

## INVERSÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA DECORRENTE DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL: POTENCIAL DE APLICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE ESTADO SÓLIDO

POWER FLOW REVERSAL RESULTING FROM THE EXPANSION OF DISTRIBUTED GENERATION IN BRAZIL: POTENTIAL APPLICATION OF SOLID-STATE TRANSFORMERS

INVERSIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA RESULTANTE DE LA EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN BRASIL: APLICACIÓN POTENCIAL DE TRANSFORMADORES DE ESTADO SÓLIDO

Kadimiel Silva Antunes de Oliveira<sup>1</sup>

Fábio de Araújo Leite<sup>2</sup>

**RESUMO:** A expansão acelerada da geração distribuída (GD), especialmente por meio de sistemas fotovoltaicos, tem provocado a inversão do fluxo de potência em diversos trechos das redes de distribuição brasileiras, fenômeno para o qual a infraestrutura elétrica tradicional não foi projetada. Tal cenário gera problemas técnicos e operacionais, como variações de tensão, sobrecargas, perdas adicionais e degradação da qualidade da energia, afetando tanto concessionárias quanto consumidores. O objetivo deste estudo foi analisar, por meio de uma revisão da literatura, os impactos decorrentes da inversão do fluxo de potência e avaliar o potencial de aplicação dos transformadores de estado sólido (SST) como solução tecnológica para mitigação desses efeitos. A metodologia consistiu na seleção e análise de artigos publicados entre 2011 e 2025, incluindo estudos de Moraes (2020), Godoi (2018), Rodrigues et al. (2016) e Pontes (2024). Os resultados evidenciam que as medidas atualmente adotadas pelas concessionárias são paliativas e, em alguns casos, restringem a produção de energia renovável. Conclui-se que os SST possuem elevada aplicabilidade e viabilidade técnica para corrigir problemas associados à inversão do fluxo de potência e à qualidade da energia, apresentando-se como alternativa promissora à substituição de transformadores convencionais em cenários de alta penetração de GD.

7745

**Palavras-Chave:** Geração Distribuída. Inversão Do Fluxo De Potência. Qualidade Da Energia Elétrica. Transformador De Estado Sólido. Sistemas Fotovoltaicos.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Santo Agostinho – UNIFSA.

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Ceará – UFC.

**ABSTRACT:** The rapid expansion of distributed generation (DG), especially through photovoltaic systems, has caused power flow reversal in several sections of Brazilian distribution networks, a phenomenon for which traditional electrical infrastructure was not designed. This scenario creates technical and operational problems, such as voltage variations, overloads, additional losses, and degradation of power quality, affecting both utilities and consumers. The objective of this study was to analyze, through a literature review, the impacts resulting from power flow reversal and to evaluate the potential application of solid-state transformers (SSTs) as a technological solution to mitigate these effects. The methodology consisted of selecting and analyzing articles published between 2011 and 2025, including studies by Moraes (2020), Godoi (2018), Rodrigues et al. (2016), and Pontes (2024). The results show that the measures currently adopted by utilities are palliative and, in some cases, restrict renewable energy production. It is concluded that SSTs have high applicability and technical feasibility to correct problems associated with power flow reversal and power quality, presenting themselves as a promising alternative to replacing conventional transformers in scenarios of high DG penetration.

**Keywords:** Distributed Generation. Power Flow Reversal. Power Quality. Solid-State Transformer. Photovoltaic Systems.

**RESUMEN:** La rápida expansión de la generación distribuida (GD), especialmente a través de sistemas fotovoltaicos, ha provocado la inversión del flujo de energía en varios tramos de las redes de distribución brasileñas, un fenómeno para el que la infraestructura eléctrica tradicional no fue diseñada. Esta situación genera problemas técnicos y operativos, como variaciones de tensión, sobrecargas, pérdidas adicionales y degradación de la calidad de la energía, lo que afecta tanto a las concesionarias como a los consumidores. El objetivo de este estudio fue analizar, mediante una revisión de la literatura, los impactos derivados de la inversión del flujo de potencia y evaluar el potencial de aplicación de los transformadores de estado sólido (SST) como solución tecnológica para mitigar estos efectos. La metodología consistió en la selección y análisis de artículos publicados entre 2011 y 2025, incluyendo estudios de Moraes (2020), Godoi (2018), Rodrigues et al. (2016) y Pontes (2024). Los resultados evidencian que las medidas adoptadas actualmente por las concesionarias son paliativas y, en algunos casos, restringen la producción de energía renovable. Se concluye que los SST tienen una alta aplicabilidad y viabilidad técnica para corregir los problemas asociados a la inversión del flujo de potencia y a la calidad de la energía, presentándose como una alternativa prometedora para sustituir los transformadores convencionales en escenarios de alta penetración de GD.

7746

**Palabras clave:** Generación Distribuída. Inversión Del Flujo De Potencia. Calidad De La Energía Eléctrica. Transformador De Estado Sólido. Sistemas Fotovoltaicos.

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas de geração de energia elétrica com pouco impacto ao meio ambiente sempre foi um desafio, gerando fortes discussões sobre a utilização de fontes limpas e renováveis para minimizar as consequências de fontes poluidoras (Oliveira, 2011). Tratando-se de energias renováveis, o Brasil oferece condições ideais, especialmente na produção de

energia solar fotovoltaica, devido aos altos índices de irradiação solar em seu território (Pereira, 2019).

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL colocou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, permitindo que consumidores pudessem gerar sua própria energia por meio de fontes renováveis e até injetar o excedente dessa produção na rede de distribuição, realizando a compensação do consumo de energia da rede por meio do Sistema de Compensação de Energia Elétrica - SCEE, surgindo assim a Microgeração e a Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica - MMGD (ANEEL, 2025).

Em 2023, a agência realizou atualizações na norma por meio da Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, instituindo o marco legal da microgeração e minigeração distribuída e estabelecendo mudanças de caráter técnico e financeiro, além de alterar formas de faturamento, limites de potência para micro e minigeração e modalidades de participação no SCEE (ANEEL, 2025).

Entre os anos de 2012 até 2024, houve uma massiva conexão de sistemas de micro e minigeração conectados à rede, provocando algumas consequências prejudiciais, como a inversão do fluxo de potência em áreas com maior número de sistemas de MMGD. Segundo Neiva e colaboradores (2020), conforme o nível de penetração de Geração Distribuída – GD, conectada ao secundário aumenta, a possibilidade de inversão no sentido do fluxo de potência nos transformadores de distribuição também cresce.

Em virtude disso, em 2024 a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 1.098/2024 e promoveu novas alterações na Resolução Normativa nº 1.000/2021, direcionadas às concessionárias, com o objetivo de normatizar estudos e propor soluções para mitigar os efeitos da inversão do fluxo de potência (ANEEL, 2021, 2024).

Diante deste cenário, este artigo tem como propósito investigar a inversão do fluxo de potência ocasionada pela expansão da geração distribuída, buscando analisar os principais aspectos técnicos, coletar e analisar dados, a fim de constatar se há viabilidade na utilização do Transformador de Estado Sólido como uma solução em potencial para conter a inversão do fluxo de potência, comparando-o com outras soluções e procedimentos já aplicados.

## 2. Referencial Teórico

Este capítulo tem como objetivo fundamentar a pesquisa por meio da revisão de conceitos essenciais à compreensão do funcionamento da geração distribuída, de seus principais aspectos técnicos e do impacto que esse modelo exerce sobre a rede elétrica, especialmente no

que se refere à inversão do fluxo de potência. Com base na análise de artigos científicos, normas técnicas e dados setoriais, busca-se construir uma base teórica que possibilite a identificação das causas da inversão de fluxo e a apresentação de soluções eficazes para sua mitigação, bem como das estratégias atualmente implementadas.

## 2.1 Geração distribuída e os impactos na rede de distribuição

O fornecimento de energia elétrica, com qualidade e segurança, é de suma importância para o desenvolvimento socioeconômico de uma sociedade. Considerado um serviço essencial, necessita de constantes melhorias, principalmente em sua distribuição. A expansão da geração de energia por meio dos próprios consumidores, a Geração Distribuída, vem causando impactos no sistema de distribuição e tem sido alvo de debates, pesquisas e estudos, tendo como finalidade principal aproveitar essa expansão para beneficiar o sistema e mitigar seus impactos negativos (Neiva, 2020).

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL define geração distribuída como fontes de energia elétrica de determinadas potências conectadas à rede de distribuição por meio de unidades consumidoras que, após a conexão e a injeção de energia na rede, passam a ser caracterizadas como unidades geradoras. Essas unidades são classificadas em dois grupos: microgeração distribuída, correspondente às instalações com potência nominal de até 75 quilovolt-ampere – kVA, e minigeração distribuída, referente às unidades com potência nominal superior a 75 quilovolt-ampere – kVA (ANEEL, 2012). Em funcionamento conectado à rede, essas unidades geradoras, em sua grande maioria de energia solar fotovoltaica, provocam impactos negativos, sobretudo na qualidade do fornecimento. Os principais impactos observados são a inversão do fluxo de potência, as oscilações nos níveis de tensão, o aumento na taxa de distorção harmônica e as variações nos níveis de curto-circuito ao longo da rede (Neiva, 2020).

À medida que a GD se expande, os desafios para o setor elétrico e para as concessionárias de energia aumentam proporcionalmente. Ainda que as principais fontes da GD sejam renováveis e sustentáveis, como a eólica e a solar, há dificuldades no escoamento dessa energia limpa através da rede elétrica, principalmente pela alta penetração, que acaba ocasionando uma oferta maior do que a demanda de energia em determinadas áreas. Esse cenário pode ser compreendido por meio da análise da matriz energética brasileira, conforme demonstrado na Figura 1, em que a energia solar corresponde a 17,0% e a energia eólica a 12,9% da matriz, sendo superadas apenas pelas hidrelétricas, com 48,7% (ABSOLAR; ANEEL, 2024). Nota-se um

aumento significativo em comparação com a matriz energética de 2021, quando as hidrelétricas representavam 60%, contra 1,7% da energia solar e 9,8% da eólica (ABSOLAR, 2024).

Figura 1. Matriz Energética Brasileira



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2024.

Com o crescimento expressivo da GD no país, especialmente após a publicação da Resolução Normativa nº 482 (ANEEL, 2012), conhecida como GD 1, consumidores passaram a gerar sua própria energia e fornecer excedentes à rede elétrica por meio do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. No entanto, com o crescimento exponencial da GD, a ANEEL reconheceu a necessidade de ajustes nos critérios de conexão e faturamento, publicando a Resolução Normativa nº 1.059 (ANEEL, 2023), conhecida como GD 2, que regulamentou a Lei Federal nº 14.300/2022 e promoveu mudanças relevantes na forma de faturamento dos clientes com novas instalações ou ampliações de mini e microgeração (Andrade, 2019).

A ascensão da GD forçou as concessionárias de energia elétrica a adotarem medidas para acompanhar essa evolução, como atualizações, melhorias e investimentos, visando atender à demanda da GD e cumprir os critérios estabelecidos pela ANEEL por meio do Programa de Desenvolvimento da Transmissão de Energia Elétrica – PRODIST, que estabelece normas e processos para a expansão e operação do sistema de transmissão com foco em confiabilidade, segurança, eficiência e qualidade na entrega da energia ao consumidor final (Santos, 2023).

Em meados de 2023, observou-se uma desaceleração da GD, atribuída à nova forma de faturamento e à constatação, pelas distribuidoras, da chamada inversão do fluxo de potência. Isso levou a ANEEL a atualizar a Resolução nº 1.059, substituindo-a pela Resolução Normativa nº 1.000, com diretrizes para as distribuidoras diante da expansão e do aumento da potência instalada da mini e microgeração distribuída. Segundo pesquisa da Greener, a “alegação de inversão do fluxo de potência” foi um dos principais obstáculos enfrentados por integradores de energia solar nas tratativas com as distribuidoras, o que acabou desacelerando o avanço das fontes renováveis (Pontes *et al.*, 2024).

## 2.2 Inversão do fluxo de potência

O fluxo de potência convencional ocorre de forma unidirecional na rede de distribuição de energia elétrica, partindo das subestações e seguindo até as unidades consumidoras. A inversão desse fluxo está diretamente relacionada à elevada concentração de energia injetada na rede por meio da geração distribuída. Tal fenômeno ocorre quando a energia produzida pelos sistemas de geração distribuída supera a demanda dos usuários conectados à mesma rede, ocasionando um excedente de energia na rede de baixa tensão. Isso porque a demanda que antes era suprida pelo transformador passa a ser atendida pela geração distribuída, que, em determinados momentos ao longo do dia, produz mais energia do que o necessário para o consumo local (Godoi, 2018). 7750

A partir dessa produção excedente, ocorre o fluxo reverso, no qual os transformadores passam a exportar energia para outras áreas de transformação, alcançando outros transformadores por meio da rede de média tensão. Esse processo pode levar tanto o transformador quanto o sistema elétrico a operar em sobrecarga, uma vez que tanto na baixa quanto na média tensão há mais energia do que os transformadores e o sistema têm capacidade para distribuir, devido a produção de energia ser maior que a demanda de carga. Esse fluxo de potência reverso ocorre inicialmente nos transformadores, podendo alcançar o alimentador (Godoi, 2018).

Na baixa tensão, quando os transformadores já não possuem capacidade para escoar o excedente de energia para a média tensão, podem-se desencadear uma série de problemas na rede. Entre os principais, destacam-se a sobrecarga nos condutores, as variações nos níveis de tensão, e em casos mais extremos, até a interrupção no fornecimento (Junior *et al.*, 2020).

As oscilações nos níveis de tensão afetam diretamente a qualidade da energia utilizada pelos consumidores, uma vez que, quando esses níveis se encontram fora dos parâmetros



estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica, por meio do PRODIST – Módulo 8, podem ocasionar danos a aparelhos, equipamentos, eletrodomésticos e às instalações elétricas internas das unidades consumidoras (Silva, 2023).

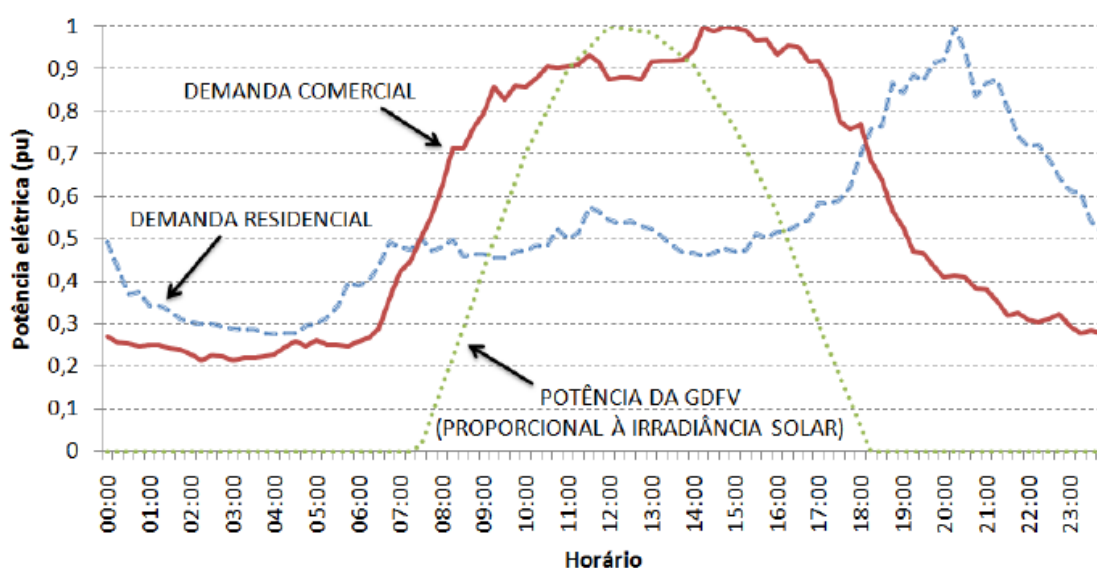
### 2.2.1 Análise do fluxo reverso na rede elétrica com unidades consumidoras/geradores residenciais e comerciais

Shayani (2010) realizou uma análise do funcionamento de uma rede elétrica que alimentava consumidores residenciais e comerciais, comparando suas curvas de demanda de carga com a potência de Geração Distribuída Fotovoltaica - GDFV, avaliando cenários nos quais esses consumidores não injetavam e injetavam energia na rede. Verificou-se que os consumidores residenciais, no período entre 9h e 16h, e os comerciais, entre 11h e 14h, injetavam mais energia na rede do que consumiam, sendo a potência fornecida por essas unidades superior à potência demandada (Shayani 2010).

Na primeira análise, em um cenário sem a injeção de energia na rede, conforme ilustrado na Figura 2, foram consideradas as curvas de carga característica de cada unidade consumidora, residencial e comercial. Tanto na primeira quanto na segunda análise, foram atribuídas uma irradiação solar e uma demanda máxima de 1 (pu), sendo a potência da geração fotovoltaica proporcional ao nível de irradiação solar (Shayani, 2010).

7751

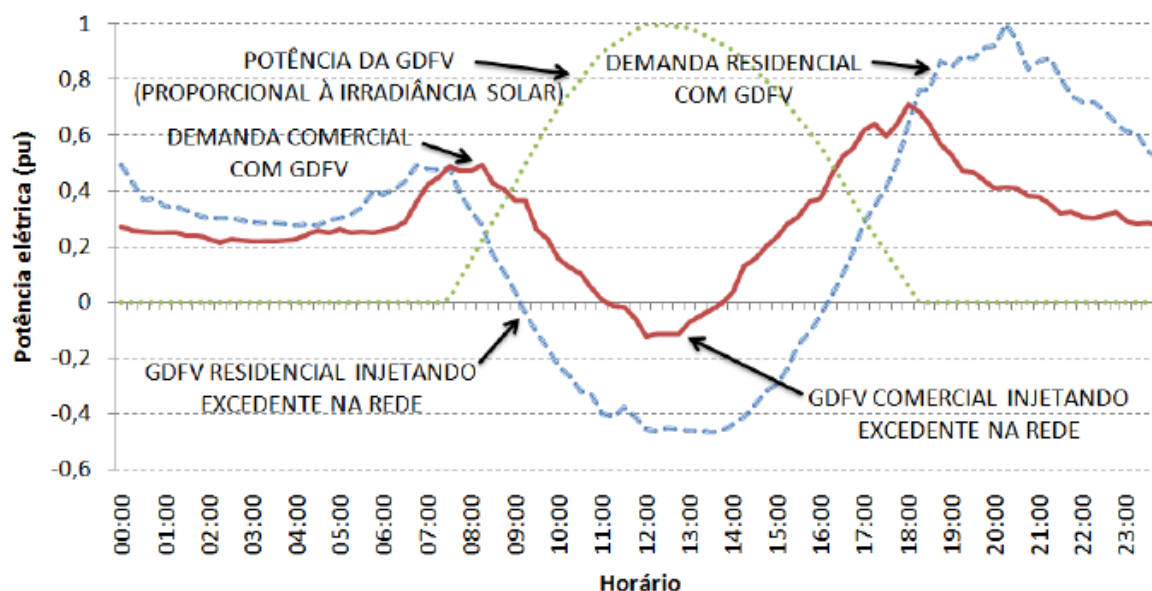
Figura 2. Demanda Residencial, Comercial e Geração Fotovoltaica Sem Injeção de Energia na Rede



Fonte: Shayani, 2010.

Observou-se, então, que, nos horários de geração, a potência — ou, de forma equivalente, a energia gerada — pelos sistemas instalados em unidades consumidoras residenciais era superior à potência demandada da rede. Já em consumidores comerciais, notou-se que a curva de consumo, isto é, a potência demandada, acompanhava, em determinados horários do dia, a curva da potência de geração fotovoltaica. Essas curvas apresentavam comportamento proporcional, de modo que a potência elétrica demandada da rede pela unidade era semelhante à potência fornecida pelo sistema fotovoltaico, o que favorecia o autoconsumo, ou seja, a utilização da energia gerada pelo sistema fotovoltaico em vez da energia proveniente da rede elétrica (Shayani, 2010).

Figura 3. Demanda Residencial, Comercial e Geração Fotovoltaica Com Injeção de Energia na Rede



Fonte: Shayani, 2010.

Na segunda análise, considerando o cenário com injeção de energia na rede elétrica por meio da GDFV, observou-se, conforme ilustrado na Figura 3, que a potência gerada e injetada na rede levou as curvas de demanda das unidades consumidoras a valores negativos, indicando que a energia produzida superava a energia solicitada da rede, tanto em consumidores residenciais quanto comerciais (Shayani, 2010).

Esse resultado demonstrou que a utilização da GDFV provocava a ocorrência do fluxo reverso, o qual somente se estabilizava entre 14h e 16h. Nesse intervalo, a potência de geração diminuía e o consumo de energia da rede aumentava, uma vez que, por volta das 14h, os estabelecimentos comerciais retomavam suas atividades após o horário de almoço e, às 16h, a irradiação solar reduzia (Shayani, 2010).



Além disso, constatou-se que o fluxo reverso era ainda mais acentuado em unidades residenciais, nas quais praticamente não havia consumo durante o período de maior geração. Isso resultava em uma demanda ainda mais negativa e em um excedente superior de energia injetada na rede, intensificando o fluxo reverso a níveis potencialmente prejudiciais ao sistema elétrico, sobretudo em regiões com elevada concentração de consumidores estritamente residenciais (Shayani, 2010).

### 2.3 Soluções para mitigação da inversão do fluxo de potência

As medidas atualmente adotadas para mitigar a inversão do fluxo de potência baseiam-se em procedimentos administrativos e operacionais, que incluem desde a não autorização para conexão e injeção de energia na rede até a aplicação de restrições e limites à potência injetada pela geração distribuída fotovoltaica. A Resolução Normativa nº 1.000/2021 da ANEEL define as diretrizes para a atuação das concessionárias, bem como as alternativas que devem ser apresentadas ao consumidor quando se identifica que a conexão de uma unidade geradora poderá provocar a inversão do fluxo em determinado trecho da rede elétrica (Pontes, 2024).

A ANEEL estabelece que, inicialmente, a distribuidora de energia responsável pelo ponto de conexão solicitado deve realizar estudos que comprovem se a nova conexão, ou o aumento da potência injetada por uma conexão existente, implicará na inversão do fluxo de potência no posto de transformação (transformador) ou no disjuntor do alimentador. Além de identificar a possibilidade de inversão, a distribuidora também deve elaborar estudos para avaliar quais medidas são tecnicamente viáveis para mitigar esse efeito, dentre as quais se incluem:

- I – Reconfiguração dos circuitos e remanejamento da carga;
- II – Definição de outro circuito elétrico para conexão da geração distribuída;
- III – Conexão em nível de tensão superior ao disposto no inciso I do capítulo do art.23;
- IV – Redução da potência injetável de forma permanente;
- V – Redução da potência injetável em dias e horários pré-estabelecidos ou de forma dinâmica (Aneel, 2023).

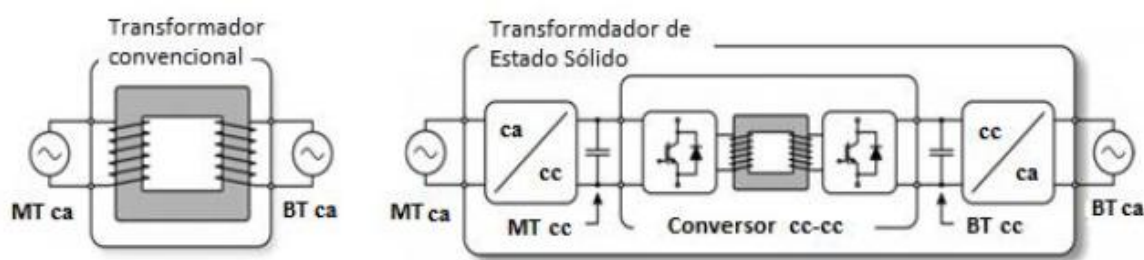
Algumas dessas medidas mostram-se tecnicamente viáveis, como o remanejamento de cargas e a redivisão de circuitos com o acréscimo de novos transformadores pela concessionária, sendo soluções eficazes principalmente em áreas com pré-existência da inversão. Outras alternativas que podem ser adotadas incluem a conexão da unidade geradora em média tensão ou até mesmo a redução da potência injetada na rede. Entretanto, essas medidas podem

desestimular o consumidor ou até mesmo levar à desistência do projeto, por não se mostrarem financeiramente viáveis, dependendo da modalidade de geração do cliente, do valor do investimento necessário e do retorno econômico esperado (Pontes, 2024).

### 2.3.1 Transformador de estado sólido

A utilização de transformadores não convencionais nos sistemas de distribuição pode se tornar uma alternativa viável para limitar essa bidirecionalidade no fluxo de potência. Entre essas alternativas, destacam-se os transformadores de estado sólido, denominados na literatura por *Solid State Transformer* – SST, que operam, basicamente, como conversores CA-CA (corrente alternada/corrente alternada), podendo ser utilizados na rede de distribuição, rebaixando a tensão de média para baixa (Rodrigues *et al.*, 2016).

Figura 4. Estrutura Simplificada do Transformador Convencional e do SST de Três Estágios



7754

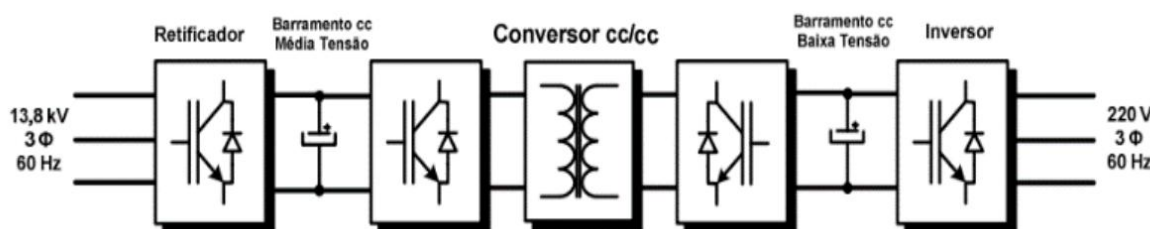
Fonte: Godoi, 2018.

Os SST, como o modelo de três estágios ilustrado na Figura 4, são os mais indicados e estudados para aplicação na rede de distribuição de energia elétrica e apresentam uma estrutura significativamente mais complexa do que os transformadores convencionais de distribuição, ilustrados também na Figura 2 (Godoi, 2018). De modo geral, os SST são classificados em quatro categorias: estágio único, sem barramento CC; dois estágios com barramento CC no lado de baixa tensão; dois estágios com barramento CC no lado de média tensão; e três estágios, que possuem barramento CC tanto no lado de média quanto no lado de baixa tensão do transformador (Falcones, 2012).

Com o modelo de três estágios o SST é capaz de gerenciar e interagir com os sistemas de geração distribuída, controlando o fluxo de potência de forma dinâmica conforme as fontes de energia e as cargas, por meio do controle individual de tensão ou de corrente em cada fase. Essa configuração permite manter a qualidade do fornecimento de energia proveniente de ambas as fontes, seja a geração centralizada ou distribuída (Godoi, 2018).

Esses estágios de conversão são constituídos por um conversor CA-CC (corrente alternada para corrente contínua) na entrada (localizado no primário do transformador), que atua como retificador; um barramento intermediário CC (corrente contínua) de média tensão; um conversor CC-CC isolado, acoplado a um transformador de alta frequência para isolamento galvânico e adequação de níveis de tensão; um barramento CC-CC de baixa tensão; e, por fim, um inversor CC-CA na saída (no secundário do transformador), responsável por alimentar a rede de baixa tensão, conforme ilustrado na Figura 5 (Rodrigues *et al.*, 2016).

Figura 5. Etapas de Conversão do SST de Três Estágios



Fonte: Rodrigues *et al.*, 2016

No primeiro estágio da conversão, o retificador conectado à rede de média tensão tem a função de converter a corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC), alimentando o barramento CC de média tensão. Em situações de fluxo bidirecional de potência, originado pela geração distribuída, esse conversor deve operar de forma reversa, atuando como inversor e permitindo que a energia em corrente contínua do barramento CC seja convertida novamente para CA e devolvida à rede (Godoi, 2018).

Após a retificação, ocorre o segundo estágio, denominado etapa de isolamento, no qual ocorre a transformação de média para baixa tensão, que consiste em três fases: conversão CC-CA na entrada; transformador de alta frequência no centro, para garantir o isolamento elétrico entre a entrada e a saída e possibilitar a interação entre a corrente e a tensão de entrada e a corrente e a tensão de saída; e um conversor CA-CC na saída. (Godoi, 2018). Esta etapa resume-se em um conversor CC/CC responsável por rebaixar a tensão (Rodrigues *et al.*, 2016).

O último estágio é realizado por meio de um inversor CC/CA, que inverte a saída da etapa de isolamento de CC para CA, recebendo a corrente em baixa tensão CC e convertendo-a para CA, formato de corrente que é utilizado nas unidades consumidoras (Godoi, 2018).

Na entrada do SST, os conversores são responsáveis pelo controle tanto da tensão quanto da corrente. De acordo com Rodrigues *et al.* (2016), o ângulo de defasagem da corrente de entrada em relação à tensão da rede deve ser ajustado para permitir a absorção ou a injeção

de potência reativa. Já o controle da potência ativa de referência é realizado pelo controlador do barramento CC, que, além de regular a tensão nesse barramento, deve ajustar a potência ativa a ser injetada ou absorvida pelo sistema (Rodrigues *et al.*, 2016).

Entre as possíveis vantagens da adoção desse tipo de transformador como alternativa para lidar com a inversão de fluxo de potência, destacam-se: a compensação de afundamentos e elevações de tensão; a proteção contra curtos-circuitos, com limitação da corrente de falta por meio de controle eletrônico; a correção do fator de potência, em função do controle da fase da corrente de entrada; e a própria capacidade de operar com fluxo de potência bidirecional (Rodrigues *et al.*, 2016). As desvantagens do SST estão mais relacionadas ao custo superior, à menor eficiência e à maior complexidade na sua funcionalidade em relação aos transformadores convencionais (De Moraes, 2020).

Entretanto, a utilização de transformadores de estado sólido na rede de distribuição de energia elétrica, substituindo os transformadores eletromagnéticos convencionais, surge como uma possível alternativa tecnológica para atender à demanda de áreas com alta concentração de sistemas de micro e minigeração injetando energia na rede, sem que haja a inversão do fluxo de potência, além de reduzir os impactos negativos da expansão da geração distribuída (Rodrigues *et al.*, 2016).

7756

### 3. METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica integrativa, com abordagem qualitativa, de caráter exploratório e bibliográfico, tendo como foco estudos já publicados e pertinentes ao tema. A pesquisa dos artigos foi realizada com a utilização de palavras-chave, como Geração Distribuída, Inversão do Fluxo de Potência, Transformadores, Transformadores de Estado Sólido, Qualidade na Distribuição de Energia e Regulamentação do Setor Elétrico.

Foi realizada a síntese integrativa e a análise sistemática da literatura sobre os impactos da geração distribuída fotovoltaica nas redes de distribuição, com ênfase na inversão de fluxo de potência e nos desafios associados à estabilidade do sistema elétrico.

Na sequência, foram analisados estudos e artigos técnicos sobre o funcionamento, a arquitetura e as aplicações dos transformadores de estado sólido, destacando suas vantagens em relação aos transformadores convencionais, utilizando-se, também, tabelas.

As fontes de informações utilizadas foram extraídas de bases de dados acadêmicas, como o Google Acadêmico e o Portal de Periódicos da CAPES, além de publicações científicas de

autores como Andrade, E. R. D. (2019), De Moraes, M. J. M. R. (2020), Godoi, L. A. A (2025), Neiva, L. J. R (2020), Pereira, N. X. (2019), Pontes, J. V. S. (2024) e Rodrigues, W. A. (2016). Foram analisadas também resoluções normativas da ANEEL (nº 482, nº 1.000, nº 1059, nº 1.098), pertinentes à pesquisa.

Com base nas informações coletadas, foi elaborada uma análise técnica descritiva, no formato de síntese integrativa, sobre a viabilidade de aplicação dos transformadores de estado sólido em redes de distribuição com elevada penetração de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Essa análise incluiu o mapeamento das funcionalidades técnicas e a discussão de cenários nos quais sua aplicação pode limitar os efeitos da bidirecionalidade do fluxo de potência.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta pesquisa foram analisados 13 artigos científicos, resoluções normativas, documentos e dados públicos do setor elétrico, selecionados conforme a metodologia apresentada na seção anterior. Esses estudos demonstraram aderência ao tema, à problematização e aos objetivos. O período de publicação dos trabalhos avaliados varia de 2011 a 2025, abrangendo tanto discussões já consolidadas quanto contribuições recentes sobre o setor elétrico, permitindo uma visão ampla e atualizada da temática.

7757

Os artigos contemplam temáticas variadas, porém relacionadas, abordando questões que vão desde a geração de energia a partir de fontes renováveis, a expansão da geração distribuída (GD), a dinâmica dos sistemas de distribuição, aspectos regulatórios, a problemática da inversão do fluxo de potência e, por fim, os estudos sobre as aplicações dos transformadores de estado sólido (SST) no contexto da GD e os desafios operacionais do setor elétrico.

A análise desses trabalhos permitiu compreender como o aumento da GD, especialmente a fotovoltaica, tem modificado o comportamento convencional das redes de distribuição, evidenciando a necessidade de novas estratégias e tecnologias avançadas para garantir o fornecimento de energia com qualidade e eficiência.

##### 4.1 Evidências da inversão do fluxo de potência na rede de distribuição ocasionado pela geração distribuída

Estudos como os de Andrade (2019) e Neiva (2020) apontam que o aumento expressivo das conexões de micro e minigeração distribuída, impulsionado pela redução dos custos de aquisição de equipamentos, por incentivos regulatórios por meio das resoluções normativas da Anel — REN 482/12, 687/15 ou 1.000/21 — e pelo aumento das tarifas convencionais de energia,

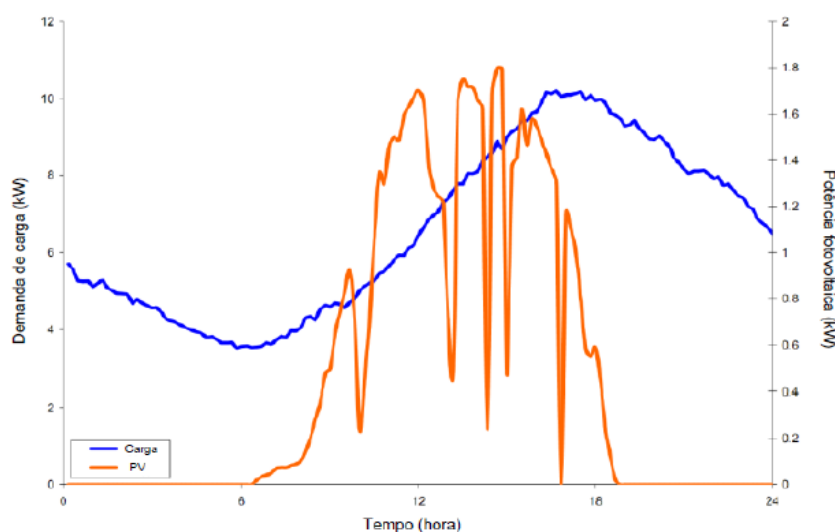
aliado à ampliação de potência de sistemas já existentes, tem contribuído para a ocorrência da inversão do fluxo de potência nos transformadores de distribuição.

Os resultados indicam que a inversão do fluxo de potência se torna um problema quando a energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos supera a demanda de energia de unidades consumidoras conectadas ao mesmo trecho da rede. Nesses casos, forma-se um excedente de energia na rede de baixa tensão (lado secundário do transformador convencional), que não consegue ser completamente transferido para a média tensão (lado primário do transformador convencional), devido às limitações operativas dos transformadores convencionais. Rodrigues (2016), ressalta que esses equipamentos não foram projetados para operar em condições de fluxo bidirecional, o que limita sua capacidade e contribui para esse excedente de energia na baixa tensão.

A literatura indica que esse fenômeno ocorre em horários bem específicos ao longo do dia, tipicamente entre 9h e 16h, sendo mais acentuado no pico de geração fotovoltaica, por volta das 12h, conforme ilustrado na Figura 6, com a curva de carga e de potência fotovoltaica. Esse fato está diretamente relacionado ao nível de irradiação solar nesse horário. Além disso, verifica-se maior concentração do fenômeno em áreas urbanas específicas, sobretudo em bairros predominantemente residenciais, onde a geração dos sistemas fotovoltaicos é elevada enquanto o consumo domiciliar tende a ser reduzido durante o horário laboral, uma vez que os moradores permanecem fora de casa. A simulação de Shayani (2010), abordada no referencial teórico deste trabalho, corrobora e esclarece esses achados.

7758

Figura 6. Gráfico da Curva de Carga e a Potência Fotovoltaica ao Longo do Dia.



Fonte: Godoi, 2018.



De forma geral, os resultados obtidos confirmam que a combinação entre a elevada penetração da geração distribuída, a baixa demanda diurna e as limitações dos transformadores convencionais constitui o principal fator para a ocorrência da inversão do fluxo de potência na rede de distribuição. Esse comportamento, observado empiricamente neste estudo, está fundamentado na literatura analisada neste trabalho.

#### **4.2 Consequências da inversão do fluxo de potência na qualidade e no fornecimento de energia elétrica**

Ficou evidenciado na análise da literatura que a inversão do fluxo de potência acarreta diversos problemas técnicos e operacionais na rede de distribuição elétrica. Godoi (2018) e Junior *et al.* (2020) convergem nesse entendimento ao apontarem que, além da sobrecarga de equipamentos como condutores, transformadores e demais componentes da rede, ocorrem também variações significativas nos níveis de tensão, com impacto direto na qualidade da energia. Junior *et al.* (2020) acrescenta, ainda, que a ocorrência contínua e acentuada desses problemas pode resultar na interrupção total do fornecimento na área afetada.

A sobrecarga nos condutores, assim como nos transformadores, reduz a vida útil desses componentes, pois o funcionamento rotineiro acima de suas capacidades nominais e fora das condições para as quais foram projetados e fabricados acelera o desgaste, aumenta a necessidade de manutenção e pode levar à substituição antecipada. As interrupções no fornecimento também estão diretamente relacionadas a esse cenário, uma vez que, sob condições de sobrecarga, os dispositivos de proteção, como os elos fusíveis, atuam para evitar danos mais severos à rede, interrompendo o suprimento de energia na área afetada.

As oscilações nos níveis de tensão podem ocorrer de duas formas: subtensão, quando a tensão fica abaixo dos limites aceitáveis, e sobretensão, quando ultrapassa esses limites. Esses parâmetros são definidos pelo PRODIST – Módulo 8 (Qualidade da Energia Elétrica), da ANEEL, que estabelece a faixa de operação adequada para a tensão em regime permanente.

No contexto da geração distribuída e do fenômeno de inversão do fluxo, a condição mais recorrente é a sobretensão, consequência da elevada concentração de sistemas fotovoltaicos injetando energia simultaneamente na rede. Esse excedente de geração eleva o nível de tensão, afetando unidades consumidoras e geradoras. Quando os valores de tensão permanecem fora dos limites regulamentares, diversos equipamentos, como eletrodomésticos, aparelhos eletrônicos, sistemas de iluminação e até os próprios sistemas fotovoltaicos, podem apresentar falhas de funcionamento, redução de vida útil ou danos permanentes.

#### 4.3 O potencial dos transformadores de estado sólido na mitigação da inversão do fluxo de potência

As medidas atualmente adotadas para mitigar esse fenômeno são, em grande parte, paliativas, e acabam resolvendo apenas questões de parte dos envolvidos prejudicando os demais.

Pontes (2024) destaca que algumas das medidas normatizadas pela ANEEL e aplicadas pelas concessionárias de energia elétrica, com base em estudos e pareceres técnicos, acabam por restringir a produção de energia limpa e renovável por meio da geração distribuída. Entre essas medidas, citam-se a exigência de conexão em média tensão mediante a instalação de transformador particular; a determinação de que a injeção de energia na rede ocorra apenas em horários previamente estabelecidos; e, em casos mais extremos, a própria não aprovação da conexão da unidade geradora à rede. Tais ações impedem o consumidor de usufruir plenamente dos benefícios da geração distribuída previstos, por exemplo, na Lei nº 14.300, ou reduzem de forma expressiva o retorno do investimento e a viabilidade econômica do sistema fotovoltaico.

Neste cenário, questões técnicas e regulatórias vêm sendo discutidas há anos na busca por uma solução viável, capaz de mitigar os efeitos da inversão do fluxo de potência sem comprometer a operação do sistema elétrico, ao mesmo tempo em que se promove a geração de energia a partir de fontes renováveis.

7760

A literatura, conforme apontado por De Moraes (2020), Godoi (2018) e Rodrigues *et al.* (2016), demonstra de forma consistente que os transformadores convencionais apresentam limitações relevantes quando submetidos à inversão do fluxo de potência. Por se tratar de equipamentos essencialmente passivos, eles não dispõem de funcionalidades, configurações ou de uma arquitetura capaz de controlar o fluxo de potência ativa e reativa, mitigar distorções harmônicas ou atuar de forma eficiente na regulação de tensão, dependendo exclusivamente de comutadores de tap para esse fim.

Diante desse contexto, o transformador de estado sólido (SST) é apresentado na literatura como uma alternativa promissora. De acordo com De Moraes (2020), Godoi (2018) e Rodrigues *et al.* (2016), trata-se de uma tecnologia capaz de ser incorporada à rede elétrica para múltiplas finalidades, incluindo a mitigação da inversão do fluxo de potência. Isso se deve às suas funcionalidades avançadas e à arquitetura eletrônica de potência com que é implementado, conforme detalhado no Quadro 1.

Quadro 1. Funcionalidades do SST e as Estratégias de Implementação.

| Funcionalidades do SST       | Estratégia de Implementação   |
|------------------------------|---|
| Controle de Tensão/Qualidade | Controle de fase da corrente de entrada para correção do fator de potência. Ajuste do ângulo de defasagem da corrente de entrada em relação à tensão da rede para absorção/injeção de potência reativa. Atuação como filtro ativo para mitigar distorções harmônicas. |
| Regulação de Tensão (Rede)   | Ajuste da amplitude e do ângulo do sinal de referência na etapa de inversão.  |
| Gerenciamento do Fluxo       | Bidirecionalidade do fluxo de potência implementada pelo conversor c.c./c.c. bidirecional e isolado.  |

Fonte: Elaborado pelos autores

Assim como ocorre na descrição das funcionalidades, observa-se uma convergência entre De Moraes (2020), Godoi (2018) e Rodrigues *et al.* (2016) quanto às vantagens e às limitações do SST em comparação aos transformadores convencionais. Entre os principais benefícios, destacam-se: redução de volume e peso, podendo atingir até 75% de redução de massa e cerca de 50% de redução volumétrica; funcionalidades relacionadas à qualidade de energia, como isolamento de falhas e proteção contra curto-circuito, regulação de tensão, filtragem harmônica, compensação de potência reativa e correção do fator de potência; e maior flexibilidade operacional, possibilitada pelo desacoplamento entre as tensões de entrada e saída e pela capacidade de operar com fluxo de potência bidirecional. As limitações podem ser observadas no Quadro 2.

7761

Quadro 2. Desvantagens do SST em Relação aos Transformadores Convencionais

| Limitações     | Detalhes  |
|----------------|---|
| Custo          | Atualmente mais alto do que o convencional, embora o custo das chaves semicondutoras esteja diminuindo, o que tende a reduzir o preço do SST.   |
| Confiabilidade | A natureza complexa do sistema eletrônico torna-o menos confiável que o TBF maduro, mas a modularidade permite redundância e contorno de falhas.  |
| Isolação       | É um desafio, especialmente porque se deseja evitar o uso de óleo para isolação e refrigeração.   |
| Eficiência     | Os valores de eficiência na literatura variam (90% a 98,1%), tornando difícil a comparação com o TBF (> 97,3%), embora o uso de componentes como o Carboneto de Silício, prometa elevar a eficiência para perto de 98%. |

Fonte: Elaborado pelos autores

De forma geral, com base nos dados apresentados, os transformadores de estado sólido demonstram ampla aplicabilidade técnica, ainda pouco explorada, mas com elevado potencial para mitigar diversos problemas técnicos e operacionais do sistema elétrico de potência,

incluindo a inversão do fluxo de potência. Trata-se de uma solução promissora, especialmente para atender áreas com elevada concentração de sistemas de micro e minigeração que injetam energia na rede, contribuindo para reduzir os impactos negativos associados à expansão da geração distribuída.

Diante do exposto, esta revisão apresenta algumas limitações. A primeira diz respeito à inclusão apenas de artigos que respondiam simultaneamente às duas questões de pesquisa, o que levou à exclusão de estudos que abordavam apenas uma das questões norteadoras. Ademais, a utilização de apenas duas bases de dados reduziu o volume de publicações disponíveis para compor a amostra final. Outra limitação refere-se à inclusão de estudos classificados com risco moderado de viés, especialmente aqueles baseados exclusivamente em simulações, sem evidências de aplicação prática do SST em redes de distribuição. Por fim, verificou-se, em alguns artigos, insuficiência de informações sobre aspectos como tipo de refrigeração, características da isolamento interna e materiais empregados na construção do SST, o que dificulta comparações mais robustas entre o SST e o transformador convencional.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise dos estudos desta revisão, conclui-se que a expansão da geração distribuída ocorreu sem infraestrutura adequada e sem um planejamento consistente por parte do setor elétrico, e contribuiu significativamente para a ocorrência da inversão do fluxo de potência e para o surgimento de diversos problemas técnicos e operacionais. Esses problemas afetam diretamente a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia, sobretudo nas redes de distribuição em baixa tensão, onde os impactos se manifestam de forma mais acentuada.

Além disso, observa-se que as soluções atualmente implementadas não têm apresentado resultados eficazes, deixando de mitigar o problema de maneira satisfatória. As resoluções normativas da ANEEL, em muitos casos, acabam favorecendo as concessionárias ao solucionar suas demandas operacionais, porém impõem restrições que prejudicam o consumidor que busca usufruir dos benefícios da geração distribuída para reduzir os custos de sua fatura por meio de sistemas fotovoltaicos.

Por fim, valida-se que o transformador de estado sólido apresenta elevado potencial e viabilidade para a mitigação e correção dos problemas decorrentes da inversão do fluxo de potência, bem como para o enfrentamento de questões relacionadas à qualidade do fornecimento de energia, tais como variações de tensão, sobrecargas e distorções harmônicas. Trata-se de uma

tecnologia capaz de substituir os transformadores convencionais, oferecendo recursos mais avançados, maior flexibilidade operacional e um conjunto superior de funcionalidades.

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Desafios da inversão de fluxo de energia na geração distribuída de energia solar**. São Paulo, SP: ABSOLAR, 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/SxDr>. Acesso em: 05 maio. 2025.

ABSOLAR; ANEEL. **Matriz Energética Brasileira 2024**. São Paulo, SP: ANEEL, 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-canalsolar-com-br-participacao-da-solar-na-matriz-eletrica-sobe-de-116-para-17-em-um-ano/> Acesso em: 30 abr. 2025.

ANDRADE, E. R. D. **Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica em redes de distribuição de energia elétrica de baixa tensão sob a óptica do controle de nível de tensão**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2019. Disponível em: <http://repositorio.uricer.edu.br/handle/35974/205>. Acesso em: 30 abr. 2025.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e Minigeração Distribuída**, [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 08 maio. 2025.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 1000**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. 2021. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 15 dez. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 05 maio. 2025.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 482**. 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. 2012. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 05 maio. 2025.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 1059**. 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. 2023. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 10 fev. 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 05 maio. 2025.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 1098**. Aprimora a Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, em função da publicação da Lei nº 14.620, de 2023, que dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida, e dá outras providências. 2024. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 23 jul. 2024. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20241098.pdf>. Acesso em: 05 maio. 2025.

DE MORAIS, M. J. M. R. **Estudo e aplicação de transformador de estado sólido para redes de distribuição**. Dissertação (Mestrado Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade

de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2020. Disponível em: <https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/132930/2/416736.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2025.

FALCONES, S. *et al.* Um Transformador de Estado Sólido Baseado em Conversor Multiportas CC-CC Integrando Geração e Armazenamento Distribuídos. **IEEE Transactions On Power Electronics**, v. 28, n. 5, p., 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6290413/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

GODOI, L. A. A. **Transformador de estado sólido no controle de fluxo de potência em redes de distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/4e28c600-aed5-43f5-8574-3d1e154094db/content>. Acesso em: 10 nov. 2025.

JUNIOR, H. M. R. *et al.* Análise da Inserção de Geração Distribuída em Redes Ativas: Uma Abordagem Baseada em Fluxo de Potência Intervalar. **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**, v. 2, n. 1, 2020. Disponível em: [https://sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/cba/article/download/1738/1436](https://sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/download/1738/1436). Acesso em: 14 nov. 2025.

NEIVA, L. J. R. *et al.* Análise da Inversão no Sentido do Fluxo de Potência Devido à Falta na Média Tensão e Geração Distribuída no Secundário Reticulado. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: [https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/sbse/article/download/2183/1856](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/download/2183/1856). Acesso em: 30 abr. 2025.

OLIVEIRA, T. R. **Geração De Energia X Impacto Ambiental.**; UEMG.; Minas Gerais.; 2011. Disponível em: [http://www.waltenomartins.com.br/tcc\\_2011\\_Thalles.pdf](http://www.waltenomartins.com.br/tcc_2011_Thalles.pdf). Acesso em: 05 maio. 2025.

7764

PEREIRA, N. X. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/4fe4407b-16a3-4f5a-9eff-49fafc1d4db8>. Acesso em: 05 maio. 2025.

PONTES, J. V. S. *et al.* **Análise de viabilidade econômica frente às alternativas de conexão em cenários de inversão de fluxo de potência: um estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Garanhuns, 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/ithI>. Acesso em: 30 abr. 2025.

RODRIGUES, W. A. *et al.* Aplicação do Transformador de Estado Sólido em Sistemas de Distribuição. In: **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, 2016. Anais [...]. Disponível em: <https://encurtador.com.br/mWcx>. Acesso em: 04 abr. 2025.

SANTOS, T. L. **Análise dos impactos da geração distribuída por painéis solares fotovoltaicos no sistema de baixa tensão: uma avaliação dos efeitos no gerenciamento da rede elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras, Cajazeiras, 2023. Disponível



em:

SILVA, A. M. **Análise e proposta para tratamento de problemas de oscilação de nível de tensão em redes de distribuição de energia elétrica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/f96d4790-0368-4bf7-b925-c88597529ddb/content>. Acesso em: 14 nov. 2025

SHAYANI, R. A. **Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: [https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7117/1/2010\\_RafaelAmaralShayani.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7117/1/2010_RafaelAmaralShayani.pdf). Acesso em: 14 nov. 2025.