapear y sintetizar la literatura sobre arquitecturas, metodologías de control e impactos de la conexión de fuentes de generación a redes de CA/CC. Se realizó una revisión narrativa, de naturaleza básica, enfoque cualitativo y finalidad descriptiva y explicativa. Se seleccionaron artículos publicados entre 2020 y 2024, en portugués e inglés, de acceso gratuito, disponibles en texto completo y relacionados con el tema. Los resultados identificaron topologías radiales, en anillo, en malla, multipuerto, unipolares y bipolares. En escenarios específicos de los estudios analizados, se observaron una reducción de pérdidas del 0,37 % mediante reconfiguración, una disminución del factor de desequilibrio del 28,26 % al 1,23 %, una reducción de la distorsión armónica del 39,57 % al 9,83 % y una distorsión de corriente inferior al 5 %. En otro estudio, realizado con el sistema IEEE de 39 barras, la capacidad analizada alcanzó 300 MW, mientras que la inserción de 350 MW provocó violaciones operativas. Se concluyó que la arquitectura, el modelado, el control y la evaluación deben considerarse conjuntamente, respetando las particularidades de los sistemas y las condiciones operativas analizadas.

PALABRAS CLAVE*: Redes de CA/CC. Fuentes renovables. Convertidores de potencia. Capacidad de alojamiento.*

INTRODUÇÃO

A transformação da matriz energética, impulsionada pela inserção de novas fontes de geração, tem modificado tanto a estrutura quanto a operação dos sistemas elétricos. Nesse cenário, estima-se que a capacidade de geração de eletricidade possa alcançar 700 GW. Parte expressiva dessas unidades, especialmente aquelas associadas à geração distribuída, produz energia em corrente contínua (CC), enquanto as redes convencionais de distribuição operam predominantemente em corrente alternada (CA) (Lima *et al.*, 2020; Aljafari *et al.*, 2022).

Essa diferença exige sucessivas etapas de conversão, capazes de ocasionar perdas de eletricidade entre 10% e 30%, o que amplia o interesse por topologias híbridas CA/CC que permitam integrar geração e consumo em um mesmo ambiente elétrico (Lima *et al.*, 2020; Aljafari *et al.*, 2022). Nessa perspectiva, a adoção dessas topologias envolve desafios relacionados à modelagem dos circuitos, ao controle dos conversores e ao gerenciamento dos fluxos de potência (Pires; Pires; Cordeiro, 2023; Hassan *et al.*, 2024).

Em arranjos estruturados em corrente contínua, são identificadas variações de rendimento entre 12% e 18%, enquanto conversores de tensão e retificadores podem alcançar

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

eficiência próxima de 95% (Pires; Pires; Cordeiro, 2023). Esses equipamentos desempenham função central nos pontos de interligação, pois regulam a injeção de eletricidade, compatibilizam diferentes níveis de tensão e controlam a circulação de potência entre as linhas do sistema. Por essa razão, sua representação matemática precisa considerar tanto o comportamento dos componentes quanto as condições operacionais da rede (Hassan *et al.*, 2024).

O avanço da geração solar nas unidades consumidoras torna essa discussão ainda mais necessária, uma vez que a participação da geração solar pode atingir aproximadamente 15% da potência dos alimentadores. Embora esse crescimento contribua para a diversificação da matriz, ele também impõe novas exigências aos sistemas de controle e aos equipamentos de conversão, que podem ser submetidos a sobrecargas situadas entre 30% e 60% de suas especificações de fábrica. Assim, o estudo das arquiteturas CA/CC não se limita à descrição de configurações técnicas, mas abrange a compreensão das perdas de potência, das restrições dos condutores e dos efeitos produzidos pela conexão de diferentes fontes de geração (Lopes Filho *et al.*, 2021).

Além da relevância acadêmica relacionada ao mapeamento das arquiteturas e metodologias de simulação, o tema apresenta implicações para o planejamento das concessionárias de distribuição. Nessas empresas, as perdas nas linhas podem atingir 0,62% nos alimentadores, enquanto as variações de energia ocasionam gastos de 36 milhões nas operações. O descumprimento dos parâmetros elétricos também pode resultar em cobranças tarifárias de 225 mil. Diante dessas consequências, o levantamento das soluções documentadas na literatura pode contribuir para o projeto das redes, para a definição de estratégias operacionais e para a integração de unidades de geração pertencentes aos consumidores (Reinaldo; Dupczak; Aranha Neto, 2020).

Essa discussão também se relaciona às metas de redução das emissões de carbono previstas até 2060. As estimativas indicam que a energia solar poderá corresponder a 11% da geração mundial até 2050, ampliando sua participação no atendimento à demanda de eletricidade, inclusive em áreas residenciais. Ao reduzir a dependência da queima de combustíveis fósseis, essa fonte pode contribuir para a reorganização do fornecimento energético. Contudo, seus benefícios dependem da existência de redes capazes de receber a eletricidade gerada sem comprometer a estabilidade, a confiabilidade e a qualidade do serviço oferecido à população (Lima; Freitas, 2021; Li *et al.*, 2022).

Os desafios tornam-se mais evidentes quando os geradores são conectados aos barramentos de distribuição. A ocorrência de faltas pode provocar afundamentos de tensão que alteram a forma de onda para níveis situados entre 0,1 e 0,9 da tensão nominal. Em simulações, foram observadas perdas de amplitude de 13%, 17% e 57% nas fases das redes elétricas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Paralelamente, a injeção de potência reativa pode ocasionar desvios no funcionamento dos transformadores instalados nos sistemas urbanos, exigindo mecanismos de controle que mantenham as grandezas elétricas dentro dos limites estabelecidos para a operação (Piccini *et al.*, 2022).

Entre esses limites, destaca-se a exigência das concessionárias de que a distorção das formas de onda das correntes permaneça abaixo de 5%. A integração das fontes de geração, portanto, precisa conciliar o aproveitamento energético com a manutenção dos padrões de tensão, corrente e qualidade da energia (Jayaram *et al.*, 2022). A partir desse contexto, formula-se a seguinte questão de pesquisa: quais são os desafios, as topologias e os métodos de controle documentados para garantir a integração de fontes de energia em redes CA/CC?

Para responder ao problema proposto, o objetivo geral consiste em mapear e sintetizar a literatura sobre as arquiteturas, as metodologias de controle e as avaliações dos impactos decorrentes da conexão de fontes de geração às redes CA/CC. Esse direcionamento considera, sobretudo, que as reconfigurações nas topologias de interligação podem proporcionar reduções de perdas de aproximadamente 0,37%, desde que estejam associadas a sistemas adequados de modelagem, conversão e controle dos fluxos de potência (Hassan *et al.*, 2024).

Já os objetivos específicos visam: I) identificar e categorizar as principais arquiteturas e metodologias de modelagem de redes híbridas CA/CC; II) revisar as estratégias de controle aplicadas aos conversores de potência visando a estabilidade e a qualidade de energia; e III) abordar os impactos da penetração de geração distribuída renovável e os métodos para avaliar a capacidade de hospedagem.

REFERENCIAL TEÓRICO

A arquitetura das redes híbridas CA/CC permite reunir, em um mesmo sistema de distribuição, fontes de geração e cargas de consumo que operam em corrente alternada e em corrente contínua. Ao aproximar esses dois ambientes, busca-se reduzir as etapas de conversão e, consequentemente, as perdas de energia associadas ao processo. A organização física pode assumir configurações radiais, em anel, em malha ou compostas por múltiplas portas interconectadas. Entre elas, a topologia radial estabelece a ligação entre o subsistema CA e o subsistema CC por meio de conversores de fonte de tensão (VSC) instalados no barramento (Hassan *et al.*, 2024).

Embora compartilhem princípios de conversão, controle e integração energética, os sistemas abordados na literatura analisada apresentam diferentes escalas de aplicação. As microrredes correspondem a estruturas locais capazes de integrar geração, armazenamento e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

cargas; as redes de distribuição abrangem alimentadores e unidades consumidoras conectadas ao sistema elétrico; e os sistemas de transmissão operam em níveis e condições distintas de transferência de potência. Neste estudo, essas configurações não são tratadas como equivalentes, mas examinadas comparativamente quanto às contribuições da modelagem CA/CC, dos conversores e das estratégias de controle para a integração de fontes renováveis.

A escolha de uma dessas configurações interfere diretamente na maneira como o fluxo de potência e as perdas serão representados matematicamente. Por essa razão, a modelagem das redes híbridas não se limita às equações convencionais de balanço de energia, pois requer adequações da matriz Jacobiana capazes de incorporar as relações entre os subsistemas. Quando fontes renováveis são conectadas à transmissão, a matriz precisa ser modificada de acordo com os métodos de controle empregados, de modo que as interações físicas entre correntes e tensões sejam computadas. Nos polos de retificadores e inversores, as expressões analíticas representam ainda as variáveis operacionais e de fase envolvidas na distribuição de eletricidade (Li *et al.*, 2022).

Como essas relações abrangem componentes com comportamentos distintos, sua visualização pode ser organizada por meio da Representação Macroscópica Energética. Fundamentada no princípio físico de ação e reação e na causalidade integral, essa ferramenta gráfica permite simular as interações das variáveis presentes nas microrredes CA/CC. Geradores fotovoltaicos, unidades de bateria, células a combustível e equipamentos conversores são representados em diagramas de blocos que evidenciam a circulação da eletricidade. Com isso, tornam-se identificáveis tanto as referências quanto os sinais cruzados de controle de potência trocados entre os subsistemas (Solano; Jimenez; Ilinca, 2020).

A forma como esses componentes são distribuídos também varia conforme a estrutura adotada no trecho de corrente contínua. Em uma configuração unipolar, dois cabos de transmissão conectam os geradores e as unidades de armazenamento aos mesmos terminais de condução. Na arquitetura bipolar, por sua vez, a rede utiliza três cabos: um polo positivo, um polo negativo e um condutor neutro. Essa composição oferece uma possibilidade adicional de continuidade operacional, uma vez que, diante da falha de uma das linhas energizadas, a transmissão pode ser mantida pelos dois cabos remanescentes (Pires; Pires; Cordeiro, 2023).

Embora essas configurações definam os caminhos físicos da energia, a interação entre as subdivisões CA e CC depende da atuação dos conversores bidirecionais de interligação. São esses dispositivos que transferem potência entre as usinas geradoras instaladas nos barramentos de corrente contínua e as cargas conectadas ao terminal de corrente alternada. Quando o controle é descentralizado, os sistemas de geração renovável podem regular o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

fornecimento de potência com independência no processamento dos dados. Ao mesmo tempo, a própria estrutura de controle pode assumir tarefas relacionadas à filtragem dos harmônicos presentes nas linhas de distribuição (Jayaram *et al.*, 2022).

Essa autonomia operacional não elimina, entretanto, os limites impostos pela rede que recebe a geração renovável. No caso dos sistemas solares, o dimensionamento da conexão depende do cálculo computacional do limite de sustentabilidade e da capacidade de hospedagem do sistema de distribuição. Esse parâmetro quantifica a potência de geração fotovoltaica que pode ser inserida nos alimentadores sem ultrapassar os limites regulatórios de operação. Sua avaliação considera os limites elétricos necessários à estabilidade da rede, procurando evitar alterações nos indicadores de perdas técnicas e nos perfis de tensão acompanhados pelas concessionárias de distribuição (Lima; Freitas, 2021).

À medida que a potência fotovoltaica instalada aumenta, seus efeitos deixam de se restringir ao ponto de conexão e passam a repercutir sobre a rede de baixa tensão. A geração injetada pelos inversores pode alterar o sentido do fluxo de potência nos alimentadores e nos transformadores que atendem circuitos residenciais e industriais. Essa mudança interfere nos cálculos das perdas técnicas realizados pelas empresas fornecedoras e pode elevar de forma sistêmica os perfis de amplitude da tensão registrados nos terminais elétricos. A inserção da geração distribuída, portanto, altera tanto a circulação da potência quanto os parâmetros utilizados para avaliar o funcionamento da rede (Reinaldo; Dupczak; Aranha Neto, 2020).

Manter essas alterações dentro dos limites operacionais exige que os inversores disponham de algoritmos e rotinas específicas de regulação de tensão. As formulações implementadas nos controladores determinam as correntes de referência e calculam as parcelas de potência ativa e reativa transferidas aos pontos de acoplamento. Sua atuação torna-se especialmente relevante em situações de perturbação, pois a lógica reguladora pode mitigar os afundamentos momentâneos nos níveis de amplitude das fases condutoras produzidos por curtos-circuitos. Desse modo, o controle da injeção de energia também funciona como mecanismo de resposta às variações ocorridas no sistema de distribuição de força (Piccini *et al.*, 2022).

Nem todas essas variações, contudo, podem ser tratadas por parâmetros fixos. O processamento das grandezas energéticas provenientes de fontes renováveis demanda técnicas de compensação apoiadas em lógicas adaptativas, capazes de acompanhar mudanças na rede. Entre as estratégias utilizadas, o controle em cascata atua sobre conversores e filtros para ajustar os sinais de referência da injeção de eletricidade. O cálculo das matrizes em espaço de estados, associado à aplicação de modelos matemáticos de ordem reduzida, fornece parâmetros para

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

orientar os inversores quando submetidos às oscilações de energia produzidas pelo próprio sistema elétrico (Hollweg *et al.*, 2021).

A necessidade de coordenar respostas distintas explica a adoção de estratégias hierárquicas nas microrredes híbridas CA/CC. Programadas nos componentes de eletrônica de potência, essas estratégias distribuem funções de controle conforme o nível de atuação. Na categoria primária, as equações definem os limites da tensão elétrica e regulam o repasse físico da carga energética entre as diversas fontes que compõem o subsistema local de geração. Para que essa distribuição acompanhe as condições momentâneas da microrrede, podem ser utilizadas otimizações em programação linear mista, responsáveis por transmitir referências dinâmicas aos conversores bidirecionais de interligação (Sarwar *et al.*, 2022).

A eficiência dessa coordenação depende, ainda, da estrutura física responsável pela conversão. Nesse campo, aparecem propostas de retificadores híbridos bidirecionais destinados ao controle da qualidade elétrica nas redes de distribuição de cargas. A configuração associa elementos de eletrônica de potência capazes de processar as correntes e operar em modo inversor para suprir cargas conectadas à eletricidade da rede primária de fornecimento. Os capacitores posicionados na saída regulam a tensão do barramento CC e realizam o compartilhamento da contribuição de potência proveniente dos sistemas de geração fotovoltaica (Barbosa *et al.*, 2020).

O funcionamento contínuo desse conjunto também requer recursos capazes de compensar a intermitência da geração e as incertezas da carga. Por isso, a interconexão e a gestão da transmissão fotovoltaica incorporam módulos de baterias destinados ao armazenamento de energia e à manutenção das constantes de tensão e frequência das microrredes locais. Sensores digitais e medidores distribuídos pelos conectores acompanham o repasse da eletricidade aos circuitos e alimentam o fluxo informacional do sistema. A partir desses registros, os conversores recebem orientações para responder às variações das instalações fotovoltaicas e às falhas verificadas na rede geradora vinculada ao sistema de distribuição (Aljafari *et al.*, 2022).

METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido por meio de uma revisão narrativa da literatura, com procedimentos de pesquisa bibliográfica, natureza básica, abordagem qualitativa e finalidade descritiva e explicativa. A análise contemplou arquiteturas de redes CA/CC, métodos de modelagem, estratégias de controle de conversores e impactos da integração de fontes renováveis em sistemas elétricos. Esse delineamento possibilitou organizar conceitos, confrontar

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

abordagens e construir uma síntese do conhecimento, sem exigir a exaustividade e a replicabilidade próprias das revisões sistemáticas (Moura; Barbosa; Rocha, 2026).

Embora a investigação tenha adotado o termo abrangente “fontes renováveis”, o corpus apresentou predominância de estudos relacionados à geração fotovoltaica, além de trabalhos que abordaram sistemas híbridos com diferentes fontes e dispositivos de armazenamento. Dessa forma, os resultados específicos da geração fotovoltaica foram interpretados de acordo com seus respectivos contextos, evitando sua generalização automática para todas as tecnologias de geração renovável.

O levantamento bibliográfico foi realizado nas bases Google Scholar, SciELO, ScienceDirect, IEEE Xplore e Portal de Periódicos CAPES, no período de junho a agosto de 2026. Foram utilizados os descritores “modelagem de redes CA/CC”, “redes híbridas CA/CC”, “transmissão de energia renovável”, “geração distribuída”, “conversores de potência”, “fluxo de potência” e “capacidade de hospedagem”, bem como seus correspondentes em inglês. As principais estratégias de busca combinaram esses termos mediante os operadores booleanos AND e OR, incluindo expressões como “redes híbridas CA/CC” AND “fontes renováveis”, “modelagem de redes CA/CC” AND “fluxo de potência”, “geração distribuída” AND “capacidade de hospedagem” e “conversores de potência” AND “fontes renováveis”, com adaptações de acordo com os recursos e a abrangência de cada base consultada.

Foram estabelecidos como critérios de inclusão artigos científicos publicados entre 2020 e 2024, redigidos em português ou inglês, disponíveis gratuitamente em texto completo e relacionados à modelagem, ao controle ou à integração de fontes renováveis em redes CA/CC. Também foram considerados estudos que apresentassem identificação de autoria, ano de publicação, periódico, objetivo, método ou modelo empregado e resultados compatíveis com os eixos estabelecidos para a análise. O recorte temporal de 2020 a 2024 foi adotado com o propósito de concentrar a revisão, considerando a delimitação estabelecida para o levantamento.

Foram excluídos textos duplicados, materiais sem autoria identificada, publicações fora do recorte temporal, estudos em outros idiomas, documentos com acesso restrito e trabalhos sem relação direta com o problema de pesquisa. Também foram excluídos resumos, editoriais, notícias, apresentações, capítulos sem avaliação por pares e estudos sobre fontes renováveis que não apresentassem relação com redes CA/CC. A exigência de disponibilidade gratuita em texto completo constituiu um critério operacional da pesquisa e, por poder restringir o universo de publicações recuperadas, foi considerada uma limitação do processo de seleção.

As buscas recuperaram inicialmente 82 registros nas bases consultadas. Após a identificação e exclusão de 27 registros duplicados, permaneceram 55 estudos para a etapa de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

triagem. A análise dos títulos e resumos levou à exclusão de 32 trabalhos que não atendiam aos critérios estabelecidos, resultando em 23 artigos submetidos à leitura do texto completo. Nessa etapa, 8 estudos foram excluídos, resultando em um corpus final constituído por 15 artigos.

Os estudos selecionados foram submetidos à leitura integral e ao fichamento das informações relevantes. Para cada publicação, foram considerados autores, ano, objetivo, tipo de sistema analisado, método ou modelo empregado, principais resultados e eixo temático correspondente. Posteriormente, os trabalhos foram organizados em três eixos de análise: I) arquiteturas e metodologias de modelagem de redes híbridas CA/CC; II) estratégias de controle aplicadas aos conversores de potência, estabilidade e qualidade da energia; e III) impactos da penetração de geração distribuída renovável e métodos de avaliação da capacidade de hospedagem. Essa organização permitiu comparar os estudos considerando suas diferentes escalas, configurações, métodos e condições operacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais arquiteturas e metodologias de modelagem de redes híbridas CA/CC

Ao examinar a organização das redes híbridas CA/CC, Hassan *et al.* (2024) e Pires, Pires e Cordeiro (2023) adotam perspectivas complementares sobre sua estrutura física. Enquanto Hassan *et al.* (2024) distinguem topologias radiais, em anel, em malha e de múltiplas portas conforme os caminhos disponíveis para o fluxo de potência, Pires, Pires e Cordeiro (2023) concentram a classificação na disposição dos condutores do subsistema CC. Assim, o primeiro estudo enfatiza a conexão entre subsistemas, ao passo que o segundo detalha a organização interna do barramento.

Essa diferença de escala torna-se mais evidente quando se observam as implicações operacionais das configurações analisadas. Para Hassan *et al.* (2024), a topologia radial, interligada por conversores VSC, apresenta simplicidade e menor custo, enquanto as estruturas em anel e de múltiplas portas ampliam a redundância, a regulação de tensão e a confiabilidade, embora aumentem a complexidade do controle e da proteção. Pires, Pires e Cordeiro (2023), por sua vez, associam a continuidade operacional à configuração bipolar, formada pelos polos positivo, neutro e negativo, em contraste com os dois condutores da estrutura unipolar.

Se esses autores descrevem como a rede pode ser fisicamente organizada, Solano, Jimenez e Ilinca (2020) avançam para a representação funcional dos elementos que compõem a microrrede. A Representação Macroscópica Energética, baseada em causalidade integral, reúne geradores fotovoltaicos, células a combustível, ultracapacitores, baterias e conversores em blocos de conversão, acúmulo e distribuição. Diferentemente das classificações de Hassan

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

et al. (2024) e Pires, Pires e Cordeiro (2023), essa abordagem não prioriza caminhos ou condutores, mas as relações energéticas necessárias à identificação dos laços de controle.

A modularidade proposta por Solano, Jimenez e Ilinca (2020) encontra continuidade em Aljafari *et al.* (2022), embora os dois estudos atribuam funções distintas à modelagem. No primeiro, a decomposição em blocos permite testar estratégias de gerenciamento energético sem modificar a estrutura global da microrrede. Aljafari *et al.* (2022), em contrapartida, incorporam sensores, medidores inteligentes e comunicação bidirecional à arquitetura, fazendo com que os dados coletados continuamente alimentem algoritmos de otimização. Desse modo, a representação funcional cede espaço a uma infraestrutura voltada ao controle em tempo real.

Enquanto Aljafari *et al.* (2022) tratam a integração pelo intercâmbio de dados entre dispositivos e centro de controle, Barbosa *et al.* (2020) concentram a análise no compartilhamento físico do processamento de potência. O retificador híbrido monofásico bidirecional combina um retificador não controlado (RNC)/inversor com um conversor SEPIC isolado. No lado CA, ambos operam em paralelo para produzir correntes senoidais de baixa distorção; no lado CC, os capacitores em série regulam o barramento. O processamento divide-se em 35,5% no RNC e 64,5% no SEPIC, com eficiência global de 93%.

Lima *et al.* (2020) também direcionam a modelagem à interface de conversão, mas se afastam da estrutura híbrida apresentada por Barbosa *et al.* (2020). Em vez de dividir o processamento entre dois conversores, os autores utilizam um inversor fonte de corrente multistring, sem transformador e conectado à rede, cuja representação média em espaço de estados considera as etapas boost, buck e roda-livre. O filtro CL e o controlador proporcional-ressonante regulam a tensão no capacitor, permitindo injeção de corrente com fator de potência elevado e baixa distorção harmônica.

As estratégias de controle aplicadas aos conversores de potência visando a estabilidade e a qualidade de energia

Ao tratarem dos distúrbios que comprometem a qualidade da energia, Rezende *et al.* (2021) e Piccini *et al.* (2022) atribuem aos inversores funções que ultrapassam a conversão fotovoltaica, embora enfrentem problemas distintos. Rezende *et al.* (2021) concentram-se nas cargas desequilibradas e não lineares, propondo um condicionador de quatro fios e estágio único para um sistema de 212,4 kW. Com a teoria p-q-0 e o controle por histerese, o fator de desequilíbrio caiu de 28,26% para 1,23%, enquanto a distorção harmônica total (THD) passou de 39,57% para 9,83%.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Diferentemente da compensação contínua desenvolvida por Rezende *et al.* (2021), Piccini *et al.* (2022) direcionam o controle aos afundamentos momentâneos de tensão provocados por curtos-circuitos. A estratégia, associada a um Regulador Automático de Tensão modificado, atua em inversores de 75 kW quando a tensão se torna inferior a 0,9 pu. Nesse momento, a redução rápida da potência ativa libera a capacidade nominal para a injeção de potência reativa, permitindo restaurar a estabilidade da tensão no ponto de acoplamento comum.

Essa utilização da potência reativa para sustentar a tensão aproxima Piccini *et al.* (2022) de Lopes Filho *et al.* (2021), mas a temporalidade e a finalidade do controle diferem. Enquanto os primeiros respondem a eventos momentâneos de falta, Lopes Filho *et al.* (2021) procuram equilibrar continuamente a regulação da tensão e a redução das perdas em redes radiais. Avaliado em uma rede de 100 barras, o algoritmo calcula o despacho reativo a partir da sensibilidade da tensão e da impedância R/X, mantendo o perfil próximo de 1 pu e minimizando as perdas nas linhas.

Embora Lopes Filho *et al.* (2021) ajustem a potência reativa conforme as condições da rede, Hollweg *et al.* (2021) deslocam a adaptação para a própria estrutura do controlador. A proposta MRAC-SM em cascata foi desenvolvida para conectar um inversor Quasi-Z-Source com filtro LCL a redes fracas e de alta impedância. Ao substituir modelos mais complexos por referências de primeira ordem, o método simplifica as equações, preserva a adaptação rápida e a rejeição de distúrbios, reduz o esforço computacional em 29,8% e atende aos limites da ABNT NBR 16149.

A capacidade de responder às condições da rede também aparece em Jayaram *et al.* (2022), porém associada à coordenação descentralizada de microrredes híbridas com múltiplas fontes renováveis. Em comparação com Hollweg *et al.* (2021), que priorizam robustez adaptativa diante da impedância, Jayaram *et al.* (2022) ampliam as atribuições do conversor de interligação. Baseado na teoria da potência reativa instantânea, o dispositivo transfere potência entre os barramentos CA e CC, fornece suporte de reativos e atua como filtro ativo virtual, reduzindo a THD da corrente da rede para menos de 5%.

As funções reunidas por Jayaram *et al.* (2022) podem ser situadas na estrutura hierárquica discutida por Sarwar *et al.* (2022). Enquanto o primeiro estudo demonstra a atuação concreta do conversor na troca de potência, filtragem e compensação reativa, Sarwar *et al.* (2022) organizam essas atribuições segundo diferentes níveis de controle. O nível primário, baseado em curvas droop, regula localmente tensão e frequência, ao passo que os níveis secundário e terciário coordenam suporte de reativos, inércia virtual e mitigação dos transitórios de comutação associados à baixa inércia dos conversores estáticos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os impactos da penetração de geração distribuída renovável e os métodos para avaliar a capacidade de hospedagem

A capacidade de hospedagem renovável assume limites distintos conforme o nível da rede e a variável crítica considerada. Li *et al.* (2022) mostram que, no sistema IEEE de 39 barras, a redução da inércia rotacional restringe a penetração pela estabilidade de frequência, limitada a desvios transitórios de 1 Hz e permanentes de 0,2 Hz. Nessas condições, o máximo alcança 300 MW, com perda mínima de 0,735 MW na barra 26, pois 350 MW já provocam violações operacionais nessa configuração analisada.

Em redes de distribuição radiais, a restrição deixa de se concentrar na frequência e passa ao perfil de tensão. Enquanto Li *et al.* (2022) fixam o limite pela resposta dinâmica do sistema, Lima e Freitas (2021) demonstram que a localização da geração determina a capacidade de hospedagem no Alimentador 19 da DMED, cuja demanda é 4.576,32 kW. A barra 6 admite 2,3 MWp, ou 51,4%, antes de exceder 1,05 pu, ao passo que a barra 1 suporta 3,9 MWp, equivalentes a 85,7%.

Essa dependência espacial identificada por Lima e Freitas (2021) é parcialmente superada nas arquiteturas híbridas examinadas por Hassan *et al.* (2024). Em vez de ampliar apenas a geração em alimentadores CA, os autores incorporam elos CC e conversores VSC, eliminando conversões desnecessárias e melhorando a regulação. A solução reduz o corte de geração em até 11,47%, enquanto a alocação otimizada de baterias e veículos elétricos alivia o estresse térmico, vantagem inexistente nos alimentadores radiais CA tradicionais sob maiores níveis renováveis.

Mesmo sem recorrer à conversão híbrida de Hassan *et al.* (2024), a participação fotovoltaica modifica as perdas em redes convencionais. Reinaldo, Dupczak e Aranha Neto (2020) verificam, no alimentador BFA02 da Celesc, um comportamento parabólico: as perdas atingem o mínimo com 30% de penetração e retornam ao nível inicial quando a participação chega a 50%. Diferentemente da redução do corte de geração obtida nas redes híbridas, a expansão sem coordenação eleva as perdas técnicas e reduz o fator de potência percebido pela distribuidora.

A necessidade de coordenação evidenciada por Reinaldo, Dupczak e Aranha Neto (2020) orienta Lopes Filho *et al.* (2021). Em vez de modificar a topologia, como fazem Hassan *et al.* (2024), os autores utilizam os conversores para controlar potência reativa. A geração solar sem controle submete transformadores a sobrecargas contínuas entre 30% e 60% da capacidade; com o algoritmo, as sobretensões diminuem, os fluxos elétricos são otimizados e a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

capacidade útil de hospedagem dos alimentadores se amplia consideravelmente sem obras dispendiosas.

Se Lopes Filho *et al.* (2021) atuam sobre sobretensões e perdas em regime permanente, Piccini *et al.* (2022) concentram-se na resposta durante faltas. Os curtos-circuitos produzem afundamentos momentâneos entre 0,1 pu e 0,9 pu, com reduções de amplitude de 13%, 17% e 57% nas fases. Diante desse comportamento dinâmico, os autores modificam os reguladores de tensão dos inversores para injetar rapidamente potência reativa, evitando desligamentos em massa e complementando o controle contínuo empregado para ampliar a hospedagem renovável da rede.

A estabilidade durante faltas discutida por Piccini *et al.* (2022) encontra outro limite nos pontos de conexão com elevada impedância. Hollweg *et al.* (2021) mostram que redes fracas submetem os conversores a ressonâncias e oscilações severas, problema distinto dos afundamentos provocados por curtos-circuitos. Para enfrentá-lo, aplicam controle adaptativo MRAC-SM em cascata, associado a filtro LCL, em inversores Quasi-Z-Source. A estratégia mitiga flutuações de tensão no ponto de acoplamento e mantém a operação estável diante das variações operacionais do sistema elétrico.

Enquanto Hollweg *et al.* (2021) asseguram a estabilidade local do conversor em redes fracas, Sarwar *et al.* (2022) ampliam a análise para a coordenação hierárquica de microrredes híbridas CA/CC. O controle primário por droop não elimina desvios contínuos de tensão e frequência, pois os conversores carecem de inércia física. Por isso, a otimização terciária baseada em programação linear mista recalcula dinamicamente os pontos de operação dos conversores bidirecionais, restaura margens operacionais e maximiza a absorção das fontes renováveis estocásticas disponíveis.

A coordenação hierárquica de Sarwar *et al.* (2022) ganha suporte físico e informacional na abordagem de Aljafari *et al.* (2022). Enquanto a programação linear mista redefine pontos de operação, baterias e ultracapacitores amortecem variações abruptas de geração e carga. Paralelamente, sensores digitais conectados pela Internet das Coisas fornecem dados para ajustes do fluxo de potência em tempo real. A associação entre armazenamento, comunicação e controle reduz perdas, previne violações elétricas e eleva a capacidade de hospedagem das microrredes híbridas renováveis.

Ainda que armazenamento e controle hierárquico ampliem a absorção renovável, Jayaram *et al.* (2022) mostram que a hospedagem permanece condicionada à qualidade da corrente. Diferentemente de Aljafari *et al.* (2022), que enfatizam comunicação e amortecimento, os autores enfrentam distorções produzidas pela proliferação de inversores. O controle

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

descentralizado combina regulação de potência ativa e filtragem ativa no próprio conversor, mantendo a taxa de distorção harmônica total da corrente abaixo de 5% e permitindo ampliar a penetração sem violar o limite regulatório.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do estudo, constatou-se que a integração de fontes de energia às redes híbridas CA/CC depende menos da adoção de uma solução específica do que da articulação entre arquitetura, modelagem, controle, armazenamento, comunicação e capacidade de hospedagem. A questão de pesquisa foi respondida ao se verificar que o funcionamento dessas redes resultou da compatibilidade entre sua configuração física e os recursos empregados para regular a tensão, a frequência, os fluxos de potência, as perdas e a distorção harmônica.

A atuação dos conversores reforçou essa dependência entre configuração e desempenho. Ao longo das análises, esses dispositivos deixaram de desempenhar apenas a função de interface entre os subsistemas e passaram a participar da regulação de tensão, da compensação reativa, da filtragem de harmônicos e do controle do fluxo de potência. O condicionador reduziu o fator de desequilíbrio de 28,26% para 1,23% e a distorção harmônica de 39,57% para 9,83%, evidenciando que a qualidade da energia esteve diretamente associada à estratégia de controle adotada.

O armazenamento e a comunicação complementaram esse conjunto ao oferecerem suporte diante da intermitência, das variações de carga, das faltas e das mudanças entre operação conectada e isolada. Ainda assim, os resultados mostraram que esses recursos não compensaram, por si mesmos, escolhas inadequadas de topologia ou controle. A integração ocorreu de modo mais consistente quando as decisões sobre estrutura, conversores, fontes, cargas e armazenamento foram tratadas de forma coordenada desde o planejamento da rede.

Dessa forma, o estudo permitiu concluir que a integração de fontes às redes CA/CC dependeu de decisões combinadas e não da aplicação independente de uma única técnica. A principal contribuição da pesquisa esteve na aproximação entre topologia, modelagem, controle e capacidade de hospedagem, pois essa leitura conjunta revelou que os ganhos operacionais permaneceram condicionados às características específicas de cada rede. Com isso, os resultados também afastaram a ideia de que uma solução universal pudesse responder a todos os cenários analisados.

Entre as limitações deste estudo, destacam-se a natureza narrativa da revisão, a ausência de um protocolo sistemático de seleção, o recorte temporal adotado, a inclusão apenas de artigos disponíveis gratuitamente em texto completo e a heterogeneidade dos sistemas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

examinados. Os estudos analisados envolveram diferentes escalas, topologias, métodos de simulação, tecnologias de geração e critérios operacionais, o que limita a comparação direta entre determinados indicadores quantitativos. Assim, valores de capacidade de hospedagem, perdas, distorção harmônica e estabilidade devem ser interpretados de acordo com as condições específicas de cada investigação.

Diante dessas limitações, estudos futuros poderão avançar por meio de revisões sistemáticas, metanálises, redes de referência e validações em sistemas reais ou plataformas experimentais. Também se mostrou necessário reunir, em uma mesma análise, aspectos de estabilidade, proteção, comunicação, armazenamento, confiabilidade e viabilidade econômica. Esse aprofundamento poderia favorecer critérios mais comparáveis e ampliar a compreensão sobre as condições em que a participação das fontes distribuídas ocorreu sem comprometer a segurança e a qualidade da operação.

REFERÊNCIAS

ALJAFARI, Belqasem *et al.* Optimization of DC, AC, and hybrid AC/DC microgrid-based IoT systems: a review. **Energies**, v. 15, n. 18, art. 6813, 2022. DOI: 10.3390/en15186813. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15186813. Acesso em: 23 jul. 2026.

BARBOSA, Vítor F. *et al.* Análise e desenvolvimento de um retificador híbrido monofásico bidirecional com compensação série no barramento CC para aplicações em microrredes. **Eletrônica de Potência**, v. 25, n. 3, p. 305-315, 2020. DOI: 10.18618/REP.2020.3.0027. Disponível em: https://doi.org/10.18618/REP.2020.3.0027. Acesso em: 23 jul. 2026.

HASSAN, S. Jarjees Ul *et al.* Towards medium voltage hybrid AC/DC distribution systems: architectural topologies, planning and operation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 159, art. 110003, 2024. DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110003. Acesso em: 23 jul. 2026.

HOLLWEG, Guilherme V. *et al.* Inversor Quasi-Z-Source fotovoltaico conectado à rede com filtro LCL utilizando uma estrutura MRAC-SM cascata com modelo reduzido para aplicações em redes fracas. **Eletrônica de Potência**, v. 26, n. 2, p. 205-216, 2021. DOI: 10.18618/REP.2021.2.0069. Disponível em: https://doi.org/10.18618/REP.2021.2.0069. Acesso em: 23 jul. 2026.

JAYARAM, Jayachandran *et al.* Design of decentralized hybrid microgrid integrating multiple renewable energy sources with power quality improvement. **Sustainability**, v. 14, n. 13, art. 7777, 2022. DOI: 10.3390/su14137777. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su14137777. Acesso em: 23 jul. 2026.

LI, Chenghao *et al.* An evaluation method of renewable energy resources' penetration capacity of an AC-DC hybrid grid. **Energies**, v. 15, n. 7, art. 2550, 2022. DOI: 10.3390/en15072550. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15072550. Acesso em: 23 jul. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

LIMA, Ezequiel Junio de; FREITAS, Luiz Carlos Gomes de. Proposta de metodologia híbrida para determinação de capacidade de hospedagem de fontes de geração fotovoltaica em redes de distribuição. **Eletrônica de Potência**, v. 26, n. 1, p. 64-73, 2021. DOI: 10.18618/REP.2021.1.0057. Disponível em: https://doi.org/10.18618/REP.2021.1.0057. Acesso em: 23 jul. 2026.

LIMA, Rodrigo R. *et al.* Modelagem e desenvolvimento de um inversor CSI multistring fotovoltaico de estágio único sem transformador conectado à rede elétrica. **Eletrônica de Potência**, v. 25, n. 1, p. 104-113, 2020. DOI: 10.18618/REP.2020.1.0058. Disponível em: https://doi.org/10.18618/REP.2020.1.0058. Acesso em: 23 jul. 2026.

LOPES FILHO, Gilberto *et al.* Algoritmo de controle de potência reativa para adequação de valores de tensão e redução de perdas em sistemas de distribuição. **Eletrônica de Potência**, v. 26, n. 3, p. 290-301, 2021. DOI: 10.18618/REP.2021.3.0014. Disponível em: https://doi.org/10.18618/REP.2021.3.0014. Acesso em: 23 jul. 2026.

MOURA, Giovana Cristina de; BARBOSA, Carlos Roberto de Almeida Corrêa; ROCHA, Danilo Lisboa Costa da. Revisão narrativa da literatura: guia metodológico com etapas, critérios de qualidade e aplicação. **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, v. 7, n. 7, e778566, 2026. DOI: 10.47820/recima21.v7i7.8566. Disponível em: https://doi.org/10.47820/recima21.v7i7.8566. Acesso em: 9 jul. 2026.

PICCINI, Anderson R. *et al.* Sistema fotovoltaico conectado à rede utilizando regulador automático de tensão com controle modificado projetado para mitigar o afundamento momentâneo de tensão. **Eletrônica de Potência**, v. 27, n. 1, p. 66-77, 2022. DOI: 10.18618/REP.2022.1.0034. Disponível em: https://doi.org/10.18618/REP.2022.1.0034. Acesso em: 23 jul. 2026.

PIRES, Vitor Fernão; PIRES, Armando; CORDEIRO, Armando. DC microgrids: benefits, architectures, perspectives and challenges. **Energies**, v. 16, n. 3, art. 1217, 2023. DOI: 10.3390/en16031217. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en16031217. Acesso em: 23 jul. 2026.

REINALDO, Pierry M.; DUPCZAK, Bruno S.; ARANHA NETO, Edison A. C. Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica na rede de baixa tensão da Celesc. **Eletrônica de Potência**, v. 25, n. 3, p. 316-325, 2020. DOI: 10.18618/REP.2020.3.0013. Disponível em: https://doi.org/10.18618/REP.2020.3.0013. Acesso em: 23 jul. 2026.

REZENDE, Jaqueline O. *et al.* Análise de uma proposta de condicionador de potência na geração fotovoltaica para melhorar a qualidade de energia. **Eletrônica de Potência**, v. 26, n. 3, p. 268-278, 2021. DOI: 10.18618/REP.2021.3.0004. Disponível em: https://doi.org/10.18618/REP.2021.3.0004. Acesso em: 23 jul. 2026.

SARWAR, Sohail *et al.* Major challenges towards energy management and power sharing in a hybrid AC/DC microgrid: a review. **Energies**, v. 15, n. 23, art. 8851, 2022. DOI: 10.3390/en15238851. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15238851. Acesso em: 23 jul. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

SOLANO, Javier; JIMENEZ, Diego; ILINCA, Adrian. A modular simulation testbed for energy management in AC/DC microgrids. **Energies**, v. 13, n. 16, art. 4049, 2020. DOI: 10.3390/en13164049. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en13164049. Acesso em: 23 jul. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.