

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

THIAGO LIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA POR PAINÉIS
SOLARES FOTOVOLTAICOS NO SISTEMA DE BAIXA TENSÃO: UMA
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS NO GERENCIAMENTO DA REDE ELÉTRICA**

Cajazeiras-PB
2023

THIAGO LIRA DOS SANTOS

**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 submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Me. José Tavares de Luna Neto e Coorientação de Prof. Esp. Bruno Cardoso de Andrade.

Cajazeiras-PB
2023

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

| | |
|-------|---|
| S237a | <p>Santos, Thiago Lira dos. Análise dos impactos da geração distribuída por painéis solares fotovoltaicos no sistema de baixa tensão : uma avaliação dos efeitos no gerenciamento da rede elétrica / Thiago Lira dos Santos.– 2023.</p> <p>35f. : il.</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.</p> <p>Orientador(a): Prof. Me. José Tavares de Luna Neto. Coorientador(a): Prof. Esp. Bruno Cardoso de Andrade.</p> <p>1. Energia solar. 2. Painéis fotovoltaicos. 3. Rede de distribuição. 4. Sistema de baixa tensão - Análise. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.</p> |
|-------|---|

THIAGO LIRA DOS SANTOS

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 submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, *Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 07 de Dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



JOSE TAVARES DE LUNA NETO

Data: 15/12/2023 11:38:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Tavares de Luna Neto – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

BRUNO CARDOSO DE
ANDRADE:08687476450

Assinado de forma digital por
BRUNO CARDOSO DE

ANDRADE:08687476450

Dados: 2023.12.15 05:56:49 -03'00'

Bruno Cardoso de Andrade – Engenheiro Civil
Coorientador

Documento assinado digitalmente



GASTAO COELHO DE AQUINO FILHO

Data: 14/12/2023 10:11:13-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gastão Coelho de Aquino Filho – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador

A Deus, fonte inesgotável de sabedoria e inspiração divina. Que este trabalho seja não apenas um reflexo do meu esforço, mas também uma homenagem ao amor e à fé que sempre me cercaram. Que cada palavra escrita seja um tributo a essa jornada compartilhada, marcada pela dedicação, paciência e apoio mútuo.

AGRADECIMENTOS

É difícil colocar em palavras o quanto sou grato(a) por todas as bênçãos que recebi. Agradeço de coração a Deus por me guiar com sua força e orientação, ajudando-me a superar os desafios da vida. Cada dia é uma dádiva preciosa que encaro com humildade e alegria.

Aos meus amados pais, Janiceli Oliveira Lira dos Santos e Aristirone Pereira dos Santos, e à minha querida irmã, Thaisa Lira dos Santos, minha base sólida e fonte inesgotável de inspiração. Levanto-me todos os dias motivado pelos seus exemplos e amor incondicional. A vocês, dedico todo o meu amor e gratidão.

À minha amada namorada, Emanuely Abrantes Pereira, agradeço por seu amor constante, carinho e apoio incansável. Sua crença em mim me impulsiona a alcançar os meus sonhos. Obrigado por estar sempre ao meu lado, me acalmando nos momentos difíceis e motivando-me a seguir em frente.

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *Campus Cajazeiras*, expresso minha sincera gratidão por proporcionar um ambiente educacional excepcional que enriqueceu minha jornada acadêmica. Aos meus estimados professores, em particular ao Prof. Gastão Coelho de Aquino Filho, M. Sc., cuja orientação foi inestimável, e ao dedicado orientador de TCC, José Tavares de Luna Neto, agradeço por compartilharem seu conhecimento e experiência, moldando meu entendimento e paixão pela minha área de estudo. Suas aulas e orientações foram luzes em meu caminho, orientando-me para um futuro promissor.

Da mesma forma, expresso meus agradecimentos aos profissionais da engenharia e construção que cruzaram meu caminho durante o período de estágio. Quero destacar a contribuição fundamental de Bruno Cardoso de Andrade, um engenheiro exemplar e amigo, e a orientação valiosa do mestre de obras Flávio. Chegar a este ponto não teria sido possível sem a rica bagagem prática que generosamente compartilharam comigo.

E por fim, mas não menos importante, aos meus queridos colegas de sala de aula, agradeço por tornarem minha jornada acadêmica mais rica e significativa. Nossas trocas de experiências e conhecimentos não apenas enriqueceram meu aprendizado, mas também criaram laços de amizade que valorizo profundamente. Cada desafio superado e cada conquista celebrada juntos fortaleceram nossa união como grupo. Sou grato por ter compartilhado essa experiência com pessoas tão inspiradoras e dedicadas. Que nossas amizades continuem a florescer mesmo após esta etapa da vida.

RESUMO

Este trabalho propõe uma análise dos impactos no sistema de baixa tensão decorrentes da crescente adoção de microgerações fotovoltaicas. O crescimento da geração distribuída, embora ainda não tenha atingido plenamente o potencial solar brasileiro, está se desenvolvendo de maneira significativa dentro do marco regulatório estabelecido. No entanto, a transição da característica passiva do sistema de distribuição elétrica, se não for devidamente controlada, pode resultar em problemas tanto para os micro geradores quanto para as unidades consumidoras convencionais. Essa expansão ressalta a necessidade premente de políticas administrativas que assegurem a conformidade com as normas vigentes. As análises e resultados, fundamentados nas características operacionais previamente estabelecidas, investigam as relações entre os componentes de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) em face de alterações nos padrões de qualidade de energia. O foco recai nos principais pontos de reclamação identificados pela ouvidoria da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), evidenciando a cadeia de problemas no atendimento à demanda, controle de oscilações de tensão, fluxo de potência reversa e distúrbios permanentes. Conclui-se a imperatividade de moderar a expansão, com ênfase na qualidade e prevenção de interferências operacionais decorrentes de uma rede inadequada para a recepção de vários sistemas de geração distribuída fotovoltaica.

Palavras-chave: geração distribuída; qualidade de energia; fator de potência; tensões.

ABSTRACT

This work proposes an analysis of the impacts on the low-voltage system resulting from the increasing adoption of photovoltaic microgeneration. The growth of distributed generation, although not yet fully realizing the Brazilian solar potential, is developing significantly within the established regulatory framework. However, the transition from the passive characteristic of the electrical distribution system, if not properly controlled, can lead to problems for both microgenerators and conventional consumer units. This expansion highlights the urgent need for administrative policies to ensure compliance with current standards. Analyses and results, based on previously established operational characteristics, investigate the relationships between the components of a Grid-Connected Photovoltaic System (GCPS) in the face of changes in energy quality standards. The focus is on the main points of complaint identified by the ombudsman of the National Electric Energy Agency (ANEEL), highlighting the chain of problems in meeting demand, controlling voltage oscillations, reverse power flow, and permanent disturbances. It is concluded that it is imperative to moderate the expansion, with an emphasis on quality and prevention of operational interferences resulting from an inadequate network for the reception of various photovoltaic distributed generation systems.

Keywords: distributed generation; energy quality; power factor; voltages.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 | OBJETIVOS | 11 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 11 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 11 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 12 |
| 3.1 | A REVOLUÇÃO DA ENERGIA INCENTIVADA | 12 |
| 3.1.1 | <i>O marco regulatório e legal da geração distribuída</i> | 13 |
| 3.2 | SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA (GDFV)..... | 15 |
| 3.2.1 | <i>Processo de integração do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCCR)</i> | 16 |
| 3.3 | ADMINISTRAÇÃO DO GRAU DE EFICIÊNCIA..... | 18 |
| 4 | METODOLOGIA | 20 |
| 4.1 | CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA | 20 |
| 4.2 | ABORDAGEM METODOLÓGICA..... | 22 |
| 4.2.1 | <i>Revisão bibliográfica</i> | 22 |
| 4.2.2 | <i>Efeitos da mudança de característica passiva</i> | 22 |
| 4.2.3 | <i>Conclusão</i> | 22 |
| 5 | RESULTADOS E ANÁLISES | 23 |
| 6 | CONCLUSÃO | 29 |
| | REFERÊNCIAS | 30 |

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com um imenso potencial para a geração de energia solar, devido à alta incidência de raios solares em seu território. O atlas brasileiro de energia solar, mapeou as regiões propícias para geração fotovoltaica (Figura 1), fornecendo dados técnicos, destacando aplicações, benefícios e políticas de incentivo à energia solar, subsidiando seu desenvolvimento e expansão no país (Pereira *et al.*, 2017).



Fonte: Pereira *et al.* (2017)

A resolução normativa nº 482 da agência nacional de energia elétrica (ANEEL, 2012) foi um marco na regulação da Geração Distribuída (GD) no Brasil, estabelecendo condições técnicas e de mercado para que consumidores pudessem gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis e fornecer o excedente para a rede elétrica, recebendo créditos de energia em troca (Andrade, 2019).

No entanto, a Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL), reconheceu a necessidade de aprimorar as regras para conexão e faturamento das centrais de microgeração e minigeração, bem como aperfeiçoar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE),

conforme estabelecidos no artigo primeiro da resolução normativa nº 1.059 (ANEEL, 2023a), resolução esta que promoveu importantes modificações no Programa de Eficiência Energética – PEE, nos procedimentos de distribuição, na prestação de serviços públicos e na contratação de energia elétrica.

Todavia, o uso crescente de GD de energia solar fotovoltaica tem trazido diversos desafios para as distribuidoras de energia elétrica e para o setor elétrico em geral. Embora seja uma fonte de energia renovável e sustentável, a GD pode afetar o equilíbrio da rede de distribuição de energia, especialmente quando sua penetração é alta. As redes tradicionais, geralmente projetadas como sistemas radiais alimentados por geração centralizada, conseguem suportar uma certa quantidade de GD sem a necessidade de modificações.

À medida que a GD se expande, é essencial que as concessionárias de energia adotem uma abordagem proativa, implementando mudanças e atualizações para acompanhar a crescente demanda por energia proveniente de fontes distribuídas. O Programa de Desenvolvimento da Transmissão de Energia Elétrica – PRODIST estabelece diretrizes e procedimentos para a expansão e operação do sistema de transmissão de energia elétrica no país, visando garantir a eficiência, segurança e confiabilidade desse sistema, definindo os fenômenos relacionados à qualidade do produto, entendidos como aqueles relativos à conformidade da onda de tensão em regime permanente e transitório, e estabelecendo seus indicadores, valores de referência, metodologia de medição e gestão das reclamações (ANEEL, 2021a).

Diante disso, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo analisar os impactos dessa geração no sistema de distribuição de energia elétrica identificando os principais desafios do gerenciamento de demanda e apresentando os impactos relacionados ao advento da revolução da energia incentivada, conforme especificado no capítulo 2. Para isto, será feita uma revisão de literatura, contida no capítulo 3, apresentando conceitos fundamentais sobre a geração distribuída e seu marco regulatório no Brasil, além da caracterização do funcionamento desse modelo por meio de painéis fotovoltaicos e os principais conceitos que regem esses sistema. No capítulo 4, será apresentada a metodologia para a pesquisa proposta, detalhando a captação e elaboração do tema, para que assim possamos seguir para as análises e resultados, exposta no capítulo 5, que esmiuçar os impactos presentes no modelo de geração fotovoltaica conectada à rede e como isso afeta na qualidade de energia. Por fim, o capítulo 6 conclui o TCC, oferecendo uma síntese das descobertas e suas possíveis colaborações para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo, estão presentes os objetivos do Trabalho de Conclusão do Curso (TCC), os quais irão nortear o desenvolvimento e a elaboração da pesquisa.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar os impactos da integração de unidades geradoras fotovoltaicas em consequência da mudança da característica passiva do sistema de distribuição.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Considerando o contexto da pesquisa, para atingir o objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- identificar as principais características dos sistemas de distribuição de energia elétrica, levando em consideração a sua operação e a influência da integração de unidades geradoras fotovoltaicas;
- compreender os efeitos do fluxo de potência reversa provocado pela inserção de unidades geradoras fotovoltaicas no desempenho do sistema de distribuição de energia elétrica;
- realizar uma análise dos impactos causados na qualidade da tensão e da frequência do sistema de distribuição de energia de baixa tensão;
- analisar as problemáticas administrativas e as implicações para a concessionária decorrentes da não estabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica.

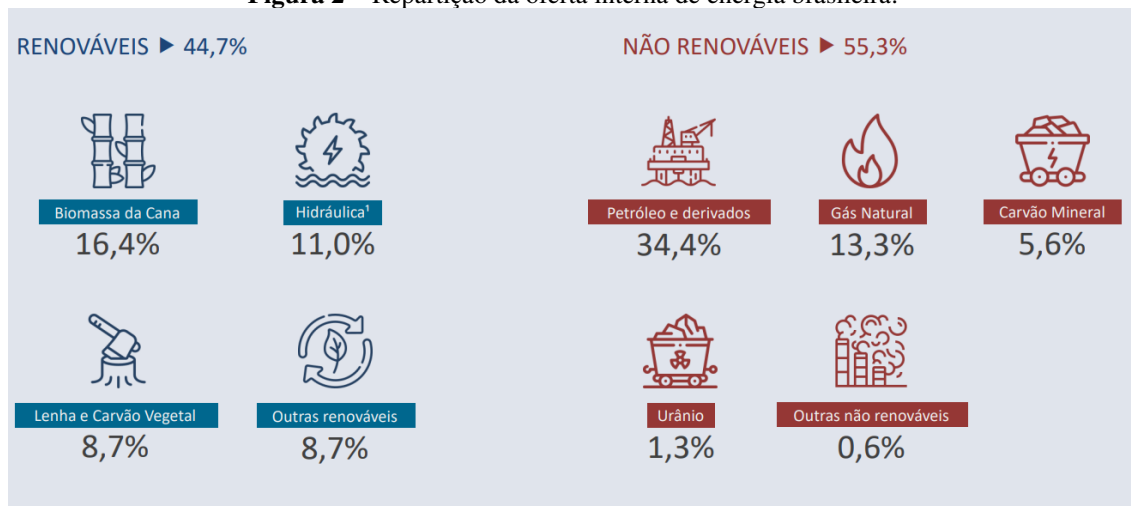
3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, examinaremos contribuições e tendências literárias em nosso campo de pesquisa, destacando lacunas no conhecimento. Essa revisão será nossa base, abrangendo teorias, métodos e descobertas relevantes.

3.1 A REVOLUÇÃO DA ENERGIA INCENTIVADA

A energia incentivada engloba fontes de energia renovável que recebem respaldo financeiro do governo para impulsionar sua expansão e adoção. Esse suporte pode envolver subsídios, benefícios fiscais e tarifas específicas. A Resolução Normativa nº 286 (ANEEL, 2007) aprova as diretrizes para a comercialização de energia elétrica relacionada a fontes incentivadas e consumidores especiais. O mercado livre de energia no Brasil, embora tenha progredido, mantém uma divisão desigual entre fontes renováveis e não renováveis (Figura 2). De acordo com o balanço energético nacional (EPE, 2022), ao examinarmos a oferta de energia de 2012 a 2021, percebe-se uma oscilação no crescimento das fontes de energia renovável, principalmente em decorrência da variabilidade hídrica.

Figura 2 – Repartição da oferta interna de energia brasileira.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022)

Por grande parte de sua história, os sistemas elétricos operaram com base na premissa da geração centralizada, proveniente de usinas de grande escala associadas a fontes primárias de energia vantajosas localmente (Severino; Camargo; Oliveira, 2008). Essa abordagem envolve extensas redes de transmissão e distribuição para atender as demandas dos consumidores de maneira econômica e confiável. À medida que a consciência sobre a sustentabilidade aumenta, surgem novas abordagens dentro de um sistema de energia

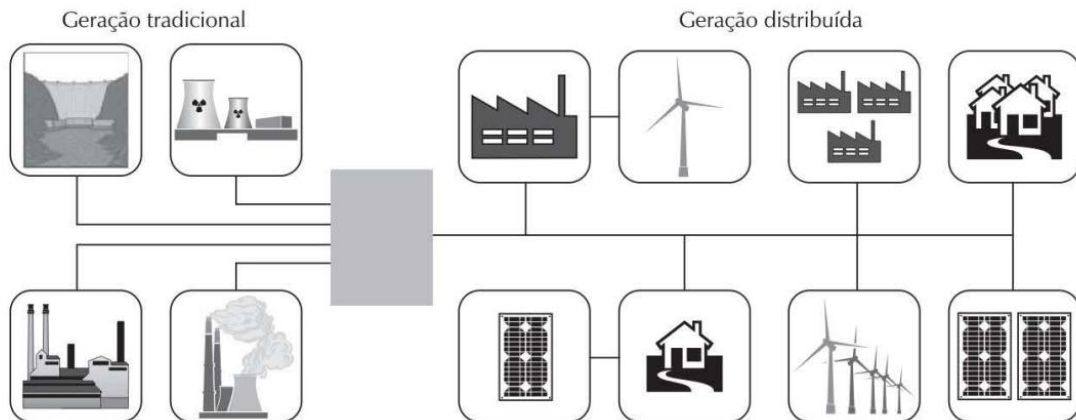
incentivada. Dentre elas, a Geração Distribuída (GD) se destaca como uma solução inovadora e ambientalmente responsável, tendo em vista que, além de ser uma área chave para a sustentabilidade e geração de energia limpa, causa um grande impacto em todo o sistema de transmissão e distribuição de energia, uma vez que altera toda a concepção do sistema atual se tornando um tema chave para energia incentivada.

3.1.1 O marco regulatório e legal da geração distribuída

Na esfera econômica, ao analisar atentamente a produção, geração e disponibilidade de energia, a abordagem delineada pela medida provisória nº 144, de 11 de dezembro de 2003, que posteriormente foi formalizada como a lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, a qual regula minuciosamente a comercialização de energia elétrica, estabelece como princípio fundamental para um arranjo institucional de excelência no setor elétrico (Brasil, 2004).

A Geração Distribuída (GD), conforme discutida por Gonçalves (2018), emerge no mercado como uma alternativa inovadora na produção e distribuição de energia elétrica (Figura 3). Este modelo quebra os padrões convencionais, tradicionais e estatais, adotando um sistema mais permissivo. A evolução das políticas e normativas relacionadas à geração distribuída representa um marco significativo no cenário energético global.

Figura 3 – A geração distribuída e o uso de geradores descentralizados.



Fonte: Villalva (2015).

Ao longo das décadas, as regulamentações que governam essa forma descentralizada de produção de energia passaram por transformações notáveis, impulsionadas por avanços tecnológicos, desafios ambientais e a crescente necessidade de sustentabilidade energética. Esse progresso evidencia não apenas a adaptabilidade do setor, mas também a resposta assertiva às demandas contemporâneas por fontes de energia mais eficientes e ecológicas, inaugurando assim uma nova era na indústria energética.

A GD viabiliza a produção local de energia elétrica, em contraposição à geração centralizada por usinas de grande porte conectadas à rede nacional. No Brasil é principalmente baseada na tecnologia solar fotovoltaica, estimando-se em mais de 98% das instalações (Portal solar, 2021a). Dentro dessa nova dinâmica fomentada pelo crescimento da GD, o consumidor se transforma em um empreendedor ativo no setor elétrico, envolvendo-se diretamente no sistema. Esse envolvimento, por sua vez, demanda a implementação de regras claras para sua utilização.

Inicialmente apresentado como Projeto de Lei (PL) 5829/19, essa proposta, de autoria do deputado Silas Câmara, foi um marco crucial para o setor de energia solar no Brasil. O contexto que envolveu sua criação foi tenso, visto que em outubro de 2019, a ANEEL havia proposto uma revisão da resolução normativa nº 482, modificando o sistema de compensação. Dada a relativa pequenez do setor de energia solar no país naquela época, havia temores legítimos sobre a possível desestabilização desse segmento. Após passar por rigorosos debates e análises, a proposta foi aprovada tanto no Senado quanto na Câmara dos Deputados, em dezembro de 2021 (Portal Solar, 2021b).

A legislação brasileira referente à geração distribuída foi oficializada por meio da lei nº 14.300, em 6 de janeiro de 2022. Está lei estabelece, em seu artigo 1º, as definições para as categorias de microgeração e minigeração distribuída:

XI – Microgeração distribuída: é a central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW (setenta e cinco quilowatts) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras (Brasil, 2022).

XIII – Minigeração distribuída: geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despacháveis, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras (Brasil, 2022).

A aprovação do novo marco da micro e minigeração distribuída ampliou uma janela de oportunidade que já estava aberta ao segmento de produção descentralizada de energia elétrica, especialmente para a fonte solar. O segmento não esconde o entusiasmo com o que pode ser seu melhor ano desde que tecnologia foi introduzida no país, e isso se reflete em projeções como a da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), que estima investimentos superiores a R\$ 50,8 bilhões em 2022, sendo R\$ 40,6 bilhões em micro e

minigeração distribuída e o restante em grandes empreendimentos de geração centralizada (ABREN, 2022).

Em 10 de fevereiro de 2023, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução normativa nº 1.059, que regulamenta a lei nº 14.300 (ANEEL, 2023a). Esta resolução representa um avanço significativo ao aprimorar as regras para conexão e faturamento de centrais de microgeração e minigeração de energia elétrica. Além disso, estabelece diretrizes claras para o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), promovendo eficiência e facilitando a transição para fontes de energia renovável. A interseção entre a lei nº 14.300 e a resolução normativa nº 1.059 cria um ambiente propício para a inovação tecnológica e o investimento em energias limpas.

3.2 SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA (GDFV)

No processo de distribuição e medição de energia, surgem desafios que podem causar problemas. O consumidor tem o direito de receber energia elétrica em casa, e o estado cumpre essa responsabilidade através de empresas controladas por ele ou por meio de concessões a terceiros, as denominadas concessionárias. No entanto, percebendo a necessidade de uma mudança no paradigma tradicional, surgem alternativas inovadoras que visam não apenas superar esses desafios, mas também transformar a forma como a energia é gerada e distribuída.

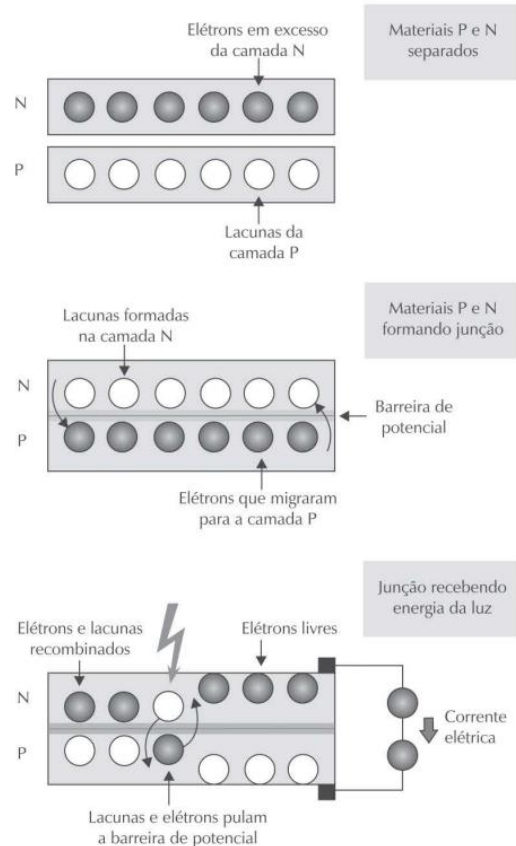
A GDFV, conforme Villalva (2015), opera com base na conversão direta da luz solar em eletricidade. Este processo é ancorado nos princípios do efeito fotovoltaico, onde células fotovoltaicas, predominantemente constituídas de silício, liberam elétrons em resposta à exposição à radiação solar, gerando assim uma corrente elétrica utilizável.

Em 1883, a célula fotovoltaica foi produzida com o selênio, porém, esta célula tinha eficiência de conversão de apenas 1%. Para que o efeito fotovoltaico se tornasse mais compreendido, foi necessário o estudo mais aprofundado com relação à junção do estado sólido, através dos físicos Lange, Grondahl e Schottky. No ano de 1941, Ohl obteve a primeira fotocélula feita de silício monocristalino. Em 1949, Billing e Plessnar realizaram medições relacionadas à eficiência das células de silício cristalino. Nesse momento, Shockley divulga a teoria da junção P-N. Todo esse impulso à geração fotovoltaica somente foi possível a partir da explicação sobre o efeito fotoelétrico dada por Albert Einstein (Alves, 2019).

Uma célula fotovoltaica é composta tipicamente pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra N. O material N possui um excedente de elétrons e o material P apresenta falta de elétrons. Devido à diferença de concentração de elétrons nas

duas camadas de materiais, os elétrons da camada N fluem para a camada P e criam um campo elétrico dentro de uma zona de depleção, também chamada de barreira de potencial, no interior da estrutura da célula (Figura 4). A mudança dos elétrons e lacunas de uma camada para outra origina um campo elétrico e cria uma barreira de potencial entre as duas camadas (Villalva, 2015).

Figura 4 – Materiais semicondutores em três situações diferentes: separados, unidos para formar uma junção e por último com a junção exposta à luz para produzir corrente elétrica.



Fonte: Villalva (2015)

Ao conectarmos várias células fotovoltaicas em série, estamos capitalizando a capacidade de cada célula de gerar uma pequena quantidade de energia e elevando a tensão total do sistema. Nesse arranjo, os terminais positivos de uma célula são conectados aos terminais negativos da célula adjacente, formando assim uma cadeia contínua. Esse processo de conexão em série permite somar as tensões individuais de cada célula, confeccionando um sistema.

3.2.1 Processo de integração do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCCR)

Se a Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) não for capaz de suprir a necessidade da Unidade Consumidora (UC), o sistema deve estabelecer uma conexão com a rede elétrica convencional para atender à demanda de energia local. Assim, o Sistema Fotovoltaico

Conectado à Rede (SFCR), também conhecido como sistema *on-grid*, atua integrado à infraestrutura elétrica convencional (Figura 5). Além de abastecer a própria demanda, são, também, capazes de abastecer a rede elétrica com energia, que pode ser utilizada por qualquer consumidor da rede.

Figura 5 – Ilustração do funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR).



Fonte: Blue Sol Energia Solar (2023)

O sistema fotovoltaico *on-grid* é formado por equipamentos com a função de converter a energia solar em eletricidade e, por serem ligados à rede, também podem inseri-la diretamente na rede elétrica, transferindo o excesso de energia gerada para a distribuidora e economizando até 95% da conta de luz, o sistema *on-grid*, não é necessário um investimento em baterias solares, barateando a instalação do sistema, além de reduzir sua conta de luz com a utilização dos créditos de energia, conforme o artigo 14 do decreto-lei nº 5.163, de 2004, que define a geração distribuída (Silva; Danver; Florian, 2022).

São dois os componentes fundamentais para o processo de funcionamento dos SFCR, conforme definido e caracterizado por Villalva (2015):

- módulo fotovoltaico: também referido como placa ou painel, denota um conjunto empacotado de células fotovoltaicas disponíveis comercialmente. Constituído por células montadas sobre uma estrutura rígida e interconectadas eletricamente, geralmente em série, esse módulo desempenha a função de gerar energia através do efeito fotoelétrico;

- inversor: desempenha um papel essencial nos sistemas fotovoltaicos, convertendo a energia elétrica de corrente contínua gerada pelo painel fotovoltaico para alimentar consumidores em corrente alternada. Este dispositivo possui uma entrada de Corrente Contínua (CC) e uma saída de Corrente Alternada (CA). Os terminais de entrada CC são conectados ao controlador de carga e recebem níveis de tensão de 12 V, 24 V ou 48 V, dependendo do tipo de inversor. Os

terminais de saída fornecem uma tensão alternada compatível com a rede elétrica.

Idealmente, o fornecimento de energia elétrica pelo inversor deveria, invariavelmente, fornecer uma forma de onda perfeitamente senoidal no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), no entanto, limitações características desta tecnologia ainda encontram dificuldades para garantir tais condições desejáveis. Como os sistemas fotovoltaicos conectados à rede necessitam da presença do inversor, a rede de distribuição poderá ser impactada pela qualidade da energia proveniente destes equipamentos.

Para viabilizar a entrega da potência gerada por cada Unidade Consumidora (UC), é imperativo o emprego de um maior número de inversores. Em estudo conduzido por Chidurala *et al.* (2014), intitulado "*Harmonic Emissions in Grid Connected PV Systems: A Case Study on a Large Scale Rooftop PV Site*" foi constatado que a injeção de harmônicos originada pelos inversores fotovoltaicos, distribuídos pela rede de distribuição, pode comprometer o sistema, gerando variações permanentes.

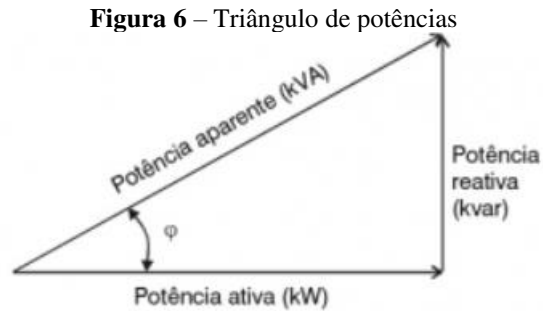
Por sua vez, entende-se como variação de regime permanente, a comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos (ANEEL, 2021a). Além disso o PRODIST define distorções harmônicas como sendo fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

3.3 ADMINISTRAÇÃO DO GRAU DE EFICIÊNCIA

A resolução normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021 (ANEEL, 2021b), define Fator de Potência (FP) como um índice que mostra o grau de eficiência em que um determinado sistema elétrico está sendo utilizado, sendo esse razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período, tendo como limite mínimo o valor de 0,92 para a unidade consumidora do grupo A e não podendo cobrar a unidade consumidora do grupo B, que não tem fator de potência de referência, pelo consumo de energia elétrica reativa excedente.

Em geral, os inversores fotovoltaicos são normalmente programados para trabalhar com FP unitário, injetar potência puramente ativa. Entretanto, tem sido comum a necessidade de usar essa capacidade de injeção de potência reativa para fazer o próprio inversor compensar o fator de potência da instalação, realizando uma função parecida com a de um banco de capacitores (Prym, 2022).

Emprega-se um triângulo para estabelecer a relação entre as potências ativa, reativa e aparente (Figura 6). Cada uma das potências — ativa, reativa e aparente — é representada como um vetor dentro desse triângulo. O fator de potência é determinado pelo cosseno do ângulo entre a potência ativa e a aparente.



Ainda conforme Prym (2022), A potência aparente em volt-ampères (VA) resulta do produto dos valores eficazes da tensão e corrente. Essa medida, embora nomeada por analogia a circuitos resistivos, não diferencia as parcelas de potência ativa e reativa no sistema. Um FP próximo de 1,0 significa baixo consumo de energia reativa em relação à ativa, uma vez que a energia ativa é aquela que executa trabalho útil, quanto mais próximo da unidade for o FP, maior é a eficiência energética da instalação ou do sistema elétrico.

Dentro dos requisitos de proteção propostos pela resolução normativa nº 1059 (ANEEL, 2023a), é proposto que adicionalmente aos requisitos estabelecidos no módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) a partir de 1º de janeiro de 2024, o sistema de medição utilizado na conexão de microgeração ou minigeração distribuída em unidades consumidoras deve atender alguns requisitos, onde se enquadra a capacidade de apurar energia e potência, tanto ativas como reativas, bem como disponibilizar as informações para demanda e injeção, por meio que permita ao consumidor acompanhar a leitura do medidor.

Dessa forma, além da estabelecer o regramento dos sistemas, que inclui o sistema de compensação de créditos e a remuneração pelo uso do sistema de distribuição, ocorre o acompanhamento pós-conexão para garantir operações confiáveis assegurando a conformidade com as regulamentações em vigor.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos metodológicos, materiais e métodos utilizados para alcançar os objetivos estabelecidos no capítulo anterior.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

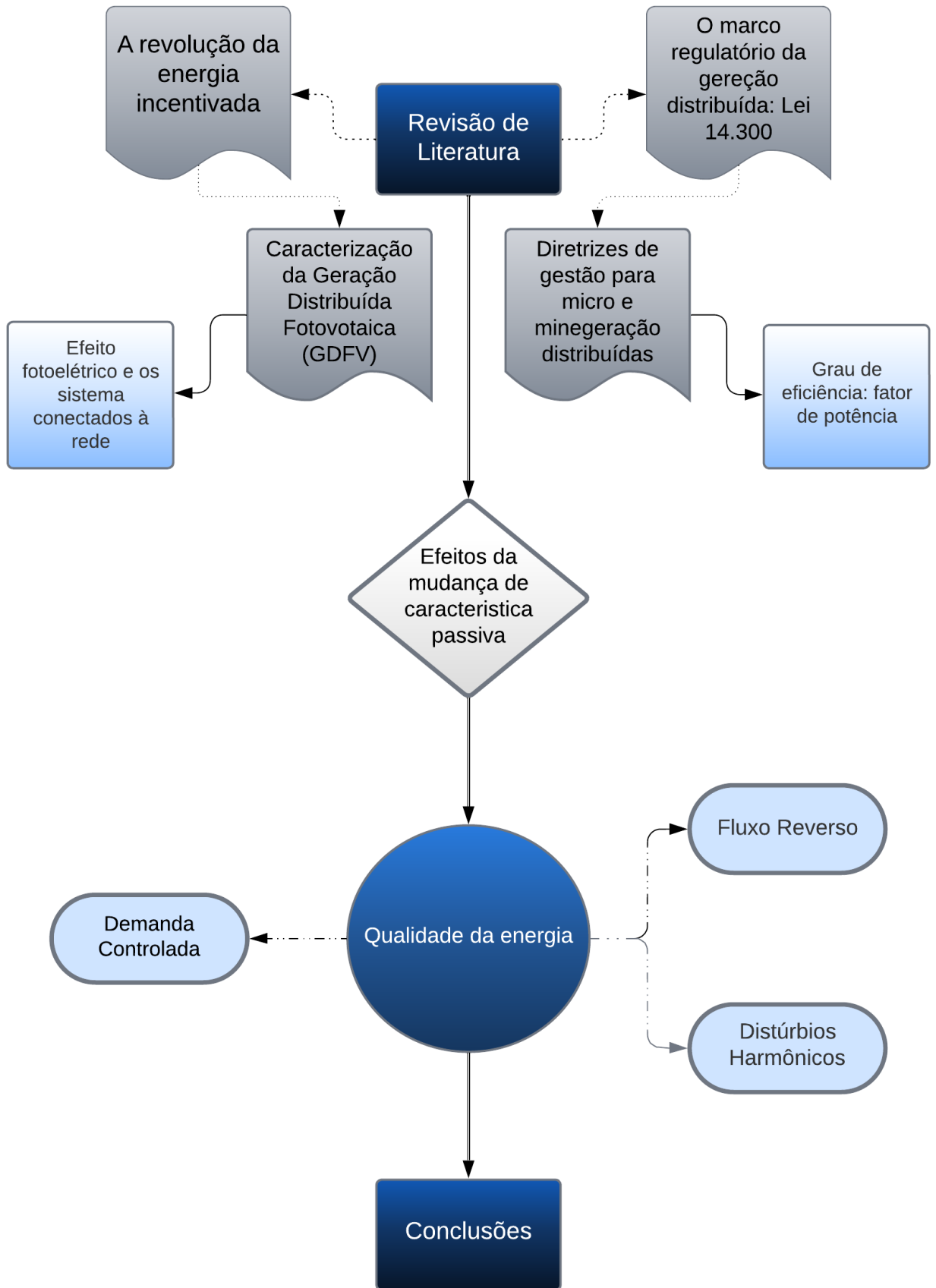
Considerando a necessidade de recorrer tanto a dados descritivos e interpretativos quanto a dados numéricos e estatísticos no desenvolvimento desta pesquisa, classifica-se o estudo como qualiquantitativo. O objetivo primordial é obter uma compreensão aprofundada do fenômeno em estudo, combinando a riqueza e a contextualização dos dados qualitativos com a objetividade e a generalização dos dados quantitativos.

Ademais, cumpre salientar que este estudo tem por objetivo realizar uma análise e mapeamento dos impactos da geração distribuída por painéis solares fotovoltaicos no sistema de baixa tensão. Importante frisar que o escopo da análise visa não apenas compreender os efeitos, mas também contribuir significativamente para o progresso teórico na área, sem necessariamente prever uma aplicação prática imediata. Nesse contexto, a classificação da pesquisa se dá, respectivamente, como básica, explicativa e bibliográfica.

A pesquisa básica, de natureza fundamental, tem como propósito a busca do conhecimento em sua forma mais pura, sem uma preocupação imediata com sua aplicação prática, haja visto que não haverá modelagem de um sistema. Por sua vez, a pesquisa explicativa objetiva identificar e compreender os motivos ou razões subjacentes aos fenômenos investigados, visando estabelecer relações de causa e efeito (Muniz, 2018). Por fim, a pesquisa bibliográfica se baseia na análise e interpretação crítica de materiais já publicados, tais como livros, artigos científicos e relatórios, com o intuito de embasar teoricamente o estudo em questão. Essas classificações são de suma importância para situar adequadamente o tipo de pesquisa a ser conduzida, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento da metodologia e para a compreensão dos resultados obtidos.

Com o intuito de oferecer uma representação visual clara e organizada do percurso planejado para alcançar os objetivos estabelecidos nesta pesquisa, é apresentado um fluxograma ilustrativo do caminho delineado (Fluxograma 1) que servirá como um guia estruturado, delineando as etapas a serem seguidas ao longo do processo de investigação.

Fluxograma 1 - Roteiro metodológico da pesquisa.



Fonte: Autoria Própria (2023)

4.2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Na abordagem metodológica, serão analisados os procedimentos de coleta de dados, os métodos de análise e as ferramentas utilizadas para investigar os impactos da geração distribuída por painéis solares fotovoltaicos no sistema de baixa tensão.

4.2.1 *Revisão bibliográfica*

O propósito da revisão bibliográfica é reunir, examinar e sintetizar o conhecimento científico vigente acerca da geração distribuída, respaldando-se nas diretrizes da lei nº 14.300 (Brasil, 2022) e na sustentação da resolução normativa nº 1.059 (ANEEL, 2023a). Durante esse processo, dar-se-á especial atenção à compreensão dos requisitos técnicos, normativos e operacionais, explorando a caracterização do modelo de geração distribuída por geradores fotovoltaicos, buscando entender seus sistemas e as diretrizes que os norteiam. Essa perspectiva engloba não apenas o funcionamento autônomo desses sistemas, mas também sua interação com a rede convencional de energia. Esse entendimento visa proporcionar uma transição fluida para a análise dos impactos decorrentes da integração de sistemas fotovoltaicos na estrutura e nos componentes do sistema padrão de distribuição.

4.2.2 *Efeitos da mudança de característica passiva*

A transição da natureza passiva para ativa do sistema de distribuição elétrica implica em impactos significativos, especialmente no que se refere à queda na qualidade de energia. Neste contexto, propõe-se uma análise abrangente dos principais efeitos resultantes da integração de fontes de geração distribuída, especificamente sistemas fotovoltaicos, na rede de distribuição de energia elétrica. Destaca-se, assim, a necessidade de investigar os efeitos das principais queixas registradas pela ouvidoria, estabelecendo conexões fundamentais com aspectos-chave, como eficiência, oscilações, distúrbios permanentes e fluxo reverso, com o sistema fotovoltaico e seus componentes de geração.

4.2.3 *Conclusão*





O percurso delineado para alcançar a conclusão visa obter uma compreensão aprofundada dos requisitos técnicos, normativos e operacionais, juntamente com uma análise cuidadosa dos impactos, visando assim estabelecer uma transição suave e segura, impulsionando a revolução da energia incentivada.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Considerando-se uma relação entre a concentração de geradores conectados às redes de distribuição e o potencial de geração existente, o cenário brasileiro ainda possui uma relativa margem de segurança. Com o marco legal da geração distribuída, deu-se início a “corrida” de incentivo, ao assegurar a isenção de parcela da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) até 2045. Haja visto isso, dos 5.57 mil municípios brasileiros, mais de 5,3 mil já possuem sistemas fotovoltaicos de microgeração, o que demonstra o crescimento e a pulverização que os projetos de menor porte vem ganhando no Brasil ao longo dos últimos anos (Hein, 2022).

Atualmente, existem pouco mais de 1,3 milhões de sistemas de geração distribuída em funcionamento, o que embora significativo, represente pouca mais de 2% da população do Brasil (Portal Solar, 2023). Desse modo, torna-se factível examinar o progresso do modelo de geração distribuída por meio de painéis fotovoltaicos, levantando preocupações sobre a notável concentração de geradores. Estes impactos reverberam atualmente tanto na capacidade de atendimento à demanda quanto na qualidade final do serviço prestado. Essa análise pode ser realizada ao examinar as cinco principais queixas reportadas, conforme descrito no relatório da ouvidoria (Figura 7), referente ao mês de novembro de 2023 (ANEEL, 2023b). Os dados apresentados são os seguintes:

Figura 7 – Ranking das reclamações por tipologia.

| Tipologia | Densidade | %Var. Densidade | Rank. | Var. Rank. | Qtde. | %Var. Qtde | Evolução |
|----------------------|-----------|-----------------|-------|------------|--------|------------|---|
| Falta de Energia | 5,12 | 4,90% | 1 | → 0 | 44.579 | 5,55% |  |
| Conexão Microgeração | 1,93 | 2,29% | 2 | ↑ 1 | 16.815 | 3,01% |  |
| Variação de Consumo | 1,63 | -38,16% | 3 | ↓ -1 | 14.143 | -37,91% |  |
| Ligação | 1,29 | -17,96% | 4 | → 0 | 11.210 | -17,52% |  |
| Oscilação de Tensão | 1,06 | 4,56% | 5 | ↑ 1 | 9.162 | 5,17% |  |

Fonte: ANEEL (2023b)

É possível identificar questões diretamente e indiretamente ligadas à microgeração distribuída, resultantes da expansão acelerada desse setor. Essas questões podem gerar desafios administrativos e impactos na qualidade da energia, tanto para as concessionárias quanto para os consumidores.

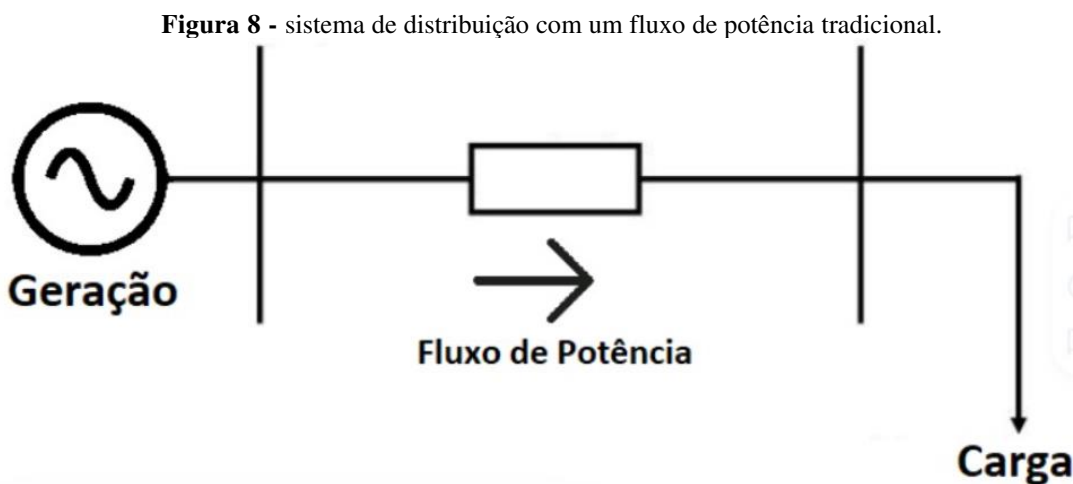
Inicialmente, de acordo com Zilles *et al.* (2012), o fator de potência na entrada da instalação apresenta uma variação significativa, dependendo do equilíbrio entre a demanda da Unidade Consumidora (UC) e a Geração do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR). Essa variação pode oscilar entre níveis elevados e baixos de tensão. Em um SFCR,

as tensões de saída dos inversores alinham-se à tensão da rede elétrica. Portanto, para que esses inversores contribuam exclusivamente com potência ativa na rede, é essencial que a corrente esteja em fase e apresente um fator de potência unitário. Essa sincronização é fundamental para otimizar a eficiência da injeção de energia na rede elétrica, garantindo um desempenho harmonioso e eficaz do sistema.

É importante observar que durante períodos de geração e consumo simultâneos, a potência ativa percebida pela rede tende a diminuir, enquanto a potência reativa permanece constante, resultando em uma redução do fator de potência. Esses aspectos são considerados e devem ser cuidadosamente dimensionados durante a fase de projetos, sendo analisados no processo de solicitação de homologação do sistema.

O artigo 73 da resolução normativa nº 1000 (ANEEL, 2021b), em seu §1º, estipula que, na ocorrência de inversão do fluxo de potência resultante da conexão de novos sistemas ou do aumento da potência de microgeração ou minigeração distribuída, a distribuidora é responsável por conduzir estudos a fim de eliminar essa inversão, seja no posto de transformação ou no disjuntor do alimentador. Notadamente, observa-se um aumento recente no número de solicitações de projetos que foram reprovados, fundamentadas nesse ponto específico, ao alegarem a presença do fluxo de potência reversa no sistema (Araújo, 2023).

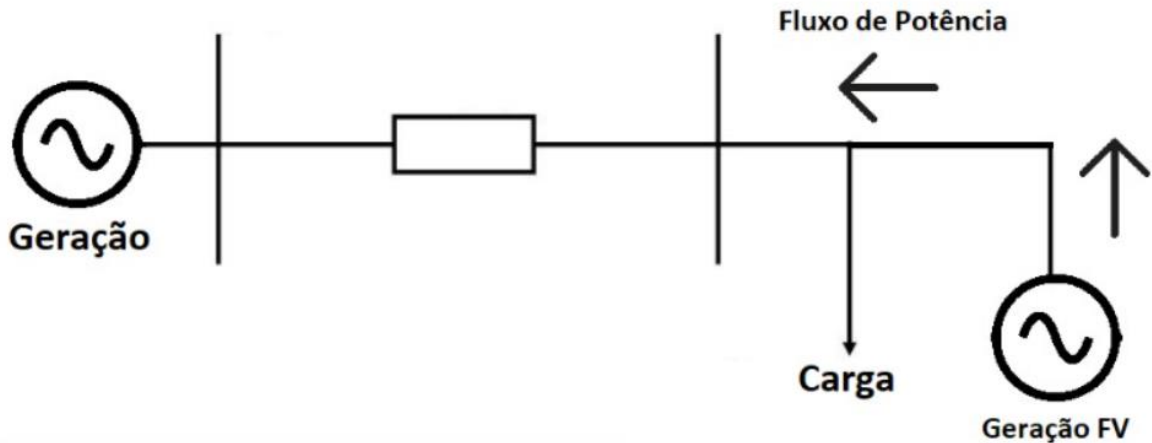
Entende-se que, em um sistema, o fluxo de potência flui naturalmente do ponto de geração para a carga (Figura 8).



Fonte: Araújo (2023)

Todavia, em situações de inversão de fluxo (Figura 9), ocorre a identificação, por parte da concessionária, de pontos em seu sistema nos quais o fluxo segue uma direção oposta:

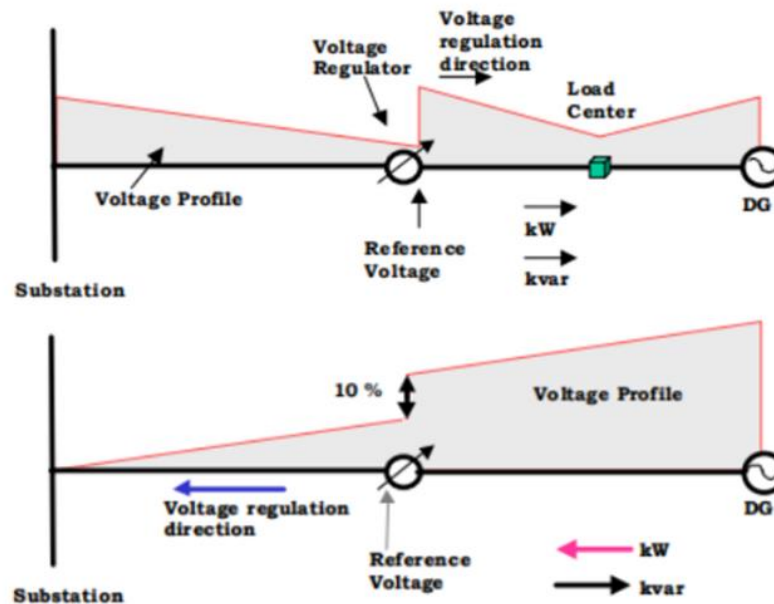
Figura 9 – Cenário com presença de inversão de fluxo na distribuição.



Fonte: Araújo (2023)

Com a finalidade de conter ou atenuar variações indesejadas que podem ocorrer devido a flutuações na irradiação solar, os sistemas de distribuição fotovoltaicos são dotados de reguladores de tensão. No entanto, constata-se que a atuação do regulador de tensão é prejudicada em condições de intenso fluxo reverso de potência (Dias, 2019), o que pode resultar na perda de referência no regulador (Figura 10), ocasionando o mau funcionamento desses dispositivos.

Figura 10 - Atuação do regulador de tensão em fluxo normal em comparação a quando existente fluxo reverso.



Fonte: Adaptada de Kojovic (2003)

Em cenários adversos ou em situações de mau funcionamento dos reguladores, as tensões que ultrapassam os limites estabelecidos para um dispositivo específico não apenas desencadeiam sobrecarga, mas também representam uma ameaça substancial, resultando frequentemente em danos irreversíveis e, em muitos casos, conduzindo à completa

deterioração dos equipamentos. Em contrapartida, quando a tensão é inferior ao necessário, embora a queima seja menos provável, uma variedade de problemas alternativos pode surgir, como a sobrecarga do componente para compensar a baixa tensão.

De um modo geral, do ponto de vista de funcionamento do equipamento, a ocorrência de um fluxo reverso pode causar uma deformação na corrente do equipamento (harmônicas), alterando o perfil de distribuição, podendo ultrapassar os limites de carga dos equipamentos da rede elétrica, e a amplitude de perdas no equipamento (Iaronka, 2023).

Considerando o exposto sobre as potenciais interferências decorrentes do fluxo reverso nos equipamentos elétricos, é crucial, portanto, compreender o impacto dessas variáveis não apenas no funcionamento dos dispositivos, mas também na qualidade geral do serviço elétrico. A análise desses aspectos ganha ainda mais relevância à medida que os benefícios da geração própria de energia se integram ao cotidiano das pessoas. Neste contexto, surge uma reflexão inevitável sobre a qualidade desse serviço. O módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021a) detalha os parâmetros essenciais para avaliação da qualidade de energia elétrica, buscando um atendimento mais eficiente e satisfatório aos clientes, sendo eles estruturados da seguinte forma:

Seção 8.1 – qualidade do produto: define a terminologia, caracteriza os fenômenos, estabelece os indicadores e limites ou valores de referência, além de definir a metodologia de medição e a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e transitório;

Seção 8.2 – qualidade do serviço: define os conjuntos de unidades consumidoras, estabelece as definições, os limites e os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e de atendimento às ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades;

Seção 8.3 – qualidade comercial: define os procedimentos para a apuração dos indicadores de reclamações, de atendimento telefônico e de cumprimentos dos prazos, e estabelece a metodologia para estabelecimento dos limites do indicador de Fator de Exposição a Riscos (FER). (ANEEL, 2021a, p. 1)

Quando ocorrem alterações no fluxo normal do sistema, há uma propensão à modificação na qualidade da energia, afetando tanto o usuário que está injetando energia na rede quanto aquele que utiliza o sistema convencional. Ambos, no exercício de seus direitos, fundamentam suas reivindicações de padrões de qualidade nesse sistema normativo.

A qualidade de energia, por sua vez, depende não apenas da eletricidade fornecida pela concessionária, mas também dos equipamentos integrados à rede, que, quando provocam distúrbios, contribuem para essa alteração na qualidade energética.

Dentre os vários distúrbios que comprometem a qualidade da energia dos sistemas de energia elétrica convencionais que recebem a conexão de microgerações, as distorções harmônicas ganham posição de destaque, uma vez que se caracterizam por fenômenos

permanentes na rede podem prejudicar a eficiência dos equipamentos conectados à rede e, conseqüentemente, a confiabilidade do sistema como um todo.

Os harmônicos no sistema de energia se originam na corrente elétrica, devido à presença de equipamentos e cargas não lineares no sistema de distribuição. A circulação dessas correntes harmônicas geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação. É conveniente que a energia injetada pelo sistema fotovoltaico tenha baixos níveis de distorção harmônica de corrente para garantir que nenhum efeito adverso ocorra em outro equipamento conectado à rede. Níveis aceitáveis de distorção harmônica de tensão e corrente estão condicionados ao perfil específico da rede de distribuição, ao tipo de serviço, às cargas conectadas e aos procedimentos adotados na rede. Idealmente, esses níveis devem ser mantidos abaixo de 5% em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor (Tabela 1), de acordo com as diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2013).

Tabela 1 – Limite de distorção harmônica da corrente.

| HARMÔNICAS ÍMPARES | LIMITE DE DISTORÇÃO |
|---------------------------|----------------------------|
| 3° - 9° | 4,0% |
| 11° - 15° | 2,0% |
| 17° - 21° | 1,5% |
| 23° - 33° | 0,6% |
| HARMÔNICAS PARES | LIMITE DE DISTORÇÃO |
| 2° - 8° | 1,0% |
| 10° - 32° | 0,5% |

Fonte: ABNT (2013)

O sistema de geração conectada à rede elétrica deverá operar em condições normais na faixa de frequência de 59,9 a 60,1Hz. Se ocorrer um distúrbio no sistema de distribuição a fonte geradora poderá operar na faixa de 59,5 a 60,5Hz para recuperação do equilíbrio carga-geração e terá 30 segundos para deixar esta faixa (ANEEL, 2021a).

A presença persistente de distorções harmônicas em um sistema elétrico pode não resultar em danos imediatos, contudo, ao longo do tempo, os equipamentos expostos a correntes harmônicas enfrentam a possibilidade de desenvolver problemas sérios. Entre os mais comuns estão a solicitação de isolamento, devido às distorções nas tensões, sendo ainda mais enfatizado, dado que se trata de sistemas de microgeração com a possibilidade de conexão monofásica em uma única fase, resultando na necessidade de equilíbrio das

conexões para evitar a sobrecarga de uma fase e, conseqüentemente, causar desequilíbrios nas tensões e a solitação térmica, resultante da circulação de correntes harmônicas.

Em uma pesquisa de mestrado conduzida por Souza (2016), foi realizada uma análise quantitativa do comportamento dos indicadores da Distorção Harmônica Total (DHT) e Distorção Harmônica Individual (DHI) na presença de um Sistema Fotovoltaico de Conversão de Energia (SFCR). Os resultados indicaram que a inserção da matriz fotovoltaica provocou consideráveis deteriorações nos indicadores DHT e DHI à medida que o número de geradores aumentava, especialmente quando analisados em função da corrente fundamental.

É cabível à concessionária assegurar a excelência na qualidade da energia fornecida. Sendo crucial que estabeleçam limites apropriados para a distorção harmônica, levando em consideração as características de suas redes de baixa tensão. O módulo 2 do PRODIST - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição (ANEEL, 2021a) contempla em suas seções 2.1 e 2.4, respectivamente, a necessidade de se definir bases sobre as quais as distribuidoras devem desenvolver estudos de previsão de demanda e apresentação de um sistema de Planejamento de Desenvolvimento de Distribuição (PDD), incluindo um plano de expansão. A previsão de demanda deve considerar, no mínimo, o histórico consolidado de carga dos últimos 5 anos, incluindo o histórico de perdas técnicas e os ganhos relativos aos planos de eficiência energética, para que dessa forma o PDD possa apresentar estudos de planejamento elétrico e energético de distribuição.

6 CONCLUSÃO

Infere-se, portanto, que a ascendência de algumas reclamações à ouvidoria da ANEEL, podem possuir um fator em comum, sendo ele a microgeração fotovoltaica. De uma perspectiva técnica mais aprofundada, ao impulsionar a geração distribuída e integrar equipamentos de geração fotovoltaica à rede sem as precauções necessárias para evitar sobrecargas na distribuição, amplifica-se desafios no sistema. Essa amplificação, por sua vez, desencadeia uma série de fatores, como oscilações, distúrbios e reversão de fluxo, que operam em desarmonia com os padrões estabelecidos pelas resoluções normativas propostas para a eficiente regulamentação do setor de distribuição de energia elétrica.

Desse modo, conclui-se que a adoção de sistemas de geração distribuída em baixa tensão oferece uma variedade de vantagens tanto para os usuários quanto para a rede elétrica, promovendo a melhoria da qualidade de vida através da introdução de fontes de energia renováveis e limpas, possibilitando que ele atue como vendedor da energia excedente, representando um avanço significativo no panorama energético.

Entretanto, é crucial moderar a expansão acelerada do setor, priorizando a qualidade do crescimento e evitando interferências nas operações. Isso se justifica pelo fato de que, conforme evidenciado na pesquisa, diversos fatores podem influenciar a qualidade da energia, resultando não apenas em desafios para os usuários da rede, mas também em modificações nos requisitos essenciais para o adequado funcionamento do sistema e para a entrega confiável de energia aos consumidores.

Através deste trabalho, busca-se estabelecer uma base sólida que antecipe futuros desenvolvimentos, proporcionando uma compreensão avançada dos principais impactos de um sistema de geração distribuída fotovoltaica e suas interações com a rede elétrica. Para que assim possa ser alavancada uma otimização da expansão, em detrimento aos métodos de geração centralizada, bem como a identificação, por meio de comparações ou modelagens, de causas reais que estejam afetando áreas cujos sistemas de geração própria impactem dimensionamentos de projetos elétricos básicos que utilizam a rede convencional.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 286**. Aprova as regras de comercialização de energia elétrica aplicáveis a fontes incentivadas e consumidores especiais. 2007. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 26 nov. 2007. Disponível em: <https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:agencia.nacional.energia.eletrica:resolucao.normativa:2007-11-26;286>. Acesso em: 12 dez. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **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://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=342518>. Acesso em: 23 nov. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 956**. Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. 2021a. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 15 dez. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>. Acesso em: 22 nov. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 1000**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. 2021b. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 15 dez. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 19 nov. 2023

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **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. 2023a. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 10 fev. 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 20 nov. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Informativo da ouvidoria Brasil & regiões**. Panorama da composição das reclamações recebidas pela ANEEL em ciclos de 12 (doze) meses. 2023b. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/232705>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ALVES, M. O. L. **Energia solar**: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/2019>. Acesso em: 10 nov. 2023.

ARAÚJO, E. **Reprovação de projetos**: a inversão de fluxo de potência é de fato um problema. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/reprovacao-de-projetos-a-inversao-de-fluxo-de-potencia-e-de-fato-um-problema/>. Acesso em: 22 nov. 2023

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. Disponível em: <http://repositorio.uricer.edu.br/handle/35974/205>. Acesso em: 05 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16149.** Estabelece as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica e seus requisitos. 2013. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/abnt-nbr-16149-pdf-free.html>. Acesso em: 23 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS – ABREN. **Marco legal da GD dispara “corrida do ouro” em 2022.** 2022. Disponível em: <https://abren.org.br/2022/02/16/marco-legal-da-gd-dispara-corrida-do-ouro-em-2022/>. Acesso em: 13 nov. 2023.

BLUE SOL ENERGIA SOLAR. **Sistema fotovoltaico conectado à rede (on grid): o Guia 100% Completo.** 2023. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-on-grid/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

BRASIL. **Lei 10.848,** de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica. 2004. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm. Acesso em: 16 nov. 2023.

BRASIL. **Lei 14.300,** de 06 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm. Acesso em: 10 nov. 2023.

CHIDURALA, A., SAHA, T., NADARAJAH, M., BANSAL, R. **Harmonic emissions in grid connected PV systems: A case study on a large scale rooftop PV site.** 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/286119744_Harmonic_emissions_in_grid_connected_PV_systems_A_case_study_on_a_large_scale_rooftop_PV_site. Acesso em: 17 nov. 2023.

DIAS, C. F. S. **Análise dos impactos da geração distribuída em um alimentador de média tensão utilizando o software OpenDSS.** 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/45185>. Acesso em: 23 nov. 2023

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional.** 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 12 dez. 2023.

GONÇALVES, W. J. **Geração distribuída: conhecimento das normativas regulatórias.** *Revista Argamassa.* Campo Grande, vol. 1, n. 001, janeiro/abril de 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/argamassa/article/view/5982>. Acesso em: 29 out. 2023

HEIN, H. **Microgeração representa 99,2% dos sistemas de GD solar no Brasil.** 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/microgeracao-representa-mais-de-992-dos-sistemas-de-gd-solar-no-brasil/#:~:text=Dos%205.57%20mil%20munic%C3%ADpios%20brasileiros>. Acesso em: 21 nov. 2023.

IARONKA, O. **O que pode acontecer com transformadores de potência quando expostos ao fluxo reverso de energia.** 2023. Disponível em: <https://trinse.net/o-que-pode-acontecer-com-transformadores-de-potencia-quando-expostos-ao-fluxo-reverso-de-energia/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

KOJOVIC, L. **Impact of dg and voltage regulator interaction on distribution system voltage regulation.** 2003. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/IMPACT-OF-DG-AND-VOLTAGE-REGULATOR-INTERACTION-ON-Kojovic/d909d4a602df47829f42563270c77b5d71ef8643?p2df>. Acesso em: 23 nov. 2023.

MUNIZ, C. **Tipos de pesquisa:** quais são e como usar as principais metodologias. 2018. Disponível em: <https://www.significados.com.br/tipos-de-pesquisa/>. Acesso em: 01 dez. 2023.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar.** 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 01 out. 2023

PORTAL SOLAR. **Lei 14.300:** confira as mudanças trazidas pelo marco legal da geração distribuída. 2021a. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/lei14300-confira-as-mudancas-trazidas-pelo-marco-legal-da-geracao-distribuida>. Acesso em: 29 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **PL 5829/19:** confira o que muda com a aprovação do marco legal da GD. 2021b. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/geracao-distribuida/pl-5829-19-confira-o-que-muda-com-a-aprovacao-do-marco-legal-da-gd>. Acesso em: 29 out. 2023

PORTAL SOLAR. **Energia solar está presente em apenas 2% das casas do Brasil.** 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/geracao-distribuida/energia-solar-esta-presente-em-apenas-2-das-casas-do-brasil>. Acesso em: 21 nov. 2023.

PRYM, G. C. S. **Controle do fator de potência dos inversores fotovoltaicos.** 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/controle-do-fator-de-potencia-dos-inversores-fotovoltaicos/>. Acesso em: 11 nov. 2023

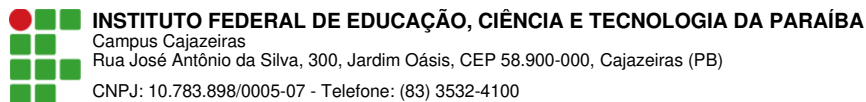
SEVERINO, M. M.; CAMARGO, I. M. T.; OLIVEIRA, M. A. G. Geração distribuída: discussão conceitual e nova definição. **Revista Brasileira de Energia**, vol. 14, n. 1, 2008. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/215>. Acesso em: 16 out. 2023.

SILVA, C. E., DANVER, B.M., FLORIAN, F. Energia fotovoltaica: sistema on grid (sistema conectado à rede elétrica). **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar.** vol. 3, n. 1, novembro de 2022. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/2365>. Acesso em: 12 nov. 2023

SOUZA, R. D. A. **Análise da geração solar fotovoltaica e seus efeitos em termos de fator de potência e distorções harmônicas**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=4834622. Acesso em: 24 nov. 2023.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceito e aplicações**. São Paulo: Editora Érica, 2015. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/energia-solar-fotovoltaica-conceitos-e-aplicacoes-1-edicao-marcelo-gradella-villalva-2012-recognized-5-pdf-free.html>. Acesso em: 10 nov. 2023

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede. **Oficina de Textos**. São Paulo, Coleção aplicações da energia solar fotovoltaica; 1. 2012. Disponível em: <https://doceru.com/doc/nx50snv>. Acesso em: 22 nov. 2023.



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto: Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por: Thiago Lira
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Thiago Lira dos Santos, ALUNO (201912200026) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS, em 15/12/2023 14:36:39.

Este documento foi armazenado no SUAP em 15/12/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1024938
Código de Autenticação: 86c047f9d4

