



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**

WALIS DJINADOU

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE
ALAGOAS**

**RIO LARGO, AL
MAIO, 2025**

WALIS DJINADOU

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE
ALAGOAS**

Trabalho apresentado a Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Cícero Rita Da Silva

**RIO LARGO
MAIO, 2025**

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

D625a Djinadou, Walis.

Análise dos impactos da geração distribuída fotovoltaica no sistema de distribuição de energia elétrica do estado de Alagoas. / Walis Djinadou. – 2025.

52 f.: il.

Orientador(a): Cícero Rita da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) –
Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias,
Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Geração Distribuída. 2. Energia Solar. 3. Sistema de Distribuição. 4. Inversores
Fotovoltaicos. 5. Alagoas. I. Título.

CDU: 621.472: 981.35

FOLHA DE APROVAÇÃO

WALIS DJINADOU

ANÁLISE DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE ALAGOAS

Trabalho apresentado a Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Aprovado em: 19 de Maio de 2025.

(Orientador - Prof. Dr., Cícero Rita Da Silva, UFAL).

(Examinador Interno - Prof. Dr., Sandro Correia de Holanda, UFAL).

(Examinador Interno - Prof. Me., Allan David Da Costa Silva, UFAL).

Dedico este trabalho à minha família

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo dessa jornada desafiadora e transformadora. Sua presença foi essencial em cada etapa desta caminhada.

À minha família, pelo amor, apoio incondicional e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo nos momentos mais difíceis.

Às minhas mães, Maman Aya Hatikatou e Awaou Fousseni, pilares fundamentais da minha vida.

À Maman Aya Hatikatou, pelo apoio constante, por ser um exemplo de força e dedicação, por estar sempre presente em todos os momentos que precisei. A senhora foi essencial para que eu pudesse realizar o sonho de estudar fora do meu país. Mesmo com a distância, esteve ao meu lado com amor, coragem e incentivo.

À Awaou Fousseni, que foi e sempre será uma referência para mim. Obrigado por me ensinar a não desistir e por lutar por mim em cada passo. Deus te levou cedo, antes de ver as conquistas do seu filho, mas cada vitória carrega o seu nome. Que você descanse em paz, e que Deus cuide de ti onde estiver. Você vive em mim e estará para sempre presente nesta conquista.

À minha namorada, Anielly de Melo Araujo, pelo seu apoio, paciência e carinho. Sua presença constante foi um alívio nos momentos de cansaço e um estímulo nos momentos de dúvida. Sou imensamente grato por ter você ao meu lado.

Ao Prof. Cícero Rita Da Silva, meu orientador, por ter sido um apoio essencial durante toda a graduação. Sua orientação, paciência e incentivo foram fundamentais não apenas para a realização deste trabalho, mas também para minha formação acadêmica e pessoal.

Ao Prof. Sandro Correia de Holanda, que acompanhou praticamente toda a minha trajetória no curso, e cujas palavras e conselhos, mesmo que breves, ecoam em mim até hoje e me ajudaram a seguir com mais clareza e propósito.

Aos demais professores do curso, que além de compartilharem seus conhecimentos em sala de aula, muitas vezes cederam seu tempo para ajudar com dúvidas, oferecer conselhos, ou simplesmente ouvir como verdadeiros amigos. Suas experiências acadêmicas, profissionais e de vida foram inspirações valiosas ao longo do caminho. Aos colegas de curso e amigos que estiveram presentes nas vitórias e nos desafios, dividindo aprendizados, risadas e incentivos.

À equipe da D'Solare Energia, pela confiança e pela oportunidade de crescimento profissional que tanto agregaram à minha formação prática. Em especial, a Diego Braga, que foi mais que um líder — foi como um pai, sempre pronto para aconselhar, apoiar e acreditar no meu crescimento. Sua presença fez toda a diferença na minha trajetória.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a construção desta caminhada, o meu sincero muito obrigado.

RESUMO

A Geração Distribuída (GD) fotovoltaica tem se expandido rapidamente no Brasil, sendo impulsionada pela redução nos custos de equipamentos, políticas de incentivo e crescente demanda por fontes renováveis. Neste trabalho, foi analisado o impacto da adoção em larga escala da GD fotovoltaica no sistema de distribuição elétrica do estado de Alagoas. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica, utilizando fontes acadêmicas e documentos técnicos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), complementada por um estudo de caso que envolveu a análise de pareceres de acesso emitidos pela concessionária local. Foram abordadas as tecnologias mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos, como painéis de silício monocristalino, policristalino e de filmes finos, além das diversas topologias e aplicações dos inversores utilizados na conversão da energia. Verificou-se que, embora a GD apresente benefícios ambientais e econômicos, sua integração em larga escala tem causado distúrbios técnicos na rede elétrica, como variações de tensão, alterações no fator de potência, distorções harmônicas e fluxo reverso de energia. A partir dos dados obtidos, foram indicadas estratégias para mitigar esses impactos, como a modernização dos sistemas de proteção, ajustes regulatórios e investimentos em tecnologias de monitoramento e controle. Concluiu-se que, para garantir a eficiência e a segurança da rede de distribuição, é essencial um planejamento técnico adequado, aliado ao desenvolvimento de políticas públicas que promovam uma integração sustentável da GD. O estudo contribui com subsídios práticos e teóricos para o aprimoramento da operação da rede elétrica frente ao avanço da geração fotovoltaica distribuída.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Energia Solar. Sistema de Distribuição. Inversores Fotovoltaicos. Qualidade da Energia. Alagoas.

ABSTRACT

Distributed Generation from photovoltaic sources has experienced rapid growth in Brazil, driven by decreasing equipment costs, incentive policies, and increasing demand for renewable energy. This study analyzed the impact of large-scale adoption of photovoltaic DG on the electric distribution system in the state of Alagoas. The research was conducted through a literature review using academic sources and technical documents from the Brazilian Electricity Regulatory Agency, complemented by a case study that examined grid access reports issued by the local utility company. The study explored the most commonly used photovoltaic technologies, such as monocrystalline, polycrystalline, and thin-film panels, as well as the different topologies and applications of inverters used for energy conversion. The findings revealed that, although DG offers environmental and economic benefits, its large-scale integration has caused technical disturbances in the power grid, including voltage variations, power factor changes, harmonic distortions, and reverse power flow. Based on the data obtained, strategies were proposed to mitigate these impacts, including upgrading protection systems, making regulatory adjustments, and investing in monitoring and control technologies. The study concludes that ensuring the efficiency and safety of the distribution network requires adequate technical planning supported by public policies that promote the sustainable integration of DG. This research provides practical and theoretical contributions to enhance power grid operation in the context of expanding photovoltaic distributed generation.

Key-words: Distributed Generation. Solar Energy. Distribution System. Photovoltaic Inverters. Power Quality. Alagoas.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento do monocristal.....	16
Figura 2 – Célula de silício monocristalino.....	16
Figura 3– Célula de silício policristalino	17
Figura 4- Sistema fotovoltaico: Microgeração conectado à rede	21
Figura 5- Sistema elétrico padrão, sem a geração distribuída.....	23
Figura 6- Sistema elétrico com a inserção de sistemas conectados à rede	24
Figura 7- Sistema de distribuição radial	25
Figura 8- Localização da unidade geradora em Marechal/AL.....	31
Figura 9 - Leitura DEMANDA ATIVA (kW) Alimentador BSM 01C1 com Inversão de Fluxo.....	32
Figura 10 – Alimentador BSM-C1 com Inversão de Fluxo	33
Figura 11- Diagnostico hora em hora, para dia útil, sábado e domingo, cenário 1 e 2 Marechal/AL	34
Figura 12 - Localização da unidade geradora em Lagoa Da Canoa/AL	35
Figura 13 - Leitura Demanda Ativa (kW) Alimentador ARD 01M5 com Inversão de Fluxo pela manhã Lagoa De Canoa.....	37
Figura 14– Alimentador ARD-M5 com Inversão de Fluxo.....	37
Figura 15 - Diagnostico hora em hora, para dia útil, sábado e domingo, cenário 1 e 2 Lagoa de Canoa.....	38
Figura 16 – Funcionamento do BESS	42
Figura 17- Integração com Microrredes	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Proteções requeridas no ponto de conexão em função da potência	26
Tabela 2 - Dados dos Alimentadores do Estudo de Caso	30
Tabela 3 - Fator de ajuste	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
GD	Geração distribuída
SIN	Sistema Interligado Nacional
REN	Resolução Normativa
MPPT	Maximum Power Point Tracking
V-VAR	Controle de Tensão-Reativo (Volt-var)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
KW.	Kilowatt
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	JUSTIFICATIVA	13
4	MATERIAL E MÉTODOS	14
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
5.1	Tecnologias atuais dos painéis solares	15
5.2	Tecnologias atuais dos inversores.....	18
5.3	Funcionamento de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (On-Grid)....	19
5.4	Aspectos normativos	21
5.5	Sistemas de proteção para distribuição de energia elétrica	22
5.6	Proteções requeridas em sistemas de gd fv	26
6	INFLUÊNCIA DA GD FV NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM ESTUDO DE CASO	27
6.1	Efeitos gerais da inserção de gd fv no sistema de distribuição	27
6.2	Resultados e discussão	30
7	SOLUÇÕES PARA A INTEGRAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO	39
7.1	Cálculo da potência de geração distribuída compatível com o consumo da unidade.....	39
7.2	Fast track.....	40
7.3	Armazenamento em baterias.....	41
7.4	Grid-zero.....	42
7.5	Mercado livre de energia	43
7.6	Uso de inversor híbrido	43
7.7	Controle volt-var e volt-watt	44
7.8	Integração com microrredes.....	45
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A Geração Distribuída (GD) refere-se a centrais geradoras de energia elétrica conectadas ao sistema de distribuição, podendo ser instaladas diretamente na rede ou por meio das instalações dos próprios consumidores. Essas unidades operam tanto em paralelo com a rede como de forma isolada e podem ou não ser despachadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), conforme definido pelo PRODIST da ANEEL (2018).

Em 2024, a geração distribuída fotovoltaica no Brasil atingiu aproximadamente 25,8 GW de potência instalada, distribuídos em cerca de 2,3 milhões de conexões, beneficiando mais de 3,3 milhões de unidades consumidoras em 5.545 municípios, o que representa quase a totalidade das 5.570 cidades (ANEEL, 2024). Esses números representam um crescimento considerável em comparação com 2023. Esses dados, fornecidos pela ANEEL, refletem o desenvolvimento tecnológico, impulsionado pela queda nos preços dos painéis solares e inversores, facilitando sua instalação e manutenção.

Apesar dos benefícios da GD fotovoltaica, sua ampla adoção pode gerar impactos significativos na estabilidade do sistema elétrico, na qualidade da energia, nas proteções das subestações e na operação da rede de distribuição. A introdução de fontes intermitentes, como energia solar e eólica, pode desequilibrar a oferta e a demanda, afetando a frequência e a tensão do sistema, além de introduzir distorções harmônicas e variações de tensão que prejudicam equipamentos sensíveis e sistemas de comunicação. A integração desses sistemas também pode demandar ajustes nas proteções das subestações e na operação da rede para lidar com o fluxo reverso de energia e garantir a segurança do sistema.

Essas mudanças estão sendo estudadas globalmente, e em Alagoas, o uso massivo da GD fotovoltaica conectada à rede está crescendo, gerando relatos de problema de qualidade de energia. Um exemplo disso ocorre em Minas Gerais, onde o aumento expressivo das solicitações de acesso de novos geradores tem impactado os transformadores da rede básica de fronteira das regiões Norte e do Triângulo Mineiro, conforme relatado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2023. Esses desafios destacam a necessidade de um planejamento

cuidadoso e de medidas adequadas para garantir a integração eficiente da GD fotovoltaica na rede elétrica.

Considerando a relevância do tema para a engenharia, especialmente na área de distribuição, este trabalho abordará alguns dos diversos aspectos alterados na rede de distribuição do estado de Alagoas devido à adoção em larga escala de GD fotovoltaica conectada à rede.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho estudará os efeitos e impactos causados pela geração distribuída fotovoltaica em larga escala no sistema elétrico de distribuição do estado de Alagoas.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos:

- Analisar os desafios associados à implementação da Geração Distribuída (GD) fotovoltaica;
- Avaliar possibilidades para minimizar as alterações na rede da concessionária relacionadas a distúrbios de frequência e variações no fator de potência ao injetar energia na rede da concessionária;
- Indicar as estratégias e práticas em larga escala para a implementação de Geração Distribuída em Alagoas;

3 JUSTIFICATIVA

A demanda global por energia continua a crescer, impulsionada por diversos fatores, como o aumento populacional, o desenvolvimento econômico, a urbanização e os avanços tecnológicos. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2030, no Brasil, projeta-se que o consumo de energia aumente a uma média de 1,5% ao ano, enquanto a oferta de energia crescerá a uma taxa de 3% ao ano até 2030, no cenário de referência.

Essa expansão contínua torna a busca por fontes de geração de energia renováveis essencial. Investir em energias como a solar, eólica, hidrelétrica e outras renováveis impulsiona uma transição energética mais limpa e sustentável,

contribuindo para a preservação do meio ambiente e para a construção de um sistema energético mais resistente e igualitário.

O aumento do uso da geração distribuída fotovoltaica conectada à rede está gerando relatos de alterações significativas em Alagoas. Os impactos da forte presença fotovoltaica na rede de distribuição incluem sobretensão, distorção harmônica, perdas de demanda e alteração no fator de potência (Dantas, 2019).

Estudar os impactos da geração distribuída fotovoltaica no sistema de distribuição de energia é fundamental para garantir um fornecimento confiável, eficiente e sustentável no futuro. Este estudo busca abordar os efeitos e impactos, sob vários aspectos, da adoção em larga escala da geração distribuída fotovoltaica no sistema de distribuição de energia do estado de Alagoas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo consiste em uma pesquisa bibliográfica sobre a Geração Distribuída Fotovoltaica no estado de Alagoas, utilizando recursos da Universidade Federal de Alagoas, como sua biblioteca, a plataforma de Periódicos CAPES e a Scielo, além de materiais e recursos disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), incluindo normas, biblioteca virtual e procedimentos regulatórios. Além disso, será realizado um estudo de caso. Nesse estudo de caso incluirá a análise de pareceres de acesso, estudos e diagnósticos realizados pela concessionária em relação aos projetos de Geração Distribuída (GD) fotovoltaica, proporcionando uma visão prática sobre os desafios enfrentados pelas concessionárias e os consumidores.

A revisão bibliográfica abordará os seguintes tópicos: as tecnologias atuais de painéis solares e inversores, aspectos normativos das instalações de Geração Distribuída, técnicas convencionais de proteção e os impactos da adoção da Geração Distribuída Fotovoltaica. O objetivo é estabelecer uma base sólida de conhecimento, explorando conceitos fundamentais e suas implicações práticas e regulatórias para a geração distribuída de energia solar.

Este trabalho visa não apenas compreender as tecnologias envolvidas, mas também analisar os desafios e benefícios da implementação da GD Fotovoltaica em Alagoas.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

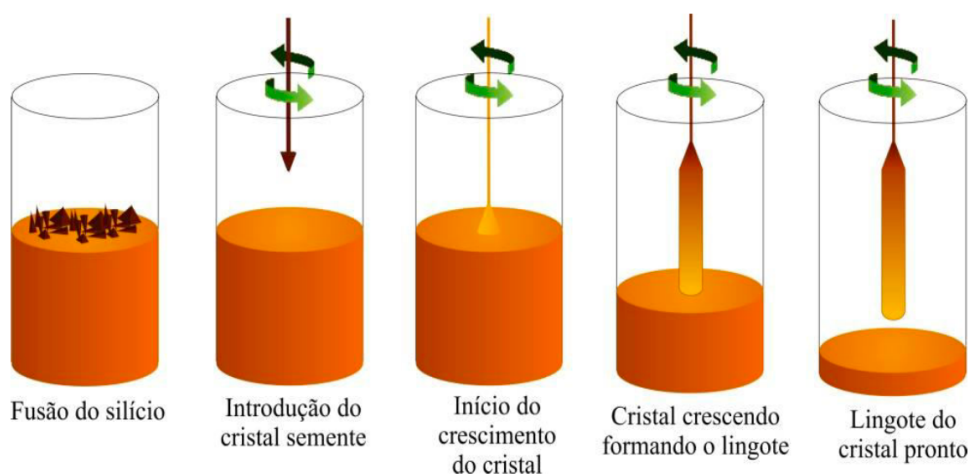
5.1 Tecnologias atuais dos painéis solares

A busca por eficiência energética é um ponto central nas pesquisas globais sobre energia solar. Muitos desses estudos têm um objetivo específico: desenvolver materiais e produtos que aumentem a eficiência na conversão da energia solar em eletricidade, mantendo os custos acessíveis. Este capítulo aborda as tecnologias atuais mais utilizadas mundialmente para a absorção e utilização da energia solar em geração distribuída. As células fotovoltaicas encontradas no mercado atualmente são, na grande maioria de silício cristalino, que se divide em duas categorias: monocristalino e policristalino.

- Silício monocristalino (m-Si)

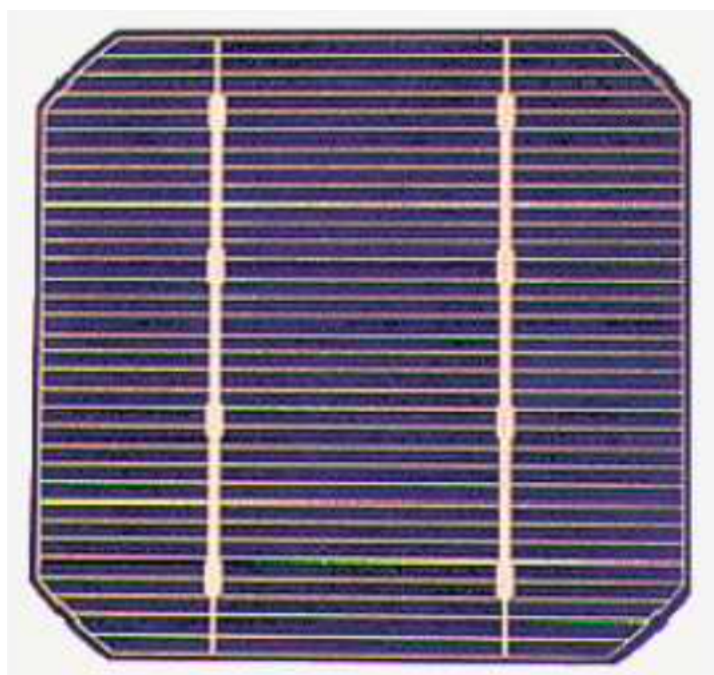
As células de silício monocristalino são fabricadas a partir de um único cristal de silício, denominado cristal semente, que é imerso em silício fundido durante o processo de Czochralski. Durante esse processo, boro (B) é adicionado em pequenas quantidades ao silício fundido. O boro, sendo um elemento trivalente, cria lacunas na estrutura cristalina do silício, originando um material semiconductor do tipo p ou seja, silício tipo p dopado com boro. O cristal semente é então puxado lentamente por uma haste, formando um lingote de silício monocristalino tipo p. Esse lingote é cortado em finas lâminas que são submetidas a um processo de difusão térmica em forno, onde recebem dopagem com fósforo (P) um elemento pentavalente formando assim a junção p-n, essencial para o funcionamento da célula fotovoltaica. Devido à complexidade e ao custo do processo de fabricação, as células de silício monocristalino apresentam um custo mais elevado em relação a outras tecnologias. No entanto, sua alta eficiência mantém a demanda elevada, especialmente em aplicações com espaço limitado ou em regiões de baixa irradiação solar, como os países do norte da Europa (VILLALVA, 2012).

Figura 1 – Crescimento do monocristal



Fonte: MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. 2015.

Figura 2 – Célula de silício monocristalino



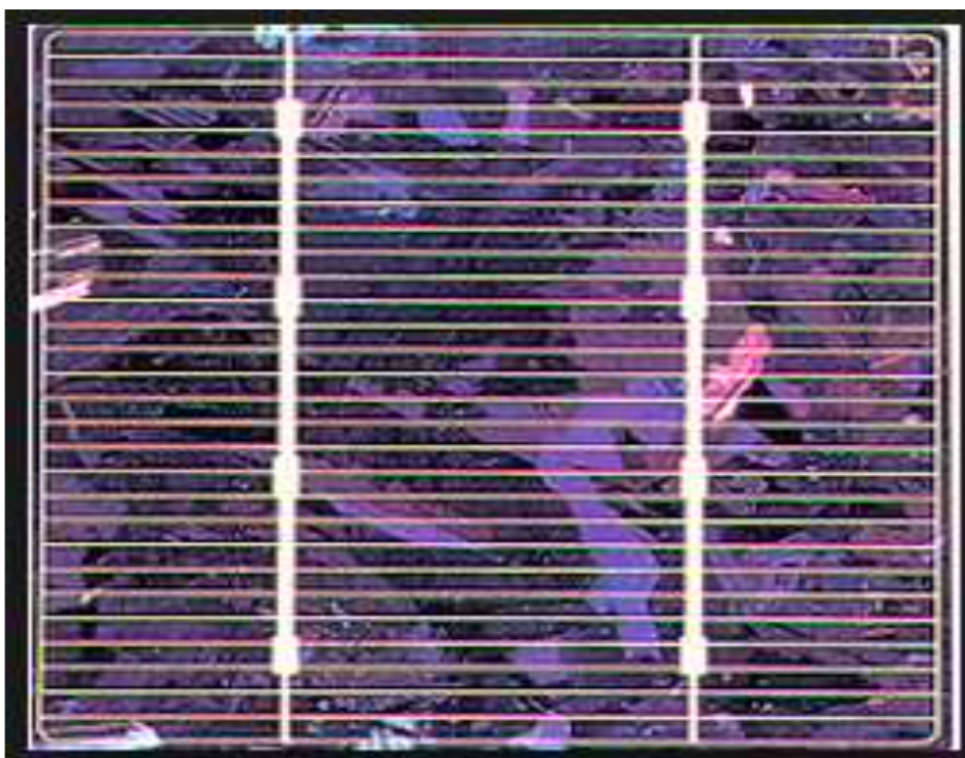
Fonte: CRESESB/CEPEL, 2008

- Silício policristalino (p-Si)

As células de silício policristalino têm eficiência que varia entre 11% e 14%. Diferentemente das monocristalinas, as células policristalinas não passam pelo

processo de Czochralski. Neste método, o silício líquido de alta pureza do tipo p é resfriado, resultando na formação de múltiplos cristais, como ilustrado na Figura 3. Depois, elas passam por um processo de dopagem com fósforo, gerando uma junção p-n semelhante àquela encontrada nas células de silício monocristalino. Segundo o CRESESB (2008), as células policristalinas são mais acessíveis em termos de custo em comparação com as monocristalinas, pois o seu processo de fabricação é menos rigoroso.

Figura 3– Célula de silício policristalino



Fonte: CRESESB/CEPEL, 2008

Além das células silício cristalino, temos os filmes finos.

- Filmes finos

O principal diferencial das células solares de filme fino está na sua estrutura e nos materiais utilizados. Enquanto as células de silício cristalino são produzidas a partir de lâminas obtidas do corte de blocos de silício, as de filme fino são formadas por camadas extremamente finas de materiais semicondutores depositadas sobre substratos flexíveis, como plástico ou vidro fino. Essa característica confere aos

módulos maior leveza e flexibilidade, o que os torna especialmente indicados para grandes instalações, aplicações integradas a edificações (BIPV) e situações em que o peso estrutural seja uma limitação. De acordo com Pereira et al. (2020), as tecnologias de filme fino vêm apresentando avanços significativos em eficiência e durabilidade, o que tem ampliado seu uso no setor fotovoltaico.

- Tecnologias em fase de Pesquisa e Desenvolvimento

Ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento (P&D), há três linhas principais:

Células Fotovoltaicas Multijunção e Células Fotovoltaicas para Concentração (CPV): CPV tem potencial teórico para altas eficiências (cerca de 56%), mas seu custo ainda não é competitivo.

Células Sensibilizadas por Corante (DSSC) e Células Orgânicas ou Poliméricas (OPV) são tecnologias que estão sendo testadas e produzidas em pequena escala, com foco em aumentar a eficiência e a viabilidade econômica.

5.2 Tecnologias atuais dos inversores

Devido ao fato de que a corrente gerada pelos módulos fotovoltaicos é em corrente contínua (CC), torna-se necessário o uso de conversores eletrônicos de potência, também conhecidos como conversores estáticos, para acondicionar essa energia antes de sua disponibilização para consumo na rede de corrente alternada (CA), atendendo às cargas residenciais, comerciais e industriais. O equipamento responsável por esse processamento é o conversor CC-CA, também chamado de "inversor de frequência". Este dispositivo eletrônico é composto por semicondutores de potência (ALMEIDA, 2011). Em resumo, a tensão em corrente contínua é convertida em corrente alternada, assegurando conformidade com os padrões de amplitude, frequência, qualidade da energia e, especialmente, a sincronização da tensão da rede elétrica quando o sistema está conectado à rede.

Os inversores para sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em várias categorias, dependendo de diferentes critérios, como a configuração, a topologia e a aplicação. Aqui estão as principais classificações de acordo com a sua aplicação:

- Inversores On-Grid: Conectados à rede elétrica, permitem a injeção de energia gerada na rede e geralmente incluem funcionalidades de segurança e controle.

- Inversores Off-Grid: Usados em sistemas que não estão conectados à rede elétrica, combinados com baterias para armazenamento de energia.
- Inversores Híbridos: Podem operar tanto on-grid quanto off-grid, permitindo o armazenamento em baterias e a injeção de energia na rede.

5.3 Funcionamento de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (On-Grid)

O sistema On-Grid é uma solução eficiente para gerar energia a partir da luz solar, com a possibilidade de injetar o excesso de energia na rede elétrica pública. O funcionamento básico de um sistema como esse pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Geração de Energia

Durante o dia, os painéis solares captam a luz do sol e convertem-na em energia elétrica na forma de corrente contínua (CC). A quantidade de energia gerada é diretamente proporcional à intensidade da luz solar que incide sobre os painéis. Quanto maior a exposição ao sol, maior será a geração de energia.

- Conversão de Energia

A energia gerada pelos módulos solares é inicialmente corrente contínua (CC), mas a maioria dos dispositivos elétricos de uma residência ou empresa é em corrente alternada (CA). Por isso, a corrente contínua gerada pelos painéis é encaminhada para o inversor, que realiza a conversão para corrente alternada, tornando a energia compatível com os sistemas elétricos da casa.

- Distribuição de Energia para a Casa

Após a conversão em corrente alternada (CA), a energia elétrica é distribuída para os circuitos da residência ou empresa, alimentando diversos dispositivos como lâmpadas, eletrodomésticos, ar-condicionado, entre outros.

- Excesso de Energia

Se a quantidade de energia gerada pelos painéis solares for superior ao consumo imediato da residência (por exemplo, durante o pico de luz solar,

quando a produção é máxima), o excesso de energia não é desperdiçado. Essa energia é injetada na rede elétrica pública. O medidor bidirecional instalado no sistema registra essa energia excedente, e ela é creditada na conta de energia do consumidor. Esse processo é conhecido como compensação de energia.

o Consumo da Energia da Rede

Quando a produção solar não é suficiente para atender à demanda da residência (como à noite, em dias nublados ou durante períodos de baixo sol), a rede elétrica é acionada para suprir a necessidade de energia. O medidor bidirecional registra tanto a energia consumida da rede quanto a energia injetada na rede.

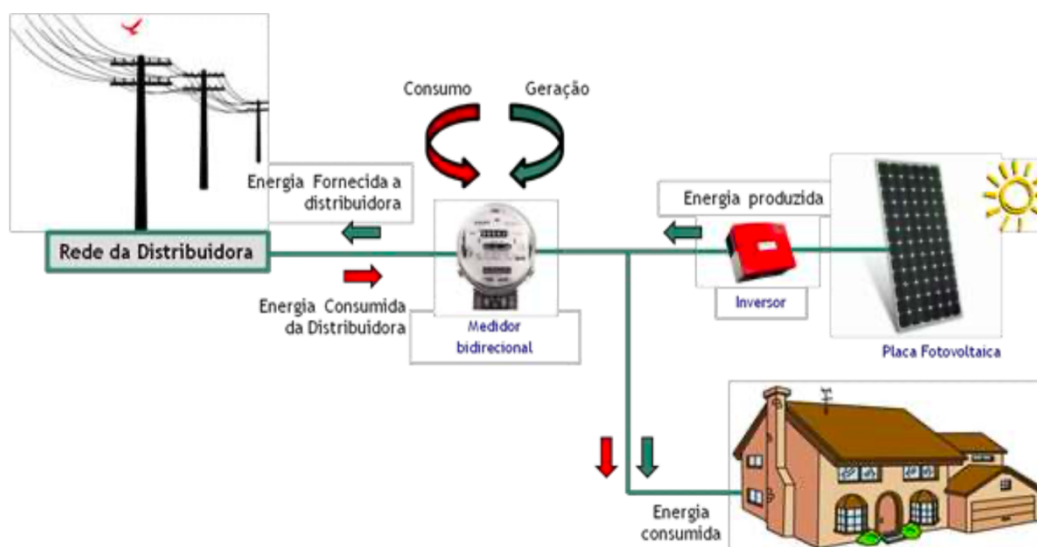
o Compensação de Energia

A energia excedente que é gerada e injetada na rede elétrica é compensada na fatura de energia da residência. Isso cria um crédito de energia para o consumidor. Nos períodos em que a geração de energia solar é maior, como durante o verão, por exemplo, o consumidor acumula créditos que podem ser utilizados nos meses com menor geração, como no inverno ou à noite. As regulamentações permitem que esses créditos sejam acumulados ao longo do ano, o que proporciona uma compensação eficiente e contínua, equilibrando o consumo de energia ao longo do tempo.

Esse processo de compensação de energia torna o sistema fotovoltaico conectado à rede não apenas uma fonte de energia limpa e renovável, mas também uma alternativa financeiramente vantajosa para os consumidores, uma vez que reduz significativamente a conta de energia elétrica ao longo do tempo.

Para conectar o sistema fotovoltaico à rede da concessionária é necessário solicitar autorização para a concessionária, pois, esta precisa estar preparada para receber a energia gerada excedente, conforme as NBR 62116:2012, 16149:2013, 16150:2013, 11704:2008 e 16274:2014, além das NRs e dos documentos emitidos pela ANEEL, Inmetro e da concessionária de eletricidade local.

Figura 4- Sistema fotovoltaico: Microgeração conectado à rede



Fonte: VIRIDIAN ECOTECNOLOGIA,(2015).

5.4 Aspectos normativos

Este trecho aborda as normas e regulamentações nacionais e internacionais que regulam os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (On-Grid). No Brasil, diversas normas da ABNT e resoluções da ANEEL regem a instalação, operação e manutenção desses sistemas, com destaque para as seguintes:

- ABNT NBR IEC 62116:2012: Define os testes de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos, garantindo que os inversores se desconectem da rede quando houver falha na energia, assegurando a segurança da rede elétrica.
- ABNT NBR 16149:2013: Estabelece os requisitos técnicos para a interface de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica, incluindo parâmetros como tensão, frequência e proteção contra corrente contínua.
- ABNT NBR 16274:2014: Define as exigências para a documentação, verificação e avaliação de desempenho dos sistemas fotovoltaicos, incluindo testes e comissionamento.

- Resolução ANEEL 482/2012: Regula a micro e minigeração distribuída, permitindo que consumidores gerem e injetem energia solar na rede elétrica.
- Resolução ANEEL 687/2015: Modifica as regras da Resolução 482/2012, ampliando a capacidade de geração e ajustando os critérios de compensação de energia.
- Resolução ANEEL 1.059/2023: Atualiza as regras de compensação de energia e revisa as condições para geração distribuída no Brasil.

Além das normas nacionais, as normas internacionais como a IEC 62109-1 e 62109-2 garantem a segurança dos conversores e inversores fotovoltaicos, e a IEEE Std 929 aborda a interface desses sistemas com a rede elétrica, garantindo a segurança e eficiência na operação dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Essas regulamentações são essenciais para garantir a segurança, eficiência e compatibilidade dos sistemas fotovoltaicos com a infraestrutura elétrica, tanto no Brasil quanto internacionalmente.

5.5 Sistemas de proteção para distribuição de energia elétrica

O sistema de elétrico de potência é uma rede integrada de equipamentos e instalações projetada para gerar, transmitir, distribuir e utilizar energia elétrica de forma eficiente e segura. A geração de energia pode ser feita por fontes convencionais, como hidrelétricas, termoeletricas movidas a carvão, óleo, gás natural ou até mesmo fontes nucleares. No Brasil, a maior parte da energia elétrica gerada vem de fontes renováveis, com destaque para as hidrelétricas. O sistema de potência elétrica é composto por vários componentes essenciais, que desempenham funções específicas:

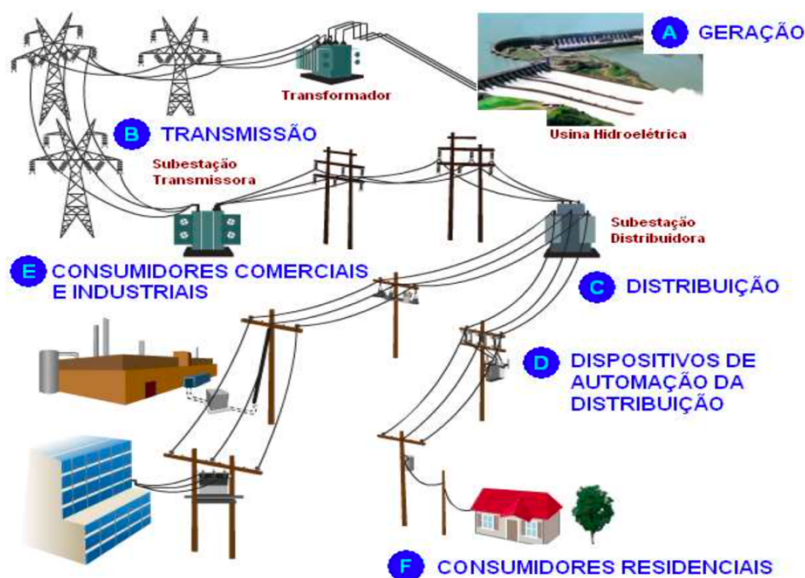
- Geradores de Energia: São responsáveis por transformar diferentes formas de energia (mecânica, térmica, solar, eólica, etc.) em energia elétrica. Esses geradores estão conectados à rede elétrica, fornecendo eletricidade para as distribuidoras e consumidores.
- Transformadores: São equipamentos que ajustam os níveis de tensão da energia elétrica. A energia é inicialmente gerada em tensões mais baixas, sendo então elevada para tensões mais altas, o que evita per-

das no transporte da energia. Quando a energia chega às áreas de consumo, a tensão é reduzida para níveis apropriados ao uso.

- Linhas de Transmissão: São condutores responsáveis por transportar a energia elétrica das usinas geradoras até as subestações, onde a tensão será ajustada para ser distribuída aos consumidores.
- Subestações: São pontos de interligação do sistema, onde a tensão é transformada (por meio de transformadores), a energia é distribuída e o controle e proteção da rede elétrica são realizados. Subestações também possuem dispositivos de proteção, como disjuntores e seccionadores.
- Sistema de Distribuição: Após ser ajustada nas subestações, a energia elétrica é distribuída aos consumidores finais, como residências, comércios e indústrias, por meio das redes de distribuição.
- Cargas: São os dispositivos ou sistemas que consomem a energia elétrica, como residências, fábricas e edifícios comerciais.

A Figura 5 mostra a organização do sistema elétrico de potência padrão.

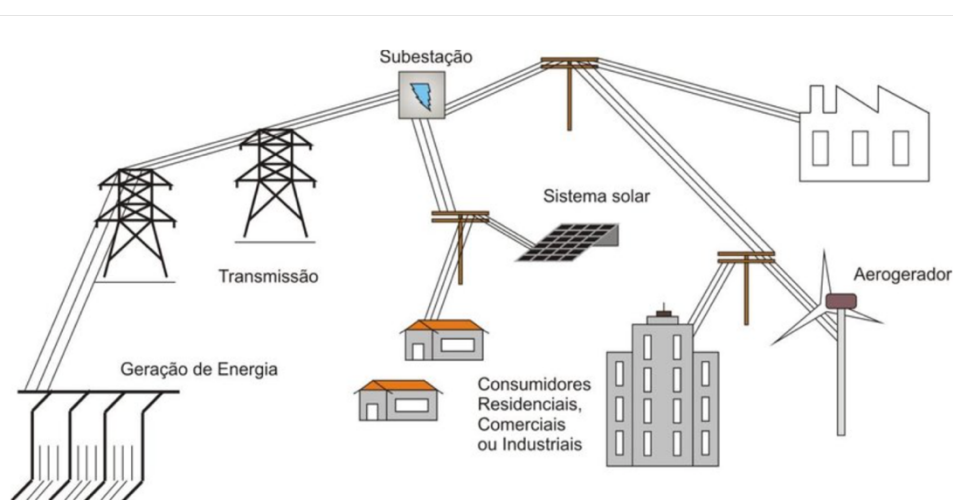
Figura 5- Sistema elétrico padrão, sem a geração distribuída



Fonte: Adaptado de ENGEHALL, (2014)

Para garantir esse fornecimento, é necessário que o sistema opere dentro dos limites de tensão e frequência, evitando falhas e interrupções. A qualidade da energia deve ser mantida, sem distúrbios como flutuações de tensão ou harmônicos, que podem afetar equipamentos. A proteção contra falhas, como curto-circuitos e sobrecargas, é essencial para preservar os equipamentos e garantir a continuidade do fornecimento. Além disso, a eficiência do sistema depende da minimização das perdas de energia, desde a geração até a distribuição. A interligação das redes de distribuição é outro fator crucial, permitindo a troca de energia entre diferentes regiões e países, o que aumenta a confiabilidade e a eficiência do sistema, facilitando a gestão da demanda. Com o avanço das tecnologias e o aumento da demanda por energia, o sistema de potência elétrica enfrenta desafios significativos. A adoção de fontes renováveis, como a solar, apresenta benefícios ambientais, mas também exige um sistema mais flexível e adaptável devido à variabilidade dessas fontes. Isso demanda um redesenho do sistema, com a integração de redes inteligentes (smart grids) e sistemas de controle avançados, que otimizam a distribuição de energia e melhoram a eficiência do sistema. A Figura 6 mostra a organização do sistema elétrico padrão com a inserção de sistemas conectados à rede. Em geral estes sistemas eram isolados, ou seja, não conectados à rede elétrica existente, porém a partir dos anos 2000 até os dias de hoje cerca de 95% são sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (EPE, 2014).

Figura 6- Sistema elétrico com a inserção de sistemas conectados à rede

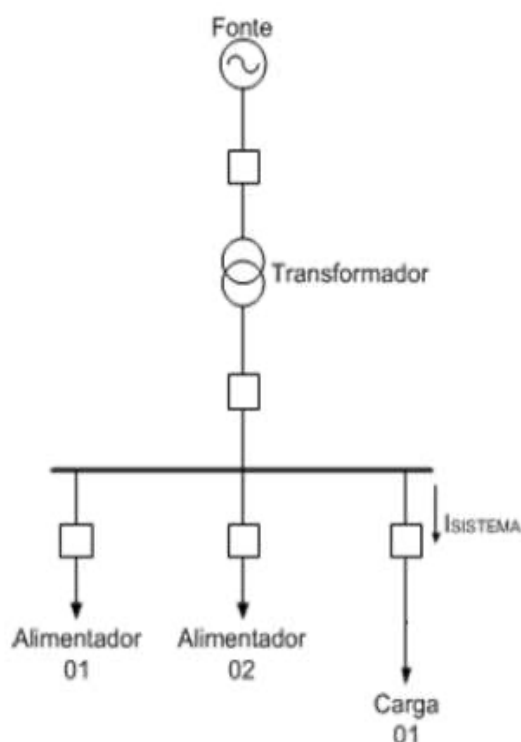


Fonte: Araujo; Molina; Moreira (2018).

O comportamento do sistema elétrico, especialmente com a integração de geração distribuída, será abordado no Capítulo 6. Antes disso, é essencial entender o sistema de proteção e as filosofias que regem o sistema elétrico brasileiro. A proteção é um aspecto crítico, pois defeitos podem envolver altas energias, e sem medidas de segurança adequadas, os danos podem ser catastróficos, afetando tanto os equipamentos quanto a segurança humana (RODRIGUES, 2013).

Os sistemas de distribuição no Brasil, em sua maioria, são tipicamente radiais, ou seja, com fluxo de potência em um único sentido: da geração para a carga (MOTA et al., 2014), conforme Figura 7.

Figura 7- Sistema de distribuição radial



Fonte: Proteção geração distribuída, MOTA et al., 2014.

Os circuitos de distribuição em média tensão, denominados de alimentadores, possuem tipicamente as proteções de sobrecorrente de fase e neutro (ANSI 50/51 e 50N/51N), além da função de religamento (ANSI 79) e verificação de sincronismo (ANSI 25) (AFFONSO, 2005 e MOTA, 2010). Estas funções são largamente utilizadas nos sistemas de distribuição no Brasil e, para a configuração radial, normalmente atendem aos requisitos de proteção e seletividade. A proteção de sistemas elétricos atua com dois grandes objetivos: evitar que falhas no sistema,

como o curto-circuito, possam danificar equipamentos e promover o rápido reestabelecimento de energia, evitando danos aos consumidores e proporcionando uma qualidade no fornecimento de energia aos usuários (ALINE,2016 e DAYANA,2016).

5.6 Proteções requeridas em sistemas de gd fv

De acordo com a ANEEL (2012), através do Prodist (Procedimento de Distribuição) módulo 3, existem alguns tipos de proteção que devem estar presentes nos sistemas que utilizam micro geradores distribuídos. Estas proteções devem ser acionados ou por equipamentos específicos de proteção (relés) ou próprios inversores presentes no sistema conectado à rede. Na Tabela 1 é possível notar com base na Resolução Normativa 687/2015 as proteções requeridas nos pontos de conexão do micro e minigeração distribuída em função da potência instalada:

Tabela 1- Proteções requeridas no ponto de conexão em função da potência instalada

PROTEÇÃO	POTÊNCIA INSTALADA		
	Menor ou igual a 75 kW	Maior que 75 kW e menor ou igual a 500 kW	Maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Sim	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim

Fonte: ANEEL Resolução Normativa 687/2015, (2015).

6 INFLUÊNCIA DA GD FV NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM ESTUDO DE CASO

A crescente inserção da GD no sistema elétrico tem alterado os parâmetros previamente estabelecidos para a operação e manutenção da rede convencional. A presença dessas novas fontes de energia modifica o fluxo de potência e pode gerar desafios operacionais, exigindo adaptações na infraestrutura elétrica para garantir a estabilidade e a qualidade do fornecimento. Diante da inserção crescente da GD, torna-se necessária a transição do modelo tradicional de sistema de distribuição, baseado em uma topologia radial, para uma configuração malhada. Essa mudança visa atender às novas exigências de confiabilidade, flexibilidade operativa e integração eficiente das unidades geradoras descentralizadas. Alguns desses efeitos e impactos serão descritos nos próximos itens deste capítulo de acordo com as pesquisas bibliográficas resultantes.

6.1 Efeitos gerais da inserção de gd fv no sistema de distribuição

Um dos principais impactos ocorre em períodos de baixa demanda e alta geração, quando a energia produzida localmente supera a demanda da região, resultando no fluxo reverso de potência. Esse fenômeno pode comprometer a regulação da tensão e da frequência, uma vez que os geradores distribuídos fotovoltaicos não são despachados diretamente pelos operadores do sistema. Além disso, a intermitência das fontes renováveis e o uso de inversores eletrônicos podem provocar oscilações na rede, exigindo uma abordagem mais robusta no planejamento e controle do sistema elétrico.

- **Flutuação da Geração e Controle da Rede**

Diferentemente das usinas tradicionais, a geração distribuída depende de fontes variáveis, como solar e eólica, cuja disponibilidade oscila ao longo do dia. Essas variações podem causar instabilidades na tensão e na frequência da rede, impactando consumidores conectados diretamente ou indiretamente à GD. Embora esses efeitos possam ser temporários, sua ocorrência frequente compromete a confiabilidade do sistema e requer estratégias avançadas de monitoramento e compensação para manter a qualidade da energia fornecida.

- Qualidade da Energia

A crescente utilização de inversores para a conversão de energia na GD introduz distorções harmônicas na rede elétrica. Segundo Naruto (2017), essas distorções podem provocar tensões ressonantes, vibrações em máquinas rotativas, superaquecimento de equipamentos, erros na medição elétrica e falhas nos sistemas de proteção. Além disso, a presença excessiva de harmônicos pode sobrecarregar condutores de neutro, degradar bancos de capacitores e gerar problemas de compatibilidade eletromagnética, afetando tanto consumidores residenciais quanto industriais.

- Fluxo de Potência Reverso e Seus Impactos

O sistema elétrico, como conhecemos, foi projetado para funcionar de forma simples: a energia é gerada em grandes usinas, passa pelas redes de transmissão e distribuição, e chega até os consumidores. Esse caminho sempre seguiu um único sentido. No entanto, com o crescimento da geração distribuída especialmente a solar fotovoltaica instalada nos telhados de casas, comércios e indústrias essa dinâmica mudou. Agora, além de consumir, muitos usuários também produzem energia e devolvem o excedente para a rede elétrica. Esse comportamento provoca o chamado fluxo reverso de potência, algo que o sistema tradicional não foi originalmente preparado para enfrentar.

Essa inversão pode trazer vários desafios. Um dos mais críticos envolve os equipamentos de proteção do sistema, como relés. Eles foram projetados para detectar falhas com base em um fluxo de energia que sempre segue do gerador para o consumidor. Quando essa lógica se inverte, esses dispositivos podem falhar na hora de agir ou até atuar de forma indevida, desligando trechos da rede sem necessidade. Como apontado por Naruto (2017), essa mudança exige ajustes técnicos e, muitas vezes, uma reconfiguração completa dos esquemas de proteção.

Além disso, a operação de transformadores e outros equipamentos da rede também pode ser afetada. Segundo Yuan et al. (2022), muitos desses componentes não foram projetados para lidar com energia fluindo no sentido contrário, o que pode comprometer seu desempenho e

segurança. Em alguns casos, a rede pode enfrentar sobrecargas localizadas, levando ao aquecimento excessivo de cabos e acelerando o desgaste do isolamento o que aumenta o risco de falhas.

Esses desligamentos desnecessários e as manutenções corretivas acabam gerando custos extras para as concessionárias e insatisfação para os consumidores, como destaca Conceição (2018). Por isso, é fundamental que as distribuidoras invistam em estudos de fluxo de potência, identifiquem pontos críticos e implementem soluções adequadas, como reforço de infraestrutura ou atualização dos sistemas de proteção (Yuan et al., 2022). Dessa forma, é possível garantir uma operação segura, eficiente e preparada para os novos tempos da geração descentralizada.

- Sobrecarga

A sobrecarga nas linhas de distribuição de energia acontece quando a corrente elétrica exigida pelos consumidores ultrapassa o que os componentes do sistema, como cabos e transformadores, foram projetados para suportar (Lucas,2024). Esse tipo de situação tem se tornado mais frequente com o crescimento acelerado da geração distribuída, especialmente em áreas onde há grande número de sistemas solares conectados à rede. Apesar dos benefícios que essa expansão traz, como maior sustentabilidade e redução de perdas, ela também representa um desafio para as distribuidoras, que precisam acompanhar de perto o comportamento da rede para evitar problemas maiores. Quando há sobrecarga, os equipamentos tendem a superaquecer, o que pode danificar o isolamento dos condutores, comprometer o funcionamento dos transformadores e, com o tempo, reduzir a vida útil de todo o sistema. Além disso, essa condição pode provocar quedas de tensão e prejudicar a qualidade da energia entregue aos consumidores, afetando especialmente aparelhos mais sensíveis (RIBEIRO, 2019).

6.2 Resultados e discussão

A influência da GD fotovoltaica na rede de distribuição foi avaliada por meio de um estudo de caso, que o parecer de acesso de duas unidades aprovados pela Equatorial Alagoas, com implicações relacionadas à inversão de fluxo. O primeiro parecer aprovado é uma unidade localizada na cidade de Marechal Deodoro, enquanto o segundo está situado em Lagoa, ambas no estado de Alagoas. Na Tabela 2 segue dados dos alimentadores dos dois casos.

Tabela 2 - Dados dos Alimentadores do Estudo de Caso

Cidades	Lagoa da Canoa	Marechal
Alimentador	01M5	BSM-C1
Coordenada (utm)	X: 751107; Y: 8919305	X: 188698; Y: 8921643
Transformador	30 kVA	112,5 kVA
Potência de geração Instalada	64,98 kWp	31 kWp
Carga Instalada	62 kW	67,75 kW







Fonte: Autor,2025

Caso Marechal

Como parte deste estudo, foi analisado um projeto de GD protocolado junto à concessionária local, a Equatorial Alagoas. A proposta é à unidade consumidora, com uma potência instalada de 31 kW. A unidade em questão possui uma carga instalada de 67,75 kW, e o sistema de geração será enquadrado no regime de compensação local. Conforme informações fornecidas no formulário de solicitação de acesso, o ponto de conexão solicitado está atualmente atendido pela Subestação Barra de São Miguel, alimentador 01C1, e o transformador de 112,5 kVA, conforme registrado na Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD). O sistema em análise possui já 4 unidades consumidoras com MMGD atendida, totalizando 45,42 kW em geração instalada conforme parecer enviado pela Equatorial/AL além disso devemos notar que a localidade possui unidades comerciais, que terá um impacto no estudo.

Figura 8- Localização da unidade geradora em Marechal/AL



Legenda	
	Transformador de Distribuição
	Transformador Particular
	Alimentador
	Unidades Consumidoras com Geração Distribuída conectadas
	Localização da Unidades Consumidora com Geração Distribuída solicitada pelo cliente
	Unidades Consumidoras com Geração Distribuída em processo de conexão

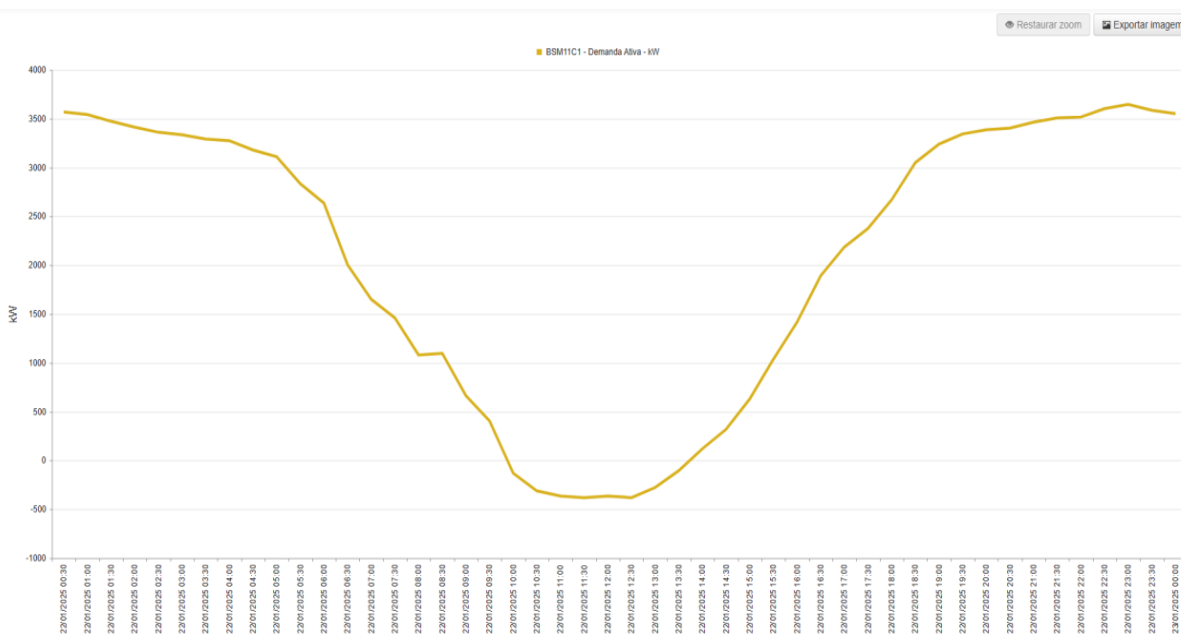
Fonte: Equatorial/AL,2025

Nos estudos realizados, após as obras para a inserção da geração de 31 kW, constatou-se inversão de fluxo no transformador 1021486 conforme evidencias Figura 9 e Figura 10 sendo, portanto, necessários obras e/ou adaptações na rede e/ou projeto do cliente para sanar a inversão de fluxo.

Ao analisar o comportamento da demanda elétrica no alimentador BSM-C1, utilizando o diagrama da rede elétrica, a tabela de carregamento e o gráfico da demanda ativa ao longo do tempo. A análise revela a influência da geração distribuída na operação do sistema, resultando em variações significativas na carga e inversões de fluxo de potência no transformador. Os dados indicam que, durante

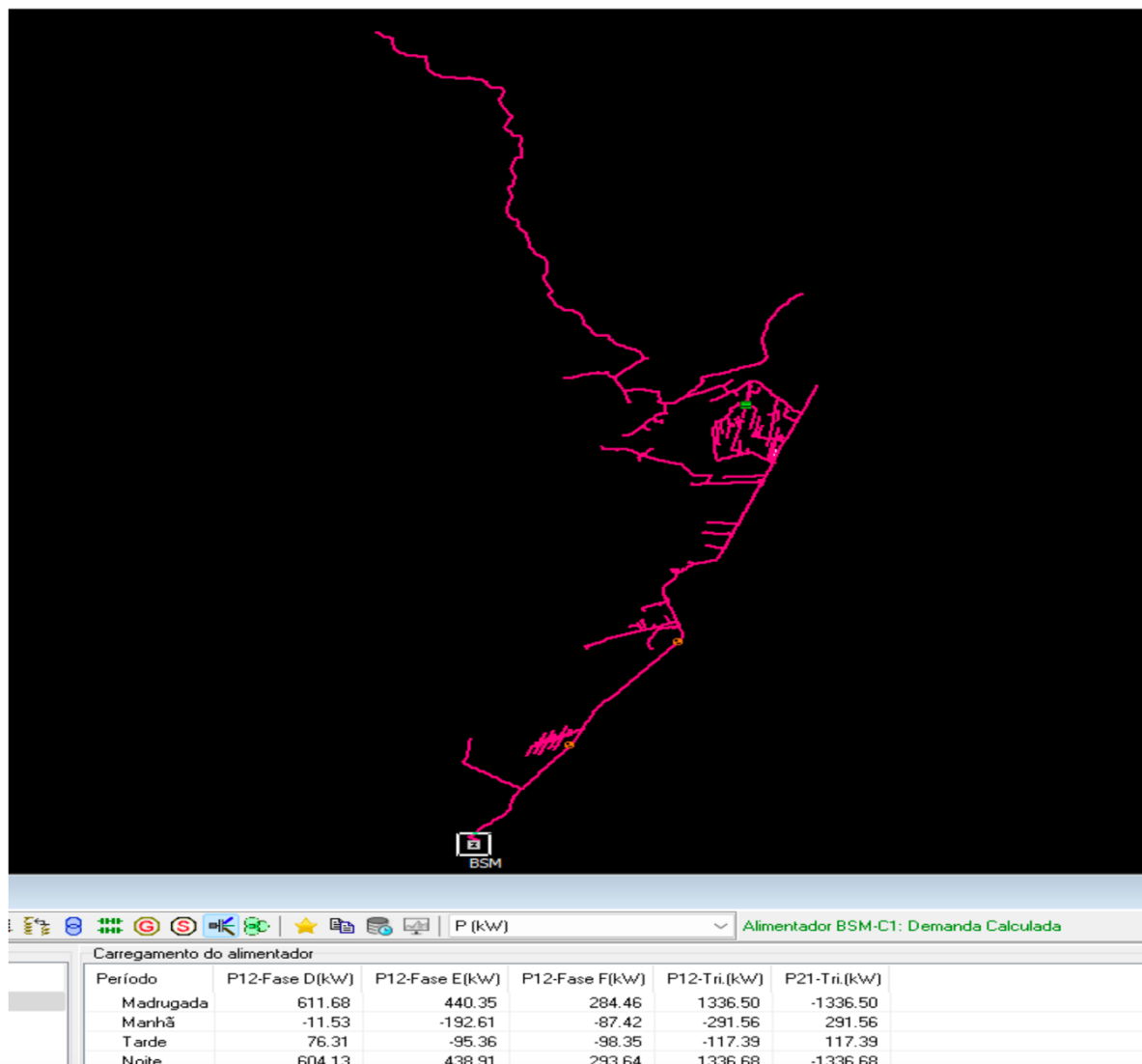
a madrugada e noite, a carga do alimentador atinge valores elevados, refletindo o aumento do consumo. No entanto, ao longo do período diurno, observa-se uma expressiva redução da demanda e, em determinados momentos, inversão do fluxo de potência, evidenciando a injeção de energia na rede, proveniente de geração fotovoltaica. O gráfico da demanda ativa Figura 9 confirma esse comportamento, apresentando um declínio progressivo do consumo até atingir valores negativos, seguido de um aumento da carga no final do dia. Os resultados demonstram a importância de um planejamento estratégico da rede elétrica, considerando os impactos da geração distribuída na estabilidade do sistema.

Figura 9 - Leitura DEMANDA ATIVA (kW) Alimentador BSM 01C1 com Inversão de Fluxo



Fonte: Parecer de Acesso, 2025

Figura 10 – Alimentador BSM-C1 com Inversão de Fluxo



Fonte: Parecer de Acesso,2025

Seguindo com a análise, usaremos dois cenários no alimentador BSM-C1, fazendo um diagnóstico hora em hora, para dia útil, sábado e domingo, avaliando os impactos da adição de uma nova unidade GD sobre o fluxo de potência.

Cenário 1: 4 unidades de GD conectadas.

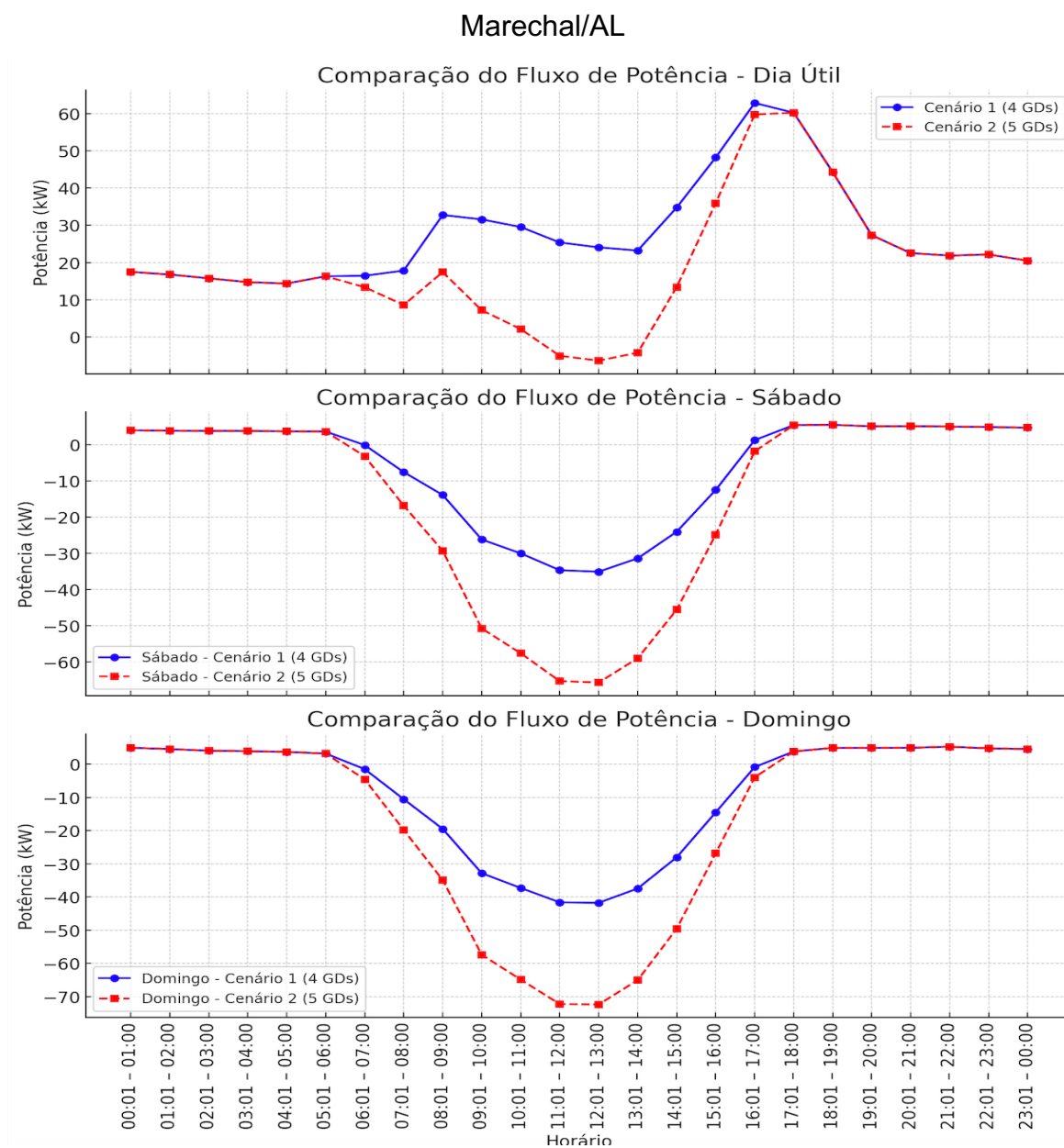
Cenário 2: 5 unidades de GD conectadas.

No cenário 1 o alimentador BSM-C1 apresentava um comportamento equilibrado (Figura 11), com geração e consumo relativamente estáveis. O fluxo reverso ocorria em menor escala, com potência mínima de -35,07 kW aos sábados e -41,75 kW aos domingos durante o meio-dia.

Após a conexão da quinta unidade GD, o fluxo reverso se intensificou, principalmente entre 10h e 14h, atingindo -65,66 kW aos sábados e -72,35 kW aos domingos. Além disso, o período de injeção de potência na rede se antecipou, com a reversão do fluxo começando já às 11h nos dias úteis.

Esse aumento significativo pode causar elevação de tensão, descoordenação de proteções e impactos na qualidade da energia.

Figura 11- Diagnostico hora em hora, para dia útil, sábado e domingo, cenário 1 e 2



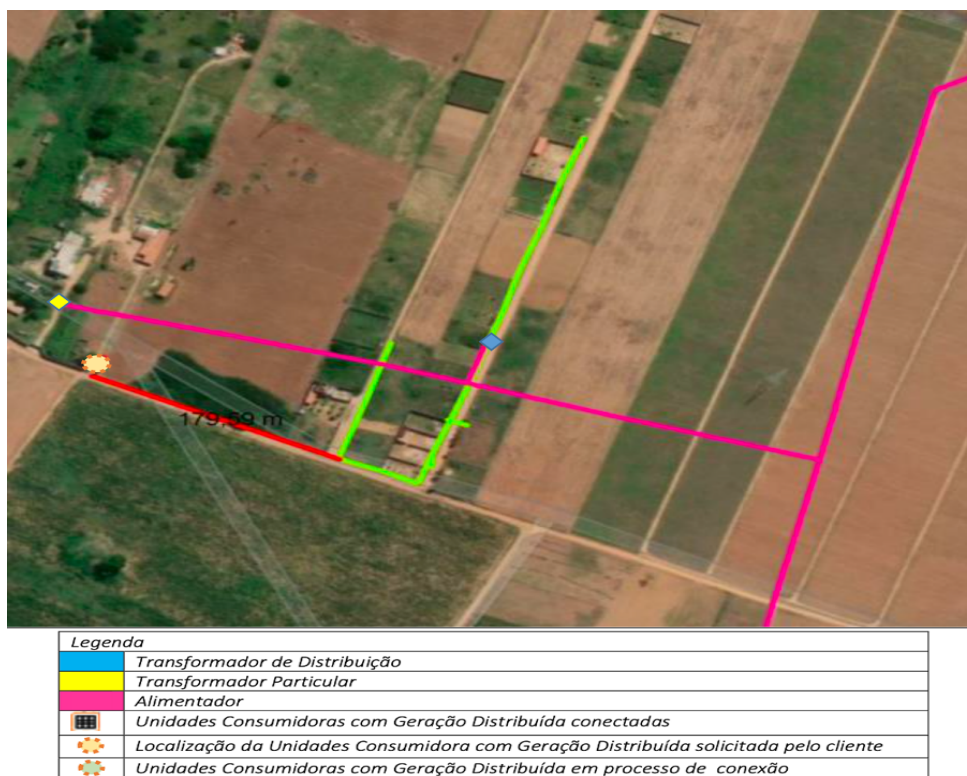
Fonte: Autor, (2025)

Portanto, visando atender ao critério de não inversão de fluxo de potência, conforme estabelece o Art.73 da REN 1000/2021, atualizada via REN 1.098; para conexão da GD, é necessário avaliar as alternativas de Atendimento. Essas alternativas serão enumeradas no capítulo 7.

Caso Lagoa da Canoa

Foi protocolado junto à concessionária um projeto de geração distribuída (GD) gerando número da UC o número da instalação: 2000136421, com potência instalada total de 64,98 kW. A unidade em questão possui uma carga instalada de 62kW, e o sistema de geração será enquadrado no regime de compensação local. Conforme localização informada no formulário de solicitação de acesso, o ponto de conexão solicitado é atualmente atendido pela Subestação ARAPIRACA II, alimentador 01M5, transformador 1025767 de 30 KVA Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD). O sistema em análise possui já 9 unidades consumidoras com MMGD atendida, totalizando 68,98 kW em geração instalada.

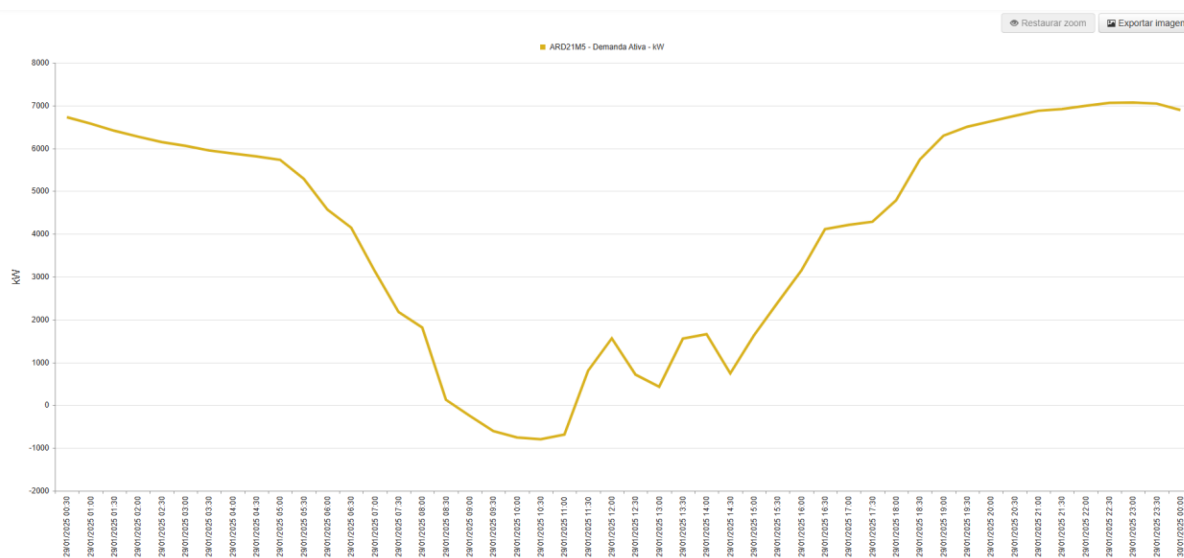
Figura 12 - Localização da unidade geradora em Lagoa Da Canoa/AL



Nos estudos realizados, após as obras para a inserção da geração de 64,98 kW, constatou-se inversão de fluxo no transformador 1025767 conforme evidências Figura 13 e Figura 14 sendo, portanto, necessários obras e/ou adaptações na rede e/ou projeto do cliente para sanar a inversão de fluxo. Ao analisar o comportamento do alimentador ARD-M5, evidenciando a inversão de fluxo de potência causada pela alta penetração de sistemas fotovoltaicos.

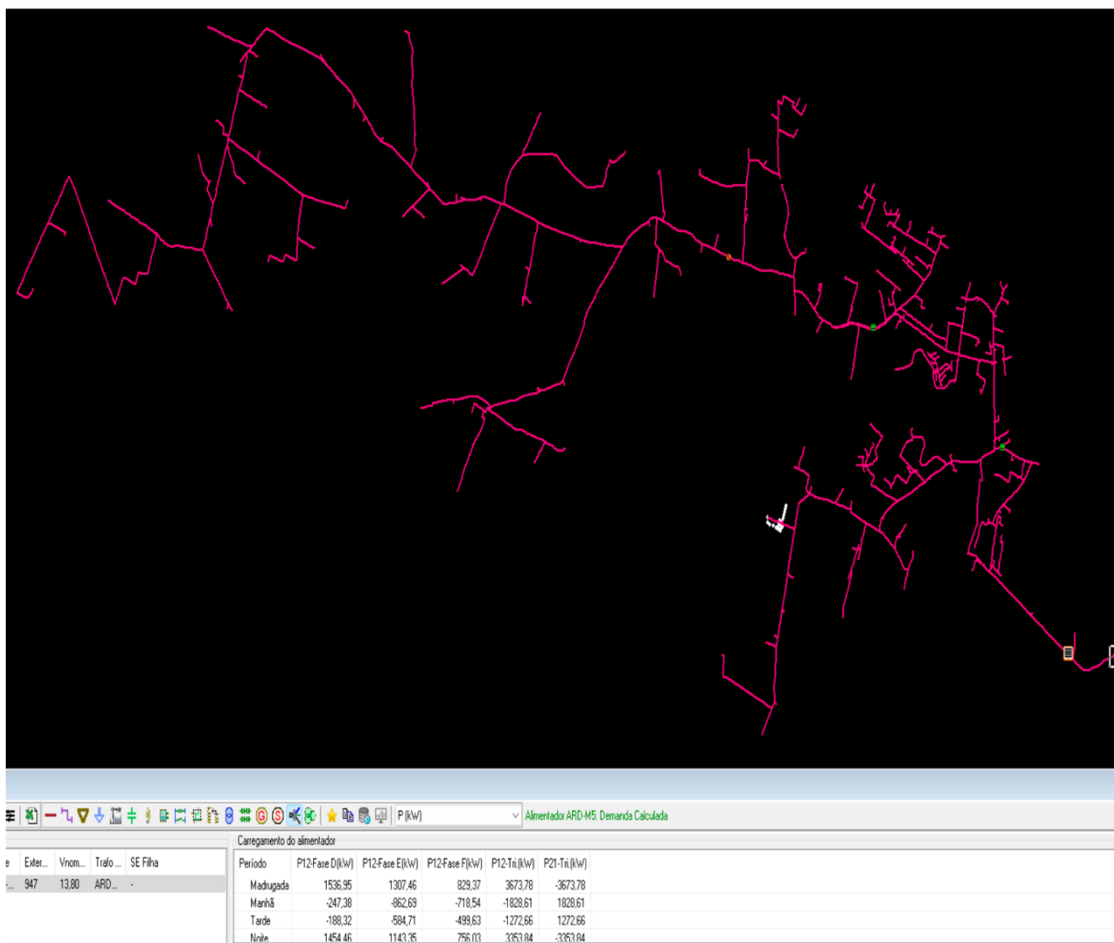
A Figura 14 mostra a topologia do alimentador ARD-M5, destacando os fluxos de potência e uma tabela com medições de carga em diferentes períodos do dia. Observa-se que, em determinados momentos, a potência ativa assume valores negativos, indicando que a energia gerada localmente excede a demanda, sendo injetada na rede. Na figura 13, o gráfico de demanda ativa (kW), confirma esse comportamento. Inicialmente, a carga do alimentador é positiva, próxima de 7.000 kW, mas à medida que a geração distribuída aumenta pela manhã, a demanda reduz gradualmente, atingindo um valor mínimo de aproximadamente -1.000 kW, caracterizando a inversão de fluxo. Durante o restante do dia, a carga volta a crescer e retorna a valores positivos. Esse fenômeno traz desafios operacionais significativos, como elevação da tensão, comprometendo a qualidade do fornecimento, além de exigir ajustes nos dispositivos de proteção, como religadores e relés, que normalmente são configurados para fluxos unidirecionais. Além disso, a redução da demanda líquida pode impactar o fator de carga da subestação, tornando o planejamento da rede mais complexo.

Figura 13 - Leitura Demanda Ativa (kW) Alimentador ARD 01M5 com Inversão de Fluxo pela manhã Lagoa De Canoa



Fonte: Equatorial/AL, 2025

Figura 14– Alimentador ARD-M5 com Inversão de Fluxo



Fonte: Equatorial/AL,2025

Usaremos dois cenários no alimentador ARD-M5, fazendo um diagnóstico hora em hora, para dia útil, sábado e domingo, avaliando os impactos da adição de uma nova unidade GD sobre o fluxo de potência.

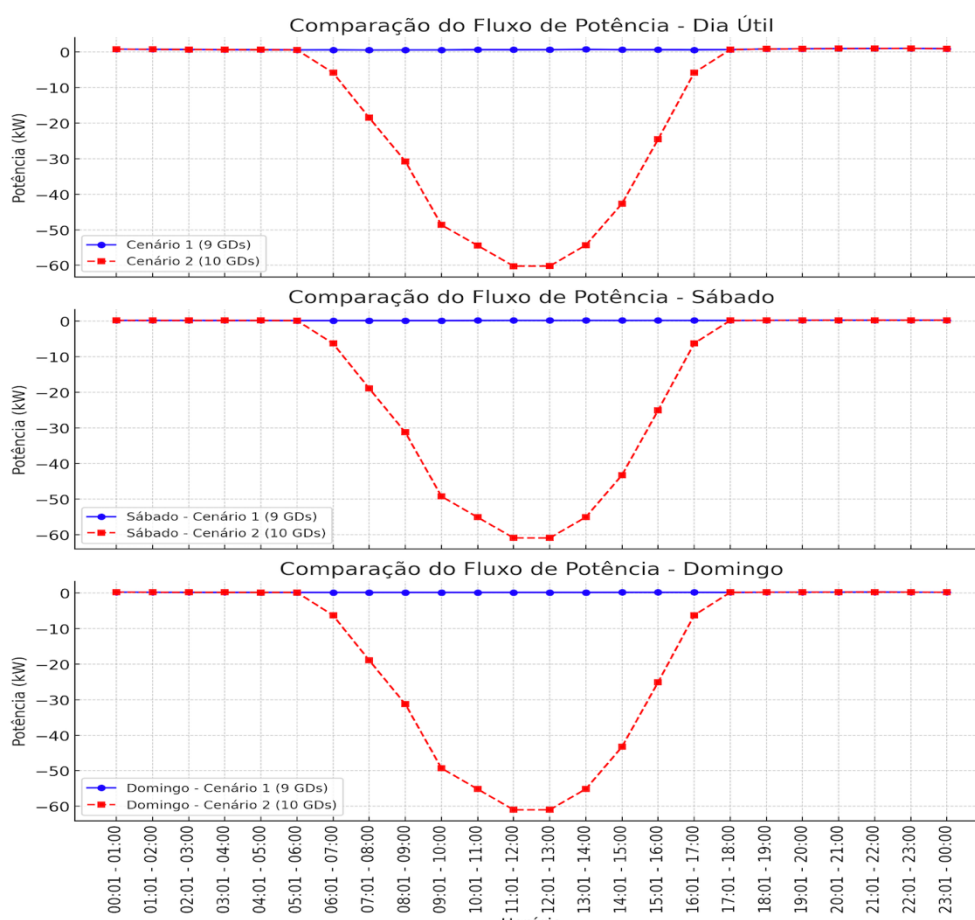
Cenário 1: 9 unidades de GD conectadas.

Cenário 2: 10 unidades de GD conectadas.

A análise do fluxo de potência desse alimentador pode ser feita observando o comportamento da potência nos diferentes cenários e dias apresentados no gráfico. O Cenário 1 (representado por pontos azuis) mantém um fluxo de potência estável em zero, sugerindo equilíbrio entre geração e consumo. O Cenário 2 (representado por pontos vermelhos) mostra um comportamento de exportação de potência durante o período do dia (aproximadamente entre 07:00 e 17:00), indicando uma maior penetração de geração distribuída (GD).

Figura 15 - Diagnóstico hora em hora, para dia útil, sábado e domingo, cenário 1 e 2

Lagoa de Canoa



Portanto como neste caso, visando atender ao critério de não inversão de fluxo de potência, conforme estabelece o Art.73 da REN 1000/2021, atualizada via REN 1.098; para conexão da Geração Distribuída tem que avalia as alternativas de Atendimento.

Os estudos desses dois casos evidenciam que a inserção de novas unidades GD pode causar inversão de fluxo de potência, exigindo ações corretivas para mitigar impactos na rede elétrica. O planejamento estratégico e a adoção de tecnologias de controle são essenciais para a integração eficiente da geração distribuída, garantindo a estabilidade do sistema e a qualidade do fornecimento de energia.

7 SOLUÇÕES PARA A INTEGRAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTVOLTAICA NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO

Com o avanço cada vez mais rápido da GD, principalmente por meio da energia solar fotovoltaica, surgem também novos desafios para as redes de distribuição de energia no Brasil. A rede, que foi originalmente pensada para receber energia de grandes usinas e distribuí-la de forma unidirecional, agora precisa se adaptar a uma realidade diferente, com milhares de pequenos geradores espalhados pelos bairros, empresas e residências. Isso tem gerado situações como variações de tensão, fluxo de energia no sentido inverso, sobrecarga em equipamentos e dificuldades no controle da qualidade da energia. Para lidar com essa nova dinâmica e garantir que a GD continue crescendo de forma segura e eficiente, soluções técnicas e estratégicas vêm sendo desenvolvidas por especialistas, empresas e instituições do setor elétrico.

Neste capítulo, serão apresentadas as principais soluções que vêm sendo adotadas para permitir uma integração mais eficiente entre a geração distribuída e a rede de distribuição.

7.1 Cálculo da potência de geração distribuída compatível com o consumo da unidade

Conforme o disposto no § 1o do Art. 73-A da Resolução Normativa Aneel 1.098, de 23 de julho de 2024, a equação abaixo apresenta o cálculo da potência de

geração distribuída compatível com o consumo da unidade consumidora (ANEEL, 2024). Os parâmetros de cálculo estão descritos na Tabela 3:

$$Pg = \frac{C}{FC * 24 \text{ horas} * 30 \text{ dias}} * FA \quad (1)$$

Em que:

P = Potência de geração distribuída compatível com o consumo da unidade consumidora, já arredondando para o número inteiro subsequente.

C = Consumo da Unidade consumidora, obtido pela média aritmética dos valores faturados nos 12 últimos ciclos de faturamento;

FC = Fator de capacidade (16% para fonte solar)

FA = Fator de ajuste, conforme Tabela 3:

Tabela 3 - Fator de ajuste

Classe	Residencial	Industrial	Comércio, serviços e outras atividades	Rural	Serviço Público
Valor de Referência	46%	69%	63%	53%	57%

Fonte: Equatorial/AL, 2025

Este cálculo da potência compatível de geração permite identificar a potência que uma unidade pode instalar sem gerar um fluxo reverso ou alterações significativas na rede de distribuição.

7.2 Fast track

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) aprovou, em 23 de julho de 2024, alterações na Resolução Normativa nº 1.000/2021, visando simplificar a conexão de consumidores de microgeração e minigeração distribuída. Nesta resolução, a modalidade Fast-track permite que os consumidores residenciais e pequenos comércios que instalarem sistemas de geração com potência de até 7,5 kW poderão se beneficiar de um processo mais ágil que dispensam-se os estudos de inversão de fluxo, desde que a energia gerada seja consumida integralmente na própria unidade, sem injeção na rede. O consumidor deve assinar um termo declarando que os excedentes de energia não serão compartilhados com outras unidades consumidoras.

7.3 Armazenamento em baterias

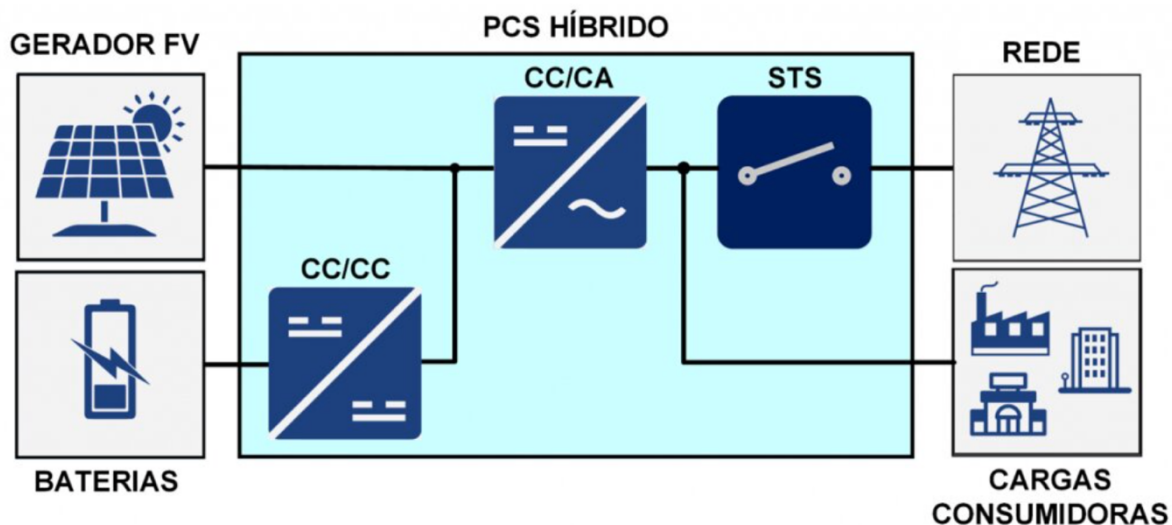
Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (Battery Energy Storage Systems – BESS) vêm se destacando como soluções essenciais para o equilíbrio do sistema elétrico, especialmente com o crescimento da geração por fontes renováveis intermitentes, como a solar e a eólica. Esses sistemas operam armazenando o excedente de energia durante períodos de baixa demanda ou alta produção, e liberando-a em momentos de pico de consumo ou queda na geração, contribuindo significativamente para o controle da frequência da rede e para a estabilidade do fornecimento (IBERDROLA, 2025).

Além da função de armazenamento, os BESS modernos integram sistemas avançados de gerenciamento, como o Battery Management System (BMS) e o Energy Management System (EMS), que monitoram o desempenho das baterias, otimizam a operação e garantem segurança e durabilidade. A diferenciação em relação a baterias convencionais está na inteligência embarcada: softwares baseados em dados e algoritmos de inteligência artificial permitem identificar os momentos ideais para carga e descarga, maximizando a eficiência energética e a integração com a rede elétrica (IBERDROLA, 2025).

No contexto de grandes consumidores, como indústrias e centros comerciais, os BESS são também utilizados para fins estratégicos de gestão tarifária. Tais sistemas viabilizam o energy time-shift, com carregamento em horários de tarifa reduzida e descarregamento no horário de ponta, resultando em economia significativa e também ajudando a equilibrar a oferta e a demanda de energia na rede elétrica. Além disso, operam no modo peak shaving, evitando penalidades por ultrapassagem de demanda contratada, e fornecem backup de energia em casos de falha da rede (CANAL SOLAR, 2024). Modelos modulares, como os da PHB Solar, alcançam até 500 kVA de potência e 1,96 MWh de capacidade, e incluem climatização, monitoramento remoto e sistemas anti-incêndio, sendo ideais para aplicações críticas.

Ademais, o uso disseminado de sistemas BESS também contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa, ao maximizar a utilização da energia gerada por fontes limpas e diminuir a dependência de termelétricas a combustíveis fósseis. Dessa forma, os BESS se consolidam como pilares da transição energética, promovendo maior segurança, flexibilidade e sustentabilidade ao sistema elétrico.

Figura 16 – Funcionamento do BESS



Fonte: Canal Solar,2022

7.4 Grid-zero

O modelo grid zero tem se consolidado como uma solução eficiente para otimizar o uso da energia solar gerada localmente, especialmente diante das limitações impostas pelas distribuidoras em relação à injeção de energia excedente na rede elétrica. Nesse modelo, a energia gerada é utilizada exclusivamente para atender ao consumo da unidade consumidora, sem ser injetada de volta para a rede pública. Isso contribui para o equilíbrio da rede elétrica, pois elimina o risco de sobrecarga nas redes de distribuição, ao mesmo tempo em que maximiza o autoconsumo e evita custos adicionais com a utilização da infraestrutura da distribuidora (ECORI ENERGIA SOLAR, 2024).

No Brasil, a ANEEL tem incentivado a adoção do grid zero por meio de atualizações nas normativas de microgeração distribuída. A Resolução Normativa nº 1.000/2021, revisada em 2024, trouxe novas diretrizes para simplificar a conexão dos sistemas de geração distribuída, sem exigir a injeção de energia na rede. Isso possibilita que consumidores de pequeno porte possam gerar sua própria energia e utilizá-la de forma eficiente, sem comprometer a infraestrutura das distribuidoras (GOV.BR, 2024).

Ao restringir ou eliminar a injeção de energia na rede, o modelo grid zero contribui diretamente para a estabilidade da rede elétrica, garantindo que a energia gerada seja consumida localmente. Isso evita a sobrecarga da rede elétrica,

que, caso contrário, precisaria lidar com o excedente de energia. Além disso, esse modelo tem um papel importante em áreas com infraestrutura elétrica mais restrita, onde as distribuidoras já enfrentam dificuldades para absorver grandes volumes de energia excedente (PV MAGAZINE BRASIL, 2024).

Esse sistema também é vantajoso para consumidores comerciais, industriais e agrícolas, onde a demanda por energia contínua é alta, como em processos de irrigação ou operação de máquinas. O grid zero oferece uma solução prática, permitindo que esses setores aproveitem a energia gerada sem depender da rede elétrica, contribuindo para um uso mais eficiente e sustentável da energia.

Em suma, o grid zero não apenas facilita a geração e o consumo local de energia, mas também promove a sustentabilidade e a eficiência do sistema elétrico como um todo, ao reduzir a pressão sobre a infraestrutura da rede e contribuir para um futuro energético mais equilibrado e sustentável.

7.5 Mercado livre de energia

O Mercado Livre de Energia permite que consumidores escolham seus fornecedores de energia, possibilitando a compra de eletricidade a preços competitivos e a utilização de fontes renováveis, como solar e eólica. Esse modelo contribui para a redução do impacto na rede de distribuição de energia de diversas formas. Primeiramente, ao descentralizar a geração de energia, reduz-se a sobrecarga nas redes tradicionais, que dependem de grandes usinas. Além disso, o mercado livre facilita a redução de picos de demanda, permitindo que consumidores aproveitem tarifas mais baixas e ajustem o consumo para horários de menor demanda.

O mercado livre também incentiva o uso de tecnologias de gestão inteligente, promovendo um consumo mais eficiente e sustentável de energia. Com essas práticas, o Mercado Livre de Energia torna a rede elétrica mais estável, resiliente e eficiente, contribuindo para a sustentabilidade do sistema energético.

7.6 Uso de inversor híbrido

O uso de inversores híbridos tem ganhado relevância no contexto da modernização do setor elétrico brasileiro, especialmente em conformidade com as diretrizes da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 e suas atualizações, que regulamentam a geração distribuída no país. Esses dispositivos possibilitam uma

gestão energética mais eficiente ao integrarem geração fotovoltaica, armazenamento em baterias e consumo local, proporcionando maior controle e previsibilidade sobre o fluxo de energia elétrica. Ao combinarem as funcionalidades dos sistemas conectados à rede (on-grid) e dos sistemas isolados (off-grid), os inversores híbridos permitem o funcionamento tanto com a rede elétrica convencional quanto com um banco de baterias. Essa característica torna a tecnologia particularmente adequada para regiões com instabilidade no fornecimento de energia ou para projetos que buscam maior autonomia energética, oferecendo flexibilidade operacional e maior segurança no suprimento de carga.

7.7 Controle volt-var e volt-watt

O controle Volt-Watt consiste na limitação da potência ativa injetada na rede quando a tensão ultrapassa um limite superior estabelecido. Quando a tensão do sistema de geração aumenta acima de um valor de referência (v_1), a potência ativa é reduzida linearmente para que a tensão retorne aos limites aceitáveis. Caso a tensão ultrapasse o limite superior (v_2), a injeção de potência ativa pode ser completamente anulada (IEEE, 2022). De acordo com Wanzeler et al. (2018), essa estratégia é eficaz em cenários de alta geração de potência ativa e baixo carregamento da rede, mas pode resultar no corte de geração, impactando tanto operacionalmente quanto financeiramente os consumidores.

Por outro lado, o controle Volt-VAR regula a potência reativa injetada ou absorvida pela unidade geradora, ajustando a tensão no ponto de conexão à rede elétrica. Quando a tensão excede o limite superior, o inversor opera na região indutiva, absorvendo potência reativa; quando a tensão cai abaixo do limite inferior, o inversor entra em região capacitiva, injetando potência reativa para aumentar a tensão (IEEE, 2022). Embora esse controle ofereça benefícios significativos, especialmente para preservar a geração da unidade geradora, a injeção de potência reativa pode aumentar as perdas técnicas no sistema, o que exige uma análise cuidadosa de sua implementação (CARLETTE, 2019).

No estudo de Ribeiro (2024), foi evidenciado que a implementação dos controles Volt-Var e Volt-Watt em sistemas de distribuição de energia elétrica pode contribuir significativamente para a estabilidade da rede, especialmente quando integrados com a geração distribuída, como no caso de usinas fotovoltaicas. Esses controles mostraram-se eficazes na regulação da tensão e no aproveitamento da

potência gerada, proporcionando uma melhoria nas condições operacionais da rede elétrica.

7.8 Integração com microredes

As microredes (ou microgrids) são sistemas elétricos locais que integram recursos energéticos distribuídos (REDs) como geração fotovoltaica, eólica, armazenamento de energia e cargas controláveis, operando de forma autônoma ou conectada à rede elétrica principal. Sua principal característica é a capacidade de isolar-se da rede convencional e operar de maneira independente, mantendo o fornecimento de energia local mesmo em situações de falhas externas (ROSA, 2022). Segundo Rosa (2022), as microredes são uma das respostas mais promissoras à crescente complexidade e descentralização do sistema elétrico, alinhando-se às metas globais de transição energética, descarbonização e resiliência. Elas permitem maior flexibilidade operacional, redução de perdas na transmissão e melhoria na confiabilidade do suprimento energético, especialmente em regiões remotas ou com baixa qualidade de fornecimento. As microredes são sistemas que integram, de forma coordenada, cargas, recursos energéticos distribuídos e dispositivos de armazenamento, com a capacidade de operar tanto conectadas à rede elétrica principal quanto de maneira autônoma, em modo isolado (ROSA, 2022, p. 2). Ainda segundo o estudo, as microredes podem desempenhar papel fundamental na construção de um sistema elétrico mais eficiente, resiliente e sustentável, especialmente em contextos onde a eletrificação de setores e o uso de fontes renováveis crescem rapidamente. Elas se destacam também por facilitar a participação ativa dos consumidores, que passam a atuar como “prossumidores”, isto é, consumidores que também produzem energia. Contudo, sua adoção em larga escala ainda enfrenta desafios regulatórios e técnicos no Brasil, uma vez que a estrutura normativa do setor elétrico ainda é orientada para sistemas centralizados, dificultando a inserção plena das microredes no ambiente regulado (ROSA, 2022).

Figura 17- Integração com Microredes



Fonte: Legado Energias Renováveis (2020)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar os impactos da inserção da GD fotovoltaica no sistema de distribuição de energia elétrica no estado de Alagoas. Por meio de uma fundamentação teórica e da análise de dois estudos de caso, foram identificados efeitos técnicos relevantes, como a inversão do fluxo de potência, elevações de tensão, distorções harmônicas e desafios relacionados à proteção do sistema.

Os resultados demonstraram que, embora a GD proporcione benefícios econômicos, ambientais e operacionais, sua integração em larga escala exige um planejamento técnico criterioso, atualizações na infraestrutura da rede e investimentos em tecnologias de monitoramento, controle e proteção. A modernização da rede, com a adoção de soluções como sistemas de armazenamento em baterias, inversores híbridos, microrredes, o modelo Grid Zero e a flexibilização proporcionada pelo Mercado Livre de Energia, mostrou-se estratégica para mitigar impactos negativos e maximizar os ganhos da geração descentralizada.

Nos estudos de caso de Marechal Deodoro e Lagoa da Canoa, observou-se que o controle da injeção de energia, aliado ao armazenamento de excedentes, contribui para evitar sobrecargas, fluxos reversos e desequilíbrios na distribuição. Além disso, a substituição de componentes da rede, como cabos e transformadores, bem como a implantação de sistemas de supervisão e automação, é medidas essenciais para garantir a estabilidade operacional.

A crescente presença da GD impõe a necessidade de um controle mais refinado sobre sua operação e de mecanismos que viabilizem a participação ativa do consumidor na estabilidade da rede. Torna-se fundamental discutir, por exemplo, compensações financeiras para unidades geradoras que precisem limitar a injeção de potência ativa ou prestar suporte à rede. Apesar de já existirem diretrizes regulatórias que permitem essas ações, sua aplicação prática ainda encontra obstáculos institucionais e pouca atratividade econômica.

Conclui-se, portanto, que a expansão sustentável da GD no Brasil especialmente em estados como Alagoas deve estar alinhada a políticas públicas eficazes, ao fortalecimento da infraestrutura das concessionárias e à criação de modelos regulatórios e econômicos que incentivem a integração segura e eficiente

da geração distribuída. Assim, será possível promover uma matriz elétrica mais moderna, resiliente e sustentável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 12**, vigente a partir de 01 jan. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.098, de 23 de julho de 2024**. Dispõe sobre aprimoramento da Resolução Normativa nº 1.000/2021 e estabelece diretrizes para análise de inversão de fluxo de potência em sistemas de geração distribuída e regulamenta o Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 31 jul. 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20241098.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2025.

ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica. Micro e minigeração distribuída apresenta acréscimo de 7,4 GW em 2023**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/micro-e-minigeracao-distribuida-apresenta-acrescimo-de-7-4-gw-em-2023>. Acesso em: mai. 2025.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.030, de 26 de julho de 2022**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.

ANEEL.AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 1 – Introdução. Revisão 10**. Brasília: ANEEL, 2018. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2018842_prodist_modulo_1_v10.pdf. Acesso em 18/05/2025

ARAUJO, Clivaldo; MOLINA, Yuri P.; MOREIRA, Alex. **Alocação e Dimensionamento de Painéis Fotovoltaicos Utilizando Otimização por Enxame de Partículas para Reduzir as Perdas Visando os Aspectos Econômicos**. Relatório Técnico, ago. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-21-CONCEITO-DE-GERACAO-DISTRIBUIDA_fig1_336567392. Acesso em: 3 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSOLAR. **Solar deve adicionar mais de 9 GW e R\$ 39 bi em 2024**. Canal Energia, 24 jan. 2024. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53268790/solar-deve-adicionar-mais-de-9-gw-e-r-39-bi-em-2024>. Acesso em: 3 maio 2025.

BARATELI, W. P. **Avaliação dos impactos da inserção massiva da geração solar fotovoltaica em redes de distribuição de energia elétrica**. Rosana, 2021.

CANAL ENERGIA. **GD começa 2024 com 25,8 GW no Brasil**. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53267396/gd-comeca-2024-com-258-gw-no-brasil>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

CANAL SOLAR. **ANEEL publica resolução sobre inversão de fluxo de energia**. Canal Solar, 19 mar. 2024. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/aneel-resolucao-inversao-de-fluxo-diario-oficial/>>. Acesso em: 3 maio 2025.

CANAL SOLAR. **BESS: solução para gerenciar energia no horário de ponta e backup**. 2024. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/bess-solucao-para-gerenciar-energia-no-horario-de-ponta-e-backup/>>. Acesso em: 1 maio 2025.

CANAL SOLAR. **Crescimento expressivo da GD em MG pode trazer impactos na rede, afirma ONS**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/crescimento-expressivo-da-gd-em-mg-pode-trazer-impactos-na-rede-afirma-ons/>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

CARLETTE, L. **Análise do impacto de inversores inteligentes aplicados a redes de baixa tensão**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CORDEIRO, A. F.; PINTO, W. D. A. F. **Impactos da geração distribuída fotovoltaica no sistema de distribuição de energia elétrica**. 2016. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2008.

GREEN, M. A. **Crystalline silicon photovoltaic cells**. *Advanced Materials*, v. 13, p. 1019, 2001. [CrossRef].

IBEIRO, Affonso Calsing. **Análise do efeito dos controles Volt-Var e Volt-Watt da geração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2024. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/279327>>. Acesso em: 3 maio 2025.

IBERDROLA. **BESS: o que são e como funcionam**. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/armazenamento-energia/bess>>. Acesso em: 1 maio 2025.

IEEE. **Guide for Using IEEE Std 1547 for Interconnection of Energy Storage Distributed Energy Resources with Electric Power Systems**. New York: IEEE, 2022. 87 p.

JUNIOR, J. U. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. 2010. 189 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MORI, V.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

PAULI, F. H. **Sistema de geração de energia elétrica a partir de fonte solar fotovoltaica com injeção de potência na rede elétrica utilizando microcontrolador**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/279327/001211646.pdf>>. Acesso em: 3 maio 2025.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2020.

PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2030. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/energia/plano-decenal>. Acesso em: 3 maio 2025.

ROCHA, Ludmylla. **Governo aprova Plano Decenal de Energia 2030**. *Poder360*, 26 fev. 2021. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/governo/governo-publica-portaria-com-plano-decenal-de-energia-2030/>. Acesso em: 3 maio 2025.

ROSA, L. A. M. **Microrredes: benefícios e desafios para o setor elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro: GESEL/UFRJ, 2022. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/10_Rosa_2022_02_02.pdf. Acesso em: 11 maio 2025.

SOUZA, J. F. et al. **Tendências tecnológicas na energia solar fotovoltaica**. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 35, n. 3, p. 105-112, 2021.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

WANZELER, T. M. et al. **Avaliação do desempenho das funções de controle volt-watt e volt-var em inversores fotovoltaicos integrados nas redes de distribuição**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

YUAN, Y. et al. Inverse Power Flow Problem. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, v. 10, n. 1, p. 261-273, 2022.