

ANÁLISE DOS IMPACTOS TÉCNICOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTVOLTAICA EM REDES DE BAIXA TENSÃO

Diego Figueiredo Silva¹
Gelvane Andrade Sena²
Leonardo Tavares Maia³
Mark Vitor Martins Ferreira⁴
Luciano Jorge Menezes⁵

RESUMO: A geração distribuída fotovoltaica tem apresentado crescimento significativo nos últimos anos, impulsionada pela busca por fontes renováveis de energia, pela redução dos custos tecnológicos e pelos incentivos regulatórios implementados no Brasil. Nesse contexto, a inserção de sistemas fotovoltaicos em redes de baixa tensão tem provocado alterações importantes na dinâmica operacional dos sistemas elétricos, exigindo novos estudos sobre seus impactos técnicos. O presente trabalho teve como objetivo analisar os principais impactos técnicos associados à elevada penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes de distribuição de baixa tensão. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de natureza qualitativa e caráter descritivo, realizada a partir da análise de artigos científicos, dissertações, normas técnicas e documentos institucionais publicados entre 2016 e 2026. Os resultados evidenciaram que a inserção massiva de sistemas fotovoltaicos pode provocar sobretensões, inversão do fluxo de potência, alterações nas perdas técnicas, desequilíbrios entre fases e impactos na qualidade da energia elétrica. Além disso, observou-se a necessidade de modernização das redes elétricas, por meio da utilização de tecnologias inteligentes, sistemas de armazenamento de energia e estratégias avançadas de controle operacional. Conclui-se que a expansão da geração distribuída fotovoltaica oferece benefícios ambientais e energéticos relevantes, porém demanda planejamento técnico e investimentos em infraestrutura para garantir a confiabilidade e a eficiência das redes de distribuição.

Palavras-chave: Geração distribuída fotovoltaica. Redes de baixa tensão. Qualidade da energia.

¹ Graduando em Engenharia Elétrica. Técnico em Eletrônica - Centro Universitário UNA.

² Graduando em Engenharia Elétrica. Técnico em Eletrotécnica - Centro Universitário UNA.

³ Graduando em Engenharia Elétrica - Centro Universitário UNA.

⁴ Graduando em Engenharia Elétrica - Centro Universitário UNA.

⁵ Mestre em Engenharia Elétrica. Orientador. Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica - Centro Universitário UNA.

I. INTRODUÇÃO

A crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica em redes de baixa tensão tem causado impacto na dinâmica operacional dos sistemas elétricos. A geração distribuída fotovoltaica tem se consolidado como uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a promoção de fontes renováveis (Rodrigues *et al.*, 2020). Isso se dá porque os sistemas fotovoltaicos são inseridos diretamente nas redes de baixa tensão e instalados em unidades consumidoras modificam a forma tradicional de operação dos sistemas elétricos, que historicamente foram projetados para um fluxo unidirecional de energia (Reinaldo; Dupczak; Aranha Neto, 2020).

Lucchese *et al.* (2018) destacam que o crescimento acelerado da geração distribuída, impulsionado pela redução dos custos tecnológicos e por políticas de incentivo, tem imposto desafios técnicos relevantes para concessionárias e operadores do sistema. Entre os principais aspectos afetados estão os níveis de tensão, o comportamento do fluxo de potência e a qualidade da energia fornecida. À medida que a penetração de sistemas fotovoltaicos aumenta, torna-se mais frequente a ocorrência de fenômenos como sobretensões, especialmente em períodos de baixa demanda e alta geração, além da inversão do fluxo de potência, quando a energia excedente é injetada na rede.

Esse fenômeno tem sido impulsionado por um conjunto de fatores inter-relacionados, como afirma Pereira (2019):

Os sistemas de geração distribuída estão sujeitos a uma mistura diferente de políticas, regulamentos e mercados locais, estaduais e federais, em comparação com a geração centralizada. Com as políticas e incentivos variando amplamente de um lugar para outro, a atratividade financeira de um projeto de geração distribuída acaba variando também (Pereira, p. 23).

Além disso, observa-se que a elevação das perdas técnicas em determinados trechos da rede, dependendo da configuração do sistema e do nível de penetração fotovoltaica, bem como possíveis desequilíbrios de tensão entre fases em sistemas trifásicos também devem ser considerados. Outro aspecto importante refere-se à capacidade de hospedagem da rede (*hosting capacity*), que diz respeito ao limite máximo de geração distribuída que pode ser conectado sem comprometer a segurança, a qualidade e a confiabilidade do sistema elétrico. A ultrapassagem dessa capacidade pode intensificar problemas operacionais e exigir intervenções na infraestrutura da rede (Gomes; Ferreira, 2018).

Sob a perspectiva teórica, a expansão da geração distribuída fotovoltaica implica tanto oportunidades quanto desafios para a operação e o planejamento das redes elétricas. Entre os benefícios frequentemente apontados na literatura, destacam-se a redução das perdas técnicas associadas à transmissão e distribuição, o alívio da demanda em períodos de pico e a diversificação da matriz energética, contribuindo para maior resiliência e sustentabilidade do sistema (Susteras; Susteras, 2022).

Por outro lado, a integração massiva desses sistemas, especialmente em redes de baixa tensão, que possuem, em geral, topologia radial e limitada capacidade de controle, introduz complexidades operacionais que ainda demandam aprofundamento analítico. Aspectos como a ocorrência de sobretensões, a inversão do fluxo de potência e os possíveis desequilíbrios de tensão configuram desafios relevantes, sobretudo em cenários de alta penetração fotovoltaica. Tais impactos decorrem, em grande medida, das características específicas dessas redes, incluindo sua topologia radial e limitada capacidade de controle (Silva, 2025; Corrêa, 2020).

1.1 Problema de pesquisa

Nesse sentido, o problema de pesquisa que orienta este trabalho é: quais são os impactos técnicos da inserção de sistemas de geração distribuída fotovoltaica em redes de baixa tensão? Para responder a essa questão, o objetivo geral consiste em analisar os impactos técnicos associados à alta penetração de sistemas fotovoltaicos em redes de distribuição de baixa tensão.

Como objetivos específicos, pretende-se: (i) identificar os principais fenômenos técnicos decorrentes dessa inserção, como variações de tensão, inversão de fluxo de potência, alterações nas perdas técnicas e limitações da capacidade de hospedagem; (ii) avaliar os efeitos desses fenômenos na qualidade da energia elétrica; e (iii) analisar os impactos na operação e no desempenho das redes de baixa tensão.

1.2 Justificativa

Este trabalho se justifica pela necessidade de aprofundar a compreensão dos impactos técnicos decorrentes da crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica em redes de baixa tensão, especialmente diante do cenário de expansão acelerada dessa tecnologia no Brasil. O avanço da geração distribuída tem sido impulsionado por fatores como a redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, incentivos regulatórios e a busca por maior autonomia energética por parte dos consumidores. Nesse contexto, a atuação da Agência Nacional de Energia Elétrica e a

consolidação do marco legal por meio da Lei nº 14.300/2022 têm contribuído significativamente para a ampliação do número de unidades consumidoras com geração própria, intensificando sua presença nas redes de distribuição.

Do ponto de vista técnico, essa expansão traz consigo uma série de desafios operacionais que justificam a realização de estudos mais aprofundados. A inserção de sistemas fotovoltaicos em redes de baixa tensão pode provocar alterações no perfil de tensão, ocasionando sobretensões em determinados períodos do dia, além de possibilitar a inversão do fluxo de potência e impactos nas perdas técnicas da rede. Ademais, a elevada penetração desses sistemas pode comprometer a capacidade de hospedagem das redes elétricas, exigindo adaptações na infraestrutura e nos sistemas de controle e proteção. Tais aspectos tornam-se ainda mais relevantes considerando que as redes de baixa tensão, em geral, não foram originalmente projetadas para acomodar geração distribuída em larga escala.

Sob a perspectiva acadêmica e profissional, o desenvolvimento deste estudo contribui para o avanço do conhecimento na área de sistemas elétricos de potência, especialmente no que se refere à integração de fontes renováveis em redes de distribuição. A análise dos impactos técnicos da geração distribuída fotovoltaica fornece subsídios importantes para concessionárias, engenheiros e planejadores do setor elétrico, auxiliando na tomada de decisões relacionadas à expansão e à operação das redes. Além disso, o tema possui elevada relevância social e ambiental, uma vez que está diretamente ligado à transição energética e à construção de um sistema elétrico mais sustentável, eficiente e resiliente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Geração distribuída

A geração distribuída (GD) refere-se à produção de energia elétrica próxima ou no próprio local de consumo, conectada, em geral, aos sistemas de distribuição de média e baixa tensão. Diferentemente do modelo tradicional centralizado, no qual grandes usinas geram energia e a transmitem por longas distâncias, a GD promove uma descentralização da produção energética, contribuindo para maior eficiência, redução de perdas elétricas e aumento da flexibilidade operacional do sistema elétrico. Esse modelo descentralizado permite que

consumidores assumam também o papel de produtores de energia, sendo frequentemente denominados “prosumidores” (Rolim *et al.*, 2020).

A GD pode ser classificada em microgeração (até 75 kW) e minigeração (até 5 MW para fontes renováveis), sendo a fonte solar fotovoltaica a mais representativa no cenário atual brasileiro, devido à sua modularidade, facilidade de instalação e redução significativa de custos nos últimos anos. Outras fontes também podem ser utilizadas, como eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas, embora com menor participação na geração distribuída em baixa tensão (Saddy *et al.*, 2023).

No Brasil, a regulamentação da geração distribuída foi impulsionada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), principalmente por meio da Resolução Normativa nº 482/2012, posteriormente atualizada pela Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2012; ANEEL, 2015). Essas normas estabeleceram as condições gerais para o acesso de micro e minigeradores aos sistemas de distribuição, além de instituírem o sistema de compensação de energia elétrica, conhecido como *net metering*, no qual a energia excedente injetada na rede gera créditos para o consumidor (Guimarães, 2020).

Cabe frisar que os sistemas de geração distribuída podem operar de diferentes formas, sendo os sistemas conectados à rede (*on-grid*) os mais comuns. Nesses sistemas, a energia gerada é utilizada prioritariamente para o consumo local, e o excedente é injetado na rede elétrica. Há também sistemas isolados (*off-grid*), utilizados em regiões sem acesso à rede elétrica, e sistemas híbridos, que combinam geração local com armazenamento de energia, geralmente por meio de baterias (Silva; Rodrigues, 2024).

Além dos aspectos tecnológicos e legais, a expansão da geração distribuída está diretamente relacionada a fatores econômicos e ambientais. A redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, aliada ao aumento das tarifas de energia elétrica e à busca por fontes mais sustentáveis, tem impulsionado significativamente sua adoção. Do ponto de vista ambiental, a GD contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética (Soethe; Blanchet, 2020).

Contudo, a penetração da geração distribuída, especialmente em redes de baixa tensão, impõe desafios à operação e ao planejamento do sistema elétrico. A inserção de múltiplas fontes geradoras distribuídas ao longo da rede modifica o comportamento do fluxo de potência,

impacta os níveis de tensão e pode exigir adaptações na infraestrutura existente (Reinaldo; Dupczak; Aranha Neto, 2020).

2.2 Geração fotovoltaica

A geração fotovoltaica corresponde ao processo de conversão direta da energia proveniente da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Esse fenômeno ocorre em materiais semicondutores, principalmente o silício, utilizados nas células fotovoltaicas que compõem os módulos solares. Quando a luz solar incide sobre essas células, os fótons transferem energia aos elétrons do material semicondutor, promovendo a movimentação de cargas elétricas e gerando corrente contínua (Oliveira; Araújo Filho, 2021).

Posteriormente, essa energia é convertida em corrente alternada por meio de inversores, possibilitando sua utilização em residências, comércios, indústrias e integração ao sistema elétrico de distribuição. Nas últimas décadas, a geração fotovoltaica passou a ocupar posição de destaque no cenário energético mundial devido ao crescimento da demanda por fontes renováveis, à redução dos custos tecnológicos e à necessidade de diminuição dos impactos ambientais associados às fontes convencionais de geração de energia (Mallmann; Grigoletto, 2025).

No contexto brasileiro, a geração fotovoltaica apresenta elevado potencial de expansão em razão da abundância de recursos solares disponíveis ao longo de praticamente todo o território nacional. O Brasil possui índices de irradiação solar superiores aos observados em diversos países que já utilizam amplamente essa tecnologia, como Alemanha e Japão (Da Silva *et al.*, 2019). Além disso, a regulamentação da geração distribuída, especialmente a partir da Resolução Normativa nº 1.059/2023 da ANEEL impulsionou a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Esse modelo permite que consumidores também atuem como produtores de energia, tornando-se “prosumidores”, capazes de gerar parte ou a totalidade da energia consumida em suas unidades consumidoras (ANEEL, 2023).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em sistemas isolados e sistemas conectados à rede elétrica. Os sistemas isolados, também chamados de *off-grid*, operam independentemente da rede de distribuição e normalmente utilizam bancos de baterias para armazenamento de energia, sendo empregados em regiões remotas ou locais sem acesso ao sistema elétrico convencional (Cordeiro; Couceiro, 2024). Já os sistemas conectados à rede, conhecidos como *on-grid*, são os mais utilizados na geração distribuída urbana, pois permitem a

injeção do excedente de energia produzida diretamente na rede elétrica de baixa tensão. Nessa configuração, a energia gerada durante períodos de alta incidência solar pode suprir parte das cargas locais e o excedente é compensado posteriormente por meio do sistema de créditos energéticos (Rodrigues; Minotti; Florian, 2022).

Petry, Ramos e Costa (2020) discorrem sobre como a expansão da geração fotovoltaica distribuída traz diversos benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Entre os principais benefícios destacam-se a redução das emissões de gases de efeito estufa, a diminuição das perdas elétricas associadas à transmissão de energia em longas distâncias, a diversificação da matriz energética e a possibilidade de adiamento de investimentos em expansão da infraestrutura elétrica. Ademais, a geração próxima ao ponto de consumo contribui para maior eficiência energética e pode auxiliar na redução da demanda nos horários de maior carregamento do sistema elétrico. Outro aspecto relevante refere-se ao desenvolvimento econômico proporcionado pela cadeia produtiva do setor fotovoltaico, envolvendo fabricação, instalação, operação e manutenção dos sistemas (Nascimento Neto, 2019).

Entretanto, apesar das inúmeras vantagens, a elevada penetração da geração fotovoltaica em redes de baixa tensão também provoca desafios técnicos importantes para as concessionárias e operadores do sistema elétrico. Como a geração solar depende diretamente das condições climáticas e da disponibilidade de radiação solar, sua produção apresenta caráter intermitente e variável ao longo do dia. Essa variabilidade pode ocasionar flutuações de tensão, alterações no perfil de carregamento dos alimentadores e impactos na qualidade da energia elétrica. Em redes originalmente projetadas para operação com fluxo unidirecional de potência, a inserção massiva de geração distribuída pode causar inversão de fluxo de potência, sobretensões em determinados pontos da rede e desequilíbrios entre fases, especialmente em sistemas de baixa tensão com elevada concentração de unidades consumidoras fotovoltaicas (Paulista; Machado; Rangel, 2017).

2.3 Redes de distribuição de baixa tensão

As redes de distribuição de baixa tensão constituem a etapa final do sistema elétrico de potência, sendo responsáveis por realizar o fornecimento de energia elétrica diretamente aos consumidores residenciais, comerciais e parte dos consumidores industriais de pequeno porte. Essas redes operam, normalmente, em níveis de tensão inferiores a 1 kV, sendo no Brasil predominantes os sistemas em 127/220 V ou 220/380 V, dependendo da configuração adotada

pela concessionária local (Couto, 2018). Sua principal função é transportar a energia proveniente das subestações de distribuição até os pontos de consumo de maneira segura, eficiente e contínua. As redes de baixa tensão desempenham papel fundamental no funcionamento das cidades e no desenvolvimento socioeconômico, uma vez que praticamente todas as atividades modernas dependem do fornecimento confiável de energia elétrica (Hernandes, 2024).

Tradicionalmente, as redes de baixa tensão foram projetadas para operar com fluxo unidirecional de potência, ou seja, a energia elétrica percorre o caminho desde as usinas geradoras, passando pelos sistemas de transmissão e distribuição, até chegar aos consumidores finais (Andrade *et al.*, 2023). Dessa forma, o planejamento das redes era realizado com base em previsões de demanda elétrica, crescimento populacional e expansão urbana, buscando garantir níveis adequados de tensão, carregamento dos condutores e confiabilidade do sistema. A topologia radial é a mais utilizada nas redes de distribuição de baixa tensão devido à sua simplicidade operacional, facilidade de proteção e menor custo de implantação. Nesse modelo, cada consumidor é alimentado por um único caminho elétrico proveniente do transformador de distribuição (Barbosa; Amorim, 2025).

Os principais componentes das redes de baixa tensão incluem transformadores de distribuição, postes, condutores elétricos, dispositivos de proteção, medidores de energia e ramais de ligação (Fontineles; Leite, 2024). Os transformadores são responsáveis pela redução da tensão proveniente da média tensão para níveis adequados ao consumo final. Os condutores realizam o transporte da energia ao longo dos alimentadores e ramificações da rede, enquanto os dispositivos de proteção, como fusíveis e disjuntores, atuam na prevenção de danos causados por sobrecorrentes e curtos-circuitos. Além disso, os sistemas de medição permitem o monitoramento do consumo energético dos usuários, sendo fundamentais para o faturamento e controle operacional das concessionárias (Ravaglio *et al.*, 2017).

Com o avanço tecnológico e a crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica, as redes de baixa tensão passaram por transformações operacionais consideráveis. Os consumidores deixaram de atuar apenas como cargas passivas e passaram também a injetar energia elétrica na rede, tornando-se agentes ativos do sistema elétrico. Essa mudança alterou significativamente o comportamento das redes de distribuição, que passaram a operar, em determinados momentos, com fluxo bidirecional de potência. Durante períodos de elevada geração solar e baixo consumo local, o excedente de energia produzido pelos sistemas

fotovoltaicos pode ser injetado na rede elétrica, ocasionando fluxo reverso de potência em direção aos transformadores de distribuição (Carlette, 2019).

Nesse contexto, torna-se indispensável o desenvolvimento de estudos técnicos voltados à análise do comportamento das redes de baixa tensão diante da crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica. O planejamento adequado dessas redes exige a utilização de ferramentas computacionais de simulação, monitoramento em tempo real e estratégias avançadas de controle operacional. Tecnologias como redes inteligentes (*smart grids*), sistemas de armazenamento de energia, controle de potência reativa e modernização dos dispositivos de proteção vêm sendo amplamente estudadas como alternativas para minimizar os impactos técnicos associados à geração distribuída (Lima *et al.*, 2021).

2.4 Impactos técnicos da geração distribuída fotovoltaica

A crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica nas redes elétricas de baixa tensão representa uma das maiores transformações ocorridas no setor elétrico nas últimas décadas. Esse avanço está associado à busca por fontes renováveis de energia, à redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos e aos incentivos regulatórios que permitiram a expansão da micro e minigeração distribuída. Embora a geração fotovoltaica proporcione benefícios ambientais, econômicos e operacionais, sua integração em larga escala às redes de distribuição também provoca diversos impactos técnicos que desafiam os modelos tradicionais de planejamento, operação e proteção dos sistemas elétricos (Araújo, 2024).

Um dos principais impactos técnicos da geração distribuída fotovoltaica está relacionado à variação dos níveis de tensão ao longo da rede de distribuição. Durante períodos de elevada incidência solar e baixo consumo local, os sistemas fotovoltaicos podem injetar grandes quantidades de potência ativa na rede, elevando os níveis de tensão em determinados pontos do alimentador. Quando os níveis de tensão ultrapassam os limites estabelecidos pelos órgãos reguladores, podem ocorrer danos a equipamentos elétricos, redução da vida útil de aparelhos eletrônicos e problemas no funcionamento de cargas sensíveis. Além disso, a rápida variação das condições climáticas, como passagem de nuvens, pode provocar oscilações bruscas de geração, resultando em flutuações de tensão perceptíveis na rede elétrica (Lucchese *et al.*, 2018).

Outro impacto relevante refere-se à ocorrência do fluxo reverso de potência. Em sistemas convencionais de distribuição, a energia elétrica flui das subestações em direção aos consumidores finais. Contudo, quando a geração fotovoltaica supera o consumo instantâneo da

unidade consumidora, o excedente energético é injetado na rede, alterando o sentido natural do fluxo de potência. Esse fluxo reverso pode provocar sobrecarga em transformadores, alterações nos níveis de tensão e dificuldades operacionais para as concessionárias. Além disso, muitos equipamentos das redes de distribuição foram dimensionados considerando apenas o fluxo unidirecional, tornando necessária a revisão dos critérios de planejamento e operação do sistema elétrico diante da elevada penetração da geração distribuída (Oliveira; Leite, 2025).

Reinaldo, Dupczak e Aranha Neto (2020), as perdas técnicas também sofrem influência da inserção da geração distribuída fotovoltaica. Em determinados cenários, a geração próxima ao ponto de consumo contribui para a redução das perdas elétricas, uma vez que diminui a necessidade de transporte de energia por longas distâncias. Contudo, quando há excesso de geração e ocorrência de fluxo reverso de potência, as perdas podem aumentar em determinados trechos da rede devido à circulação adicional de corrente elétrica. Dessa forma, o impacto da geração fotovoltaica sobre as perdas técnicas depende diretamente do nível de penetração da tecnologia, da localização das unidades geradoras e do perfil de consumo dos usuários conectados ao sistema.

A coordenação dos sistemas de proteção representa outro desafio técnico importante associado à geração distribuída fotovoltaica. Conforme Torres (2025), as redes de baixa tensão foram projetadas considerando níveis específicos de corrente de curto-circuito e direcionalidade do fluxo de potência. A presença de múltiplas fontes geradoras distribuídas pode alterar esses parâmetros, afetando a atuação de dispositivos de proteção como fusíveis, religadores e disjuntores. Em algumas situações, podem ocorrer falhas na seletividade da proteção, dificultando o isolamento adequado de defeitos na rede elétrica. Além disso, inversores fotovoltaicos modernos possuem sistemas eletrônicos de controle que podem modificar o comportamento dinâmico da rede durante situações de falta, tornando os estudos de proteção mais complexos e exigindo adaptações nos esquemas tradicionais utilizados pelas concessionárias (Bampi, 2023).

A qualidade da energia elétrica também pode ser impactada pela elevada penetração de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Os inversores utilizados na conversão da corrente contínua gerada pelos módulos solares em corrente alternada podem introduzir distorções harmônicas no sistema elétrico. As harmônicas são componentes de frequência múltiplas da frequência fundamental da rede e podem causar aquecimento excessivo em equipamentos, aumento das perdas elétricas, interferências em sistemas de comunicação e mau funcionamento

de dispositivos eletrônicos sensíveis. Embora os inversores modernos possuam tecnologias avançadas de filtragem e controle, a elevada concentração de unidades fotovoltaicas em uma mesma região pode contribuir para o aumento dos níveis de distorção harmônica total na rede de baixa tensão (Souza, 2016).

Shayani e Oliveira (2018) ressaltam que, para além dos impactos relacionados à tensão, proteção e qualidade da energia, a intermitência da geração fotovoltaica constitui um fator de grande relevância técnica. A potência gerada pelos sistemas solares depende diretamente das condições climáticas e da disponibilidade de radiação solar, apresentando variações constantes ao longo do dia. Isso se dá porque mudanças repentinas nas condições meteorológicas podem provocar rápidas reduções ou aumentos na geração de energia, exigindo maior flexibilidade operacional do sistema elétrico. Essa variabilidade pode afetar o equilíbrio entre geração e consumo, especialmente em redes com elevada participação de geração distribuída fotovoltaica, tornando necessária a utilização de sistemas avançados de monitoramento, automação e controle (Lucchese *et al.*, 2018).

Portanto, os impactos técnicos da geração distribuída fotovoltaica representam um dos principais temas de estudo no contexto atual do setor elétrico. Embora essa tecnologia ofereça benefícios significativos relacionados à sustentabilidade, eficiência energética e redução das emissões de gases poluentes, sua integração em larga escala exige adaptações estruturais e operacionais nas redes de distribuição de baixa tensão. Por conseguinte, compreender os efeitos da geração distribuída sobre os parâmetros elétricos da rede é essencial para garantir a confiabilidade, segurança e qualidade do fornecimento de energia elétrica, além de possibilitar a expansão sustentável das fontes renováveis no sistema elétrico brasileiro (Urbanetz Júnior *et al.*, 2016).

METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, de caráter descritivo, desenvolvida por meio de uma revisão narrativa da literatura. Segundo Gil (2008), a pesquisa descritiva tem como principal objetivo descrever as características de determinado fenômeno ou estabelecer relações entre variáveis, permitindo a compreensão detalhada de aspectos técnicos e operacionais relacionados ao objeto investigado. Nesse contexto, a pesquisa busca descrever e analisar os impactos técnicos decorrentes da inserção da geração distribuída

fotovoltaica em redes de baixa tensão, com enfoque nos fenômenos associados à elevada penetração desses sistemas.

A opção pela revisão narrativa justifica-se pela necessidade de reunir, interpretar e discutir diferentes contribuições teóricas e técnicas já produzidas sobre o tema, possibilitando uma compreensão ampla e integrada dos principais impactos da geração distribuída fotovoltaica nos sistemas elétricos. Conforme Rother (2007), a revisão narrativa permite ao pesquisador discutir o estado da arte de determinado assunto a partir da análise crítica de estudos previamente publicados, favorecendo a construção de uma abordagem contextualizada e interpretativa acerca do fenômeno estudado.

Para a realização da pesquisa, foram consultadas produções científicas nacionais e internacionais disponíveis em bases de dados acadêmicas e bibliográficas, tais como Google Acadêmico, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Periódicos CAPES, e ScienceDirect. Também foram utilizados documentos técnicos e normativos elaborados por instituições do setor elétrico, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Ministério de Minas e Energia (MME) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), devido à relevância dessas instituições para a regulamentação e acompanhamento da expansão da geração distribuída no Brasil.

12

A seleção dos materiais considerou publicações relacionadas à geração distribuída fotovoltaica, redes de distribuição de baixa tensão, qualidade da energia elétrica, fluxo de potência, capacidade de hospedagem (*hosting capacity*), perdas técnicas e impactos operacionais associados à inserção de sistemas fotovoltaicos. Foram priorizados artigos científicos, dissertações, teses, livros, normas técnicas e relatórios publicados preferencialmente nos últimos anos, considerando a constante evolução tecnológica e regulatória do setor elétrico.

A coleta de dados bibliográficos foi realizada por meio da utilização de palavras-chave relacionadas ao tema, em português e inglês, tais como: “geração distribuída fotovoltaica”, “redes de baixa tensão”, “impactos técnicos”, “qualidade da energia”, “fluxo reverso de potência” e “*hosting capacity*”. Após a identificação dos materiais, procedeu-se à leitura exploratória, seletiva e analítica das publicações, buscando identificar os principais fenômenos técnicos discutidos na literatura e suas implicações para a operação das redes elétricas.

Os critérios de inclusão desta revisão foram definidos com o objetivo de garantir a seleção de estudos alinhados ao tema e com maior rigor metodológico. Foram incluídos artigos científicos completos, disponíveis na íntegra de forma gratuita em bases de dados online,

publicados em língua portuguesa, e com recorte temporal de até 10 anos (2016 a 2026), considerando a atualidade das discussões sobre geração distribuída fotovoltaica e seus impactos técnicos em redes de baixa tensão.

Já no que tange os critérios de exclusão, foram desconsiderados estudos indisponíveis gratuitamente, publicações duplicadas, artigos fora do recorte temporal estabelecido, textos não disponíveis em língua portuguesa, além de materiais como resumos simples, editoriais, opiniões e trabalhos que não apresentassem relação direta com os impactos técnicos da geração distribuída fotovoltaica no sistema elétrico de distribuição.

A análise dos dados ocorreu de forma descritiva e interpretativa, fundamentando-se na comparação e discussão dos resultados apresentados pelos autores selecionados. Dessa maneira, buscou-se compreender como a elevada penetração da geração distribuída fotovoltaica influencia parâmetros técnicos das redes de baixa tensão, tais como níveis de tensão, perdas elétricas, inversão de fluxo de potência, desequilíbrio entre fases e limitações da capacidade de hospedagem. Além disso, foram analisadas as possíveis consequências desses fenômenos para a qualidade da energia e para a confiabilidade operacional dos sistemas de distribuição.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise das produções científicas selecionadas permitiu identificar que a crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica em redes de baixa tensão tem provocado mudanças significativas no comportamento operacional dos sistemas elétricos. Os estudos revisados convergem ao apontar que, embora a geração distribuída apresente benefícios relacionados à sustentabilidade energética, à redução das emissões de gases poluentes e à diminuição das perdas associadas à transmissão em longas distâncias, sua elevada penetração também impõe desafios técnicos relevantes às concessionárias e aos operadores do sistema elétrico (Torres; Pinho; Zilles, 2024; Carolino, 2023).

Entre os impactos mais recorrentes identificados na literatura destaca-se a alteração dos níveis de tensão nas redes de baixa tensão. Conforme observado por Lucchese *et al.* (2018) e Reinaldo, Dupczak e Aranha Neto (2020), a elevada geração de potência ativa pelos sistemas fotovoltaicos, especialmente em períodos de baixa demanda e alta incidência solar, pode ocasionar sobretensões em determinados pontos do alimentador. Esse comportamento ocorre porque as redes de distribuição convencionais foram originalmente projetadas para operar com fluxo unidirecional de potência, partindo das subestações em direção às cargas consumidoras.

Assim, quando há excedente de geração, a energia passa a ser injetada na rede, alterando significativamente o perfil de tensão do sistema.

Os resultados encontrados também evidenciam que a inversão do fluxo de potência constitui um dos principais desafios técnicos associados à expansão da geração distribuída fotovoltaica. Segundo Oliveira e Leite (2025), esse fenômeno ocorre quando a energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos supera o consumo instantâneo das unidades consumidoras, fazendo com que o excedente energético seja direcionado da rede de baixa tensão para os transformadores de distribuição. A literatura demonstra que esse comportamento pode provocar sobrecarga em equipamentos elétricos, alterações operacionais e dificuldades na coordenação dos sistemas de proteção, exigindo adaptações nos critérios tradicionais de planejamento das redes elétricas (Gomes, 2024; Santos, 2023).

Outro aspecto amplamente discutido pelos autores refere-se às perdas técnicas do sistema. Os estudos analisados indicam que a geração distribuída pode tanto reduzir quanto aumentar as perdas elétricas, dependendo das características da rede e do nível de penetração fotovoltaica. Em cenários moderados, a geração próxima ao ponto de consumo contribui para a redução da circulação de corrente nos alimentadores, diminuindo perdas por efeito Joule (Bortoluzzi *et al.*, 2025). Entretanto, em situações de elevada penetração e ocorrência de fluxo reverso de potência, pode haver aumento das perdas em determinados trechos da rede devido à circulação adicional de corrente elétrica, conforme destacado por Reinaldo, Dupczak e Aranha Neto (2020).

A qualidade da energia elétrica também aparece como um dos parâmetros mais impactados pela inserção massiva da geração distribuída fotovoltaica. Souza (2016) aponta que os inversores utilizados nos sistemas fotovoltaicos podem introduzir distorções harmônicas na rede elétrica, afetando o desempenho de equipamentos eletrônicos e aumentando o aquecimento em condutores e transformadores. Embora os inversores modernos possuam tecnologias de filtragem mais avançadas, a elevada concentração de unidades fotovoltaicas em determinadas regiões pode elevar os índices de distorção harmônica total, comprometendo a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Além disso, a literatura evidencia que a intermitência característica da geração solar representa um fator de elevada relevância operacional. Shayani e Oliveira (2018) frisam que a dependência das condições climáticas faz com que a geração fotovoltaica apresente variações constantes ao longo do dia. Mudanças repentinas na radiação solar, provocadas pela passagem

de nuvens, por exemplo, podem ocasionar rápidas oscilações na potência gerada, exigindo maior flexibilidade operacional das redes de distribuição. Nesse contexto, diversos autores defendem a necessidade de adoção de tecnologias inteligentes de monitoramento e controle, como *smart grids*, sistemas de armazenamento de energia e inversores inteligentes, capazes de auxiliar na estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico (Lima *et al.*, 2021).

A literatura também evidencia que a expansão da geração distribuída fotovoltaica está diretamente associada ao conceito de redes elétricas inteligentes, conhecidas como *smart grids*. Consoante a Paixão e Abaide (2025), a modernização das redes de distribuição representa uma das principais estratégias para mitigar os impactos técnicos decorrentes da elevada penetração de fontes renováveis intermitentes. As *smart grids* possibilitam maior capacidade de monitoramento em tempo real, integração de sistemas automatizados de controle e comunicação bidirecional entre consumidores e concessionárias. Dessa forma, torna-se possível otimizar a operação da rede, identificar falhas com maior rapidez e gerenciar de forma mais eficiente a inserção da geração distribuída (Gallotti, 2021).

Outro resultado relevante identificado na revisão diz respeito à capacidade de hospedagem das redes elétricas. Gomes e Ferreira (2018) ressaltam que as redes de baixa tensão possuem limites operacionais para conexão de geração distribuída sem comprometimento da qualidade da energia e da segurança operacional. A ultrapassagem dessa capacidade pode intensificar problemas relacionados a sobretensões, desequilíbrios de tensão e sobrecarga de equipamentos. Dessa forma, os estudos analisados apontam a necessidade de realização de análises técnicas prévias para avaliar a capacidade das redes em acomodar novos sistemas fotovoltaicos, evitando impactos negativos ao desempenho do sistema elétrico (Djamboladjian, 2022; Seruca, 2019).

Os resultados obtidos também demonstram que a expansão da geração distribuída fotovoltaica exige transformações estruturais e tecnológicas nas redes de distribuição. Braga (2025) e Torres, Pinho e Zilles (2024) ressaltam a necessidade de modernização da infraestrutura elétrica, incluindo sistemas avançados de automação, proteção adaptativa, monitoramento em tempo real e utilização de dispositivos capazes de controlar potência ativa e reativa. Nesse sentido, verifica-se que a integração sustentável da geração distribuída depende não apenas da ampliação da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos, mas também da evolução tecnológica das redes elétricas e dos mecanismos regulatórios que orientam sua operação.

Adicionalmente, os estudos analisados demonstram que os impactos da geração distribuída fotovoltaica não se limitam apenas às alterações elétricas convencionais, mas também influenciam diretamente os processos de planejamento e expansão das redes de distribuição. Segundo Müller (2019), o crescimento acelerado da micro e minigeração distribuída exige que as concessionárias passem a incorporar novos modelos de análise preditiva e ferramentas computacionais capazes de simular cenários futuros de carregamento e inserção de geração. Isso ocorre porque os métodos tradicionais de planejamento das redes foram desenvolvidos considerando consumidores passivos, sem prever a presença de múltiplas unidades geradoras distribuídas ao longo do sistema.

Nesse contexto, verifica-se que o comportamento dinâmico das redes de baixa tensão tornou-se significativamente mais complexo. Em horários de elevada incidência solar, determinados alimentadores podem operar com níveis reduzidos de carregamento provenientes da subestação, enquanto outros apresentam circulação reversa de potência. Tal situação exige maior flexibilidade operacional por parte das distribuidoras, especialmente no gerenciamento dos níveis de tensão e no controle da estabilidade do sistema. Conforme traz Queiroz *et al.* (2020), redes com alta penetração fotovoltaica tendem a apresentar maior sensibilidade às variações de carga e geração, tornando indispensável o uso de sistemas inteligentes de supervisão e automação.

Outro ponto identificado na literatura refere-se à necessidade de atualização dos equipamentos utilizados nos sistemas de proteção elétrica. Em redes convencionais, os dispositivos de proteção foram dimensionados considerando correntes de curto-circuito provenientes exclusivamente do sistema de distribuição centralizado. Entretanto, a presença da geração distribuída altera a magnitude e a direção dessas correntes, podendo comprometer a seletividade e a coordenação da proteção elétrica. Segundo Faria (2025), a atuação inadequada de dispositivos como religadores, fusíveis e disjuntores pode dificultar o isolamento de faltas, aumentando o tempo de interrupção do fornecimento de energia e comprometendo a confiabilidade operacional da rede.

Ademais, diversos autores apontam que os sistemas fotovoltaicos conectados em redes trifásicas podem contribuir para o agravamento de desequilíbrios de tensão entre fases (Marchán *et al.*, 2025; Piccini, 2022; Pechincha *et al.*, 2016). Isso ocorre principalmente quando a conexão das unidades consumidoras é realizada de maneira desigual ao longo das fases da rede. Conforme evidenciado por Rocha (2025), a distribuição inadequada das cargas e da geração pode

provocar assimetrias elétricas, elevando perdas técnicas e reduzindo a eficiência operacional do sistema. Em situações extremas, esses desequilíbrios podem afetar o desempenho de motores elétricos, equipamentos industriais e dispositivos eletrônicos sensíveis.

Outro aspecto importante observado nos estudos refere-se ao papel do armazenamento de energia como alternativa para minimizar os impactos operacionais da geração fotovoltaica. Sistemas de armazenamento por baterias têm sido apontados como soluções promissoras para reduzir oscilações de tensão, absorver excedentes de geração e diminuir os efeitos da intermitência solar. De acordo com Buiatti *et al.* (2023), o armazenamento energético pode contribuir para o aumento da capacidade de hospedagem das redes elétricas, além de proporcionar maior estabilidade operacional e flexibilidade energética ao sistema de distribuição.

No âmbito regulatório, os resultados da revisão indicam que a expansão da geração distribuída exige constante atualização das normas técnicas e dos mecanismos de compensação energética. A evolução do setor elétrico brasileiro, especialmente após a consolidação do marco legal da geração distribuída, tem impulsionado discussões relacionadas à sustentabilidade econômica do sistema de compensação e à necessidade de equilíbrio entre consumidores geradores e concessionárias (Shayani; Oliveira, 2018). Conforme apontam Silva *et al.* (2020), o crescimento expressivo da geração distribuída demanda modelos regulatórios capazes de garantir segurança jurídica, eficiência operacional e sustentabilidade financeira para todos os agentes envolvidos no setor elétrico.

17

Outro elemento amplamente discutido nos estudos analisados refere-se aos impactos econômicos indiretos da elevada penetração fotovoltaica sobre as distribuidoras de energia elétrica. Embora a geração distribuída contribua para redução da demanda energética proveniente das redes convencionais, sua expansão também pode provocar redução da arrecadação tarifária das concessionárias, especialmente em regiões com elevada adesão à microgeração. Segundo Hernandez (2024), esse cenário pode gerar desafios relacionados à recuperação dos custos operacionais e de manutenção da infraestrutura elétrica, exigindo novos modelos tarifários e estratégias de adaptação regulatória.

De modo geral, os estudos analisados evidenciam que os impactos técnicos da geração distribuída fotovoltaica estão diretamente relacionados ao nível de penetração dos sistemas, à configuração das redes de baixa tensão e às condições operacionais locais. Embora os benefícios ambientais e energéticos da geração fotovoltaica sejam amplamente reconhecidos, a literatura

demonstra que sua expansão deve ocorrer de forma planejada e acompanhada por investimentos em infraestrutura, controle operacional e atualização tecnológica das redes de distribuição. Dessa maneira, torna-se possível promover a integração das fontes renováveis de forma segura, eficiente e compatível com os requisitos de qualidade e confiabilidade do sistema elétrico (Bampi, 2023).

4. CONCLUSÕES

A crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica em redes de baixa tensão representa uma das principais transformações observadas no setor elétrico contemporâneo, especialmente diante da busca por fontes renováveis, da diversificação da matriz energética e da ampliação da sustentabilidade no fornecimento de energia elétrica. A partir da revisão narrativa realizada, foi possível compreender que a expansão da geração fotovoltaica distribuída proporciona benefícios significativos, como a redução das perdas associadas à transmissão de energia, o aproveitamento de recursos renováveis, a diminuição das emissões de gases poluentes e a maior participação dos consumidores na produção energética.

Entretanto, os resultados obtidos demonstraram que a elevada penetração desses sistemas também provoca impactos técnicos relevantes nas redes de baixa tensão. Entre os principais fenômenos identificados destacam-se as variações dos níveis de tensão, a ocorrência de sobretensões, a inversão do fluxo de potência, as alterações nas perdas técnicas, os desequilíbrios entre fases e os impactos na coordenação dos sistemas de proteção. Além disso, verificou-se que a intermitência característica da geração solar pode influenciar diretamente a estabilidade operacional das redes elétricas, exigindo maior flexibilidade, monitoramento e capacidade de controle por parte das concessionárias.

A análise da literatura evidenciou ainda que os impactos da geração distribuída variam conforme fatores como nível de penetração fotovoltaica, características da rede elétrica, perfil de consumo das cargas e localização das unidades geradoras. Dessa forma, torna-se indispensável o desenvolvimento de estudos técnicos específicos para avaliação da capacidade de hospedagem das redes de distribuição, bem como a adoção de estratégias de planejamento e modernização da infraestrutura elétrica.

Nesse contexto, observou-se que tecnologias como smart grids, sistemas de armazenamento de energia, automação das redes e inversores inteligentes apresentam grande potencial para minimizar os impactos operacionais associados à geração distribuída

fotovoltaica. Paralelamente, destaca-se a importância da atualização das normas regulatórias e dos mecanismos de compensação energética, de modo a garantir segurança operacional, qualidade da energia e sustentabilidade econômica para todos os agentes envolvidos no setor elétrico.

Conclui-se, portanto, que a geração distribuída fotovoltaica possui papel fundamental na transição energética e na construção de um sistema elétrico mais sustentável e resiliente. Contudo, sua expansão deve ocorrer de maneira planejada, acompanhada de investimentos em infraestrutura, inovação tecnológica e aperfeiçoamento regulatório. Assim, será possível conciliar os benefícios ambientais e econômicos da energia solar com a manutenção da confiabilidade, eficiência e qualidade das redes de distribuição de baixa tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=342518>. Acesso em: 27 abr. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília, DF, 2015. Disponível em:

https://download.aldo.com.br/energy/RESOLUCAO_NORMATIVA_REN%20687_2015.pdf. Acesso em: 27 abr. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, e dá outras providências. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/aneel/resolucao-normativa-n-1059-2023-aprimora-as-regras-para-a-conexao-e-o-faturamento-de-centrais-de-microgeracao-e-minigeracao-distribuida-em-sistemas-de-distribuicao-de-energia-eletrica-bem-como-as-regras-do-sistema-de-compensacao-de-energia-eletrica-altera-as-resolucoes-normativas-no-920-de-23-de-fevereiro-de-2021-956-de-7-de-dezembro-de-2021-1-000-de-7-de-dezembro-de-2021-e-da-outras-providencias?origin=instituicao>. Acesso em: 12 mai. 2026.

ANDRADE, José *et al.* Avaliação dos Impactos Técnicos da Microgeração Desequilibrada em Sistemas de Distribuição de Baixa Tensão. **XV Brazilian Conference on Quality of Power (CBQEE)**, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10503893>. Acesso em: 12 mai. 2026.

ARAÚJO, Douglas Lemos. **Análise do impacto nas redes elétricas de distribuição com o aumento da geração distribuída fotovoltaica: estudo de caso modelado no OPENDSS**. 2025. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/80455>. Acesso em: 17 abr. 2026.

BARBOSA, L. H. S.; AMORIM, J. J. Reguladores de Tensão, Perdas em Sistemas de Distribuição e Projeto de Redes de Distribuição de Energia. **COGNITIONIS Scientific Journal**, v. 8, n. 1, 2025. Disponível em: <https://revista.cognitioniss.org/index.php/cogn/article/view/588>. Acesso em: 12 mai. 2026.

BORTOLUZZI, Adilson *et al.* Estudo de perdas pelo efeito joule em instalações elétricas residenciais. **Caderno de Resumos da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia**, v. 9, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/snctifsc/article/view/4195>. Acesso em: 26 mai. 2026.

BRAGA, Isaac Gabriel. **Estudo de adequação e modernização da rede de distribuição em média tensão no campus Poeta Torquato Neto da Universidade Estadual do Piauí (UESPI): análise técnica e normativa de projetos executados e em andamento**. 2025. 57 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual do Piauí, Teresina, 2025. Disponível em: <https://sistemas2.uespi.br/handle/tede/3052>. Acesso em: 26 mai. 2026.

BUIATTI, Vinicius Martins *et al.* Análise Técnica do Emprego de Armazenadores de Energia em Circuitos de Baixa Tensão para Realização de Serviço Ancilar de Regulação de Tensão. **XV Brazilian Conference on Quality of Power (CBQEE)**, 2023. p. 1-8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10503825>. Acesso em: 26 mai. 2026.

20

CARLETTE, Luan Peterle. **Análise do impacto de inversores inteligentes aplicados a redes de baixa tensão**. 2019. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/23154>. Acesso em: 12 mai. 2026.

CAROLINO, Elisangela Ferruci. **Energia e Sustentabilidade: desafios e soluções**. Ponta Grossa: Aya Editora, 2023.

CORDEIRO, Nicolás Duarte; COUCEIRO, Marcio Akira. Sistema fotovoltaico no brasil e em roraima e as diferenças entre os sistemas on grid e off grid. **Revista de Administração de Roraima-RARR**, v. 15, n. 1, p. 6, 2024. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10189501>. Acesso em: 12 mai. 2026.

CORRÊA, Camila Schuck. **Análise do Impacto da Geração Distribuída Fotovoltaica em Sistemas de Distribuição Utilizando Múltiplos Cenários de Geração com Discretização Intra-horária**. 2020. 74 f. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.psr-inc.com/wp-content/uploads/2025/08/Correa-Analise-do-Impacto-da-Geracao-Distribuida-Fotovoltaic.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2026.

COUTO, R. L. **Projeto de dispositivo para monitoramento da corrente em redes de distribuição de baixa tensão**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia

Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/47729>. Acesso em: 12 mai. 2026.

DJAMBOLAKDJIAN, Gustavo Scherer. **Análise dos impactos técnicos da geração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica de baixa tensão**. 2022. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Graduação em Engenharia de Gestão de Energia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/239994>. Acesso em: 26 mai. 2026.

FARIA, Filipe Segurado de. **Alocação ótima de dispositivos de proteção em rede de distribuição considerando a incerteza das cargas elétricas**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Goiás, Jataí, 2025. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/239994>. Acesso em: 26 mai. 2026.

FONTINELES, L. G.; LEITE, F. de A. As redes compactas de baixa tensão: oportunidades e desafios da implementação em áreas urbanas. **International Contemporary Management Review**, v. 5, n. 3, p. e145, 2024. Disponível em: <https://www.icmreview.com/icmr/article/view/145>. Acesso em: 12 mai. 2026.

GALLIOTTI, Verônica Dias Moreira. Intelligent electric power networks (Smart Grids). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/18322>. Acesso em: 26 mai. 2026.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, Carlos Augusto M.; FERREIRA, Hugo P. Hosting capacity evaluation of distributed generation systems with genetic algorithm. **Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, 2018. p. 1-6. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/73>. Acesso em: 28 abr. 2026.

GOMES, Edmila de Macêdo. **Alternativas para melhoria do nível de tensão em redes de distribuição de baixa tensão**. 2024. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/3924>. Acesso em: 26 mai. 2026.

GUIMARÃES, Rodrigo Domingos. **A geração distribuída no Brasil e seus impactos sobre o setor de distribuição**. 2020. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) - Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/14801>. Acesso em: 28 abr. 2026.

HERNANDES, Leonardo. **Custos de reforços de redes de distribuição de baixa tensão na presença de microgeração distribuída**. 2024. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=584962&tipoMidia=o>. Acesso em: 12 mai. 2026.

LIMA, Daniel Victor Teixeira *et al.* Otimização de Redes de Comunicação de Dados como Suporte à Implantação de Smart Grids. **Sociedade Brasileira de Computação**, 2020. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/semish/article/view/11330>. Acesso em: 12 mai. 2026.

LUCCHESI, F. C. *et al.* Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica na rede elétrica da Universidade Federal de Santa Maria. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/73>. Acesso em: 17 abr. 2026.

MALLMANN, Junior F.; GRIGOLETTO, Felipe B. Conversor estático híbrido para sistemas de geração solar fotovoltaica com armazenamento de energia. **Eletrônica de Potência**, v. 30, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.18618/REP.e202545>. Acesso em: 12 mai. 2026.

MARCHÁN, Patricio G. *et al.* Cálculo de Envolventes Operacionais Dinâmicas para uma Rede Trifásica Desequilibrada com Sistemas Fotovoltaicos e Estações de Recarga de Veículos Elétricos. **16th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, p. 557-563, 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11241759>. Acesso em: 26 mai. 2026.

MÜLLER, L. M. **Impactos da conexão de microgeração fotovoltaica em redes de distribuição de baixa tensão**. 2019. (Monografia) – Curso de Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/211407>. Acesso em: 26 mai. 2026.

NASCIMENTO NETO, Manoel. **Eficiência energética e geração fotovoltaica distribuída no extremo norte brasileiro**. 2019. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/1147ec7f-8411-47b8-be37-4811b438e817>. Acesso em: 12 mai. 2026.

OLIVEIRA, Esdras Alex Freire de; ARAÚJO FILHO, José Gonçalves de. Perspectivas da geração e aplicação da energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão da literatura (2015-2019). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 5, p. 435-450, 2021. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/5472>. Acesso em: 12 mai. 2026.

OLIVEIRA, Kadimiel Silva Antunes de; LEITE, Fábio de Araújo. Inversão do fluxo de potência decorrente da expansão da geração distribuída no Brasil: potencial de aplicação dos transformadores de estado sólido. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 11, n. 11, p. 7745-7765, 2025. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/22837>. Acesso em: 12 mai. 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. Redes elétricas inteligentes – *smart grids*. **Aurum Editora**, p. 25-35, 2025. Disponível em: <https://aurumpublicacoes.com/index.php/editora/article/view/486>. Acesso em: 26 mai. 2026.

PAULISTA, C. R.; MACHADO, T. S.; RANGEL, J. J. de A. Analysis on the photovoltaic electricity generation expansion and carbon dioxide emissions. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 3, n. 1, p. 12-25, 2017. Disponível em: <https://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaodesenvolvimento/article/view/e208>. Acesso em: 12 mai. 2026.

PECHINCHA, B. R. *et al.* Inversores trifásicos baseados em controladores ressonantes adaptativos para compensação de correntes harmônicas em sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 1, p. 66-73, 2017. Disponível em:

<https://rbens.org.br/rbens/article/view/148>. Acesso em: 26 mai. 2026.

PEREIRA, Narlon Xavier. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/4fe4407b-16a3-4f5a-9eff-49fafc1d4db8>. Acesso em: 17 abr. 2026.

PETRY, Paola Mercadante; RAMOS, Karina Ninni; COSTA, Hirdan Katarina de Medeiros. A expansão da energia solar fotovoltaica no brasil e o desenvolvimento local: uma proposição de abordagem. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 22-43, 2020. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/download/9151/5057. Acesso em: 12 mai. 2026.

PICCINI, Anderson Rodrigo. **Sistema fotovoltaico conectado à rede trifásica com controle das potências ativa e reativa para mitigar o afundamento momentâneo de tensão**. 2022. 118 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/34289>. Acesso em: 26 mai. 2026.

QUEIROZ, Luann Georgy Oliveira *et al.* Variação de tensão em rede de distribuição de energia elétrica com alta penetração de geração distribuída fotovoltaica. **Anais do Congresso Brasileiro de Automática**, 2020. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/125577296/919-libre.pdf?1764500068=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DVariacao_de_Tensao_em_Rede_de_Distribuic.pdf&Expires=1779842841&Signature=HbZIGWu-qxobuMBwd657OWI6yfaoZL6kPiO6oKze3bo5lnMVtfDUKoM7XcsPUmyYOFVTHE~8ooltvVusUDnq8lraux29eLLyypLANwhouDuRXnTWQAnXYsMpXziR9-oISWkOzvO7mQc8likOxD3qNtC-UF-qQo-UJnS5VBv8wKj-evksrjQlk15V4heAjwCCzsSXp-S9gjKMdupvTn74qyPHdKUN-ToTWY36mt8Rnkx7FJuoOC2mveNbNwTFKyZU9ZW4Q~JZCeBSWxxZbV4Ku9hN2CEtpteusjz5rNem6k-c2CLtHXXIClgX1W5Zs3dzvfJLDoaAqczu45T-NrHUYg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 26 mai. 2026.

RAVAGLIO, M. A. *et al.* Equipamento Automático para Proteção e Monitoração da Baixa Tensão de Transformadores de Distribuição Convencionais. data indefinida. **Citene!l**, v. 12, p. 4, 2017. Disponível em: <https://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20090108101956-51.pdf>. Acesso em: 12 mai. 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. Disponível em: <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/316>. Acesso em: 17 abr. 2026.

ROCHA, Gustavo Silva. **Impacto de geração distribuída desequilibrada nos índices de desequilíbrio de tensão de sistemas de distribuição**. Orientador: Diogo Soares Resende. 2025. 91 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, Itumbiara, 2025.

Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/2236>. Acesso em: 26 mai. 2026.

RODRIGUES, André Campos *et al.* O crescimento da geração distribuída fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. *Revista Mythos*, v. 12, n. 1, p. 87–99, 2021. Disponível em: <https://www.periodicos.unis.edu.br/mythos/article/view/461>. Acesso em: 17 abr. 2026.

RODRIGUES, Gabriel Ferreira; MINOTTI, Cristiano; FLORIAN, Fabiana. Energia fotovoltaica-aplicação sistema on grid em residência. *RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar*, v. 3, n. 1, 2022. Disponível em: <https://recima21.com.br/recima21/article/view/2434>. Acesso em: 12 mai. 2026.

ROLIM, Luiz AG *et al.* Marketplace descentralizado para a Geração Distribuída-estrutura, governança e contribuições para o debate regulatório. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 2, 2020. Disponível em: <https://elibrary.ru/item.asp?id=75406674>. Acesso em: 27 abr. 2026.

ROTHER, Edna Terezinha. Revisão sistemática X revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem, São Paulo*, v. 20, n. 2, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ape/a/z7zZ4Z4GwYV6FR7S9FHTByr/?lang=es>. Acesso em: 19 mai. 2026.

SADDY, André *et al.* (Orgs.). **Energia solar e geração distribuída: microgeração e minigeração.** Rio de Janeiro: CEEJ, 2023.

SANTOS, Luciano Júlio dos. **Monitoramento do desequilíbrio de tensão e da corrente reversa na rede de distribuição de baixa tensão: uma proposta de sistema computacional que utiliza a infraestrutura de iluminação pública.** 2023. 164 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Programa de Pós-Graduação em Informática, Instituto de Computação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/11923>. Acesso em: 26 mai. 2026.

SERUCA, Gonçalo Pacheco Campos. **Identificação e análise, técnica e de mercado, de dispositivos e soluções tecnológicas para automação da Rede de Baixa Tensão da EDP Distribuição.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Instituto Politécnico do Porto, Portugal, 2019. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/6c2304d8fa4bd51f9a10e036fbb206d9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 26 mai. 2026.

SHAYANI, R. A.; DE OLIVEIRA, M. A. G. Análise probabilística da necessidade de reforço de rede de distribuição para conexão de geração distribuída fotovoltaica. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/79>. Acesso em: 12 mai. 2026.

SILVA, E. M.; RODRIGUES, C. E. M. Integração On-Grid e Off-Grid de Microrredes Utilizando OpenDSS e Python. *XV Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission*, 2024. Disponível em: <https://clagtee.fi.mdp.edu.ar/full-papers-search-engine/papers/IDo46.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2026.

SILVA, Fernando Rodrigues da; SILVA, Orlando Roque da; LIMA, Fonttamara Leite; BASTOS, Wellington Fernando. Difusão da inovação tecnológica: um estudo sobre a difusão

da energia elétrica fotovoltaica no Brasil. **Revista Tecnologia**, v. 40, n. 2, 2019. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/9810>. Acesso em: 12 mai. 2026.

SILVA, Larissa Correia da *et al.* Crescimento da geração distribuída no Brasil e correlação entre os estados. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 10, n. 3, p. 143–158, 2020. Disponível em: <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/2373>. Acesso em: 26 mai. 2026.

SILVA, Talles Henrique Calixto. **Impactos da geração distribuída fotovoltaica na tensão e qualidade da energia em redes de distribuição: uma análise via simulink**. 2025. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2025. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/7880>. Acesso em: 17 abr. 2026.

SOETHE, Ghabriel Campigotto; BLANCHET, Luiz Alberto. Geração distribuída e desenvolvimento sustentável. **Revista de Direito Administrativo & Constitucional**, v. 20, n. 79, p. 233–257, 2020. Disponível em: <https://revistaaec.com/index.php/revistaaec/article/view/1221>. Acesso em: 28 abr. 2026.

SOUZA, Arthur Costa de. **Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica**. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14619>. Acesso em: 12 mai. 2026.

SUSTERAS, Guilherme; SUSTERAS, Alexandra Januário. Cálculo dos benefícios energéticos da geração distribuída solar fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energia**, v. 28, n. 1, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Guilherme-Susteras/publication/359656893_Calculo_dos_beneficios_energeticos_da_geracao_distribuida_solar_fotovoltaica/links/6384cd1b7boe356feb92c3f9/Calculo-dos-beneficios-energeticos-da-geracao-distribuida-solar-fotovoltaica.pdf. Acesso em: 17 abr. 2026.

TORRES, Arthur da Silva. **Análise comparativa da implementação de geração distribuída fotovoltaica utilizando o OpenDSS aplicado à proteção adaptativa de relés**. 2025. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/82767>. Acesso em: 12 mai. 2026.

TORRES, P. F.; PINHO, J. T.; ZILLES, R. Microrredes não isoladas em baixa tensão no Brasil: potencial de integração para melhoria de indicadores de continuidade. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, 2024. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2427>. Acesso em: 26 mai. 2026.