



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO VÍTOR DE MORAES E SOUSA

ANÁLISE DE IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
DECORRENTES DA INSERÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO

CARAÚBAS

2023

PEDRO VÍTOR DE MORAES E SOUSA

**ANÁLISE DE IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
DECORRENTES DA INSERÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho apresentado a Universidade Federal Rural
do Semi-árido – UFERSA, Campus Caraúbas, como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dra. Sâmara de Cavalcante Paiva

CARAÚBAS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725a Sousa, Pedro Vitor de Moraes e.
ANÁLISE DE IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA DECORRENTES DA INSERÇÃO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO /
Pedro Vitor de Moraes e Sousa. - 2023.
63 f. : il.

Orientador: Sâmara de Cavalcante Paiva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2023.

1. Geração Distribuída. 2. Sistemas Conectados à
Rede. 3. Impactos na Rede Elétrica. 4. Qualidade
de Energia Elétrica. I. Paiva, Sâmara de
Cavalcante, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PEDRO VÍTOR DE MORAES E SOUSA

**ANÁLISE DE IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DECORRENTES DA
INSERÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

Defendida em: 19/05/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



SAMARA DE CAVALCANTE PAIVA
Data: 25/05/2023 15:10:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Sâmara de Cavalcante Paiva, Prof^a. Dr^a. (UFERSA)

Documento assinado digitalmente



CECILIO MARTINS DE SOUSA NETO
Data: 25/05/2023 16:04:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cecílio Martins de Sousa Neto, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



FRANCISCO CARLOS GURGEL DA SILVA SE
Data: 25/05/2023 22:16:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, Prof. Dr.
(UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, minha profunda gratidão aos meus pais, José Oliveira e Ana Maria. As palavras são insuficientes para expressar o quanto sou grato pelo amor incondicional, incentivo constante e suporte emocional que me ofereceram ao longo da minha jornada acadêmica. Vocês que me deram força para concluir esta etapa.

Estendo meu agradecimento aos meus irmãos, Eduardo e Fernando, assim como à minha família em geral. Vocês foram uma fonte inesgotável de incentivo, apoio e compreensão ao longo deste desafiador curso de Engenharia Elétrica. A força coletiva de vocês foi uma das razões pelas quais eu consegui persistir e, agora, celebrar este marco.

Reservo um agradecimento especial à minha orientadora, Profa. Dra. Sâmara. Sua paciência, orientação perspicaz, apoio consistente e clareza nos momentos delicados foram marcantes na construção deste trabalho. As suas contribuições desde a escolha do tema até a sua conclusão foram inestimáveis.

Finalmente, gostaria de expressar minha gratidão a todos os professores, colegas e funcionários da universidade que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho e que foram peças essenciais na minha formação acadêmica. Cada um de vocês deixou uma marca indelével em minha jornada e eu sou eternamente grato.

Ao celebrar o fim deste curso, é com grande satisfação que eu reconheço que cada um de vocês foi um componente vital nesta jornada de aprendizado. O conhecimento que adquiri e as memórias que construí são um reflexo da generosidade e do compromisso que vocês demonstraram. Agradeço de coração a todos vocês.

"Quando colocamos Deus em primeiro lugar e temos fé, tudo o mais se encaixa
perfeitamente". – Mahatma Gandhi

RESUMO

Atualmente, há um aumento considerável nos incentivos à geração de energia elétrica a partir de fontes limpas devido as características renováveis e, por apresentarem menor impacto ambiental, além da redução da disponibilidade dos combustíveis fósseis, que eram utilizados em larga escala. Portanto, a geração distribuída de energia, que utiliza fontes renováveis, está ganhando força com a diminuição dos impostos sobre os componentes utilizados nesses sistemas. Entretanto, o aumento do número desses sistemas conectados à rede de distribuição de baixa tensão pode gerar impactos a qualidade da energia elétrica fornecida. Dessa forma, esta monografia tem como objetivo avaliar os impactos na qualidade de energia elétrica de uma rede de distribuição, decorrentes da conexão de instalações fotovoltaicas em diferentes níveis de penetração. Para isso, foi realizada a simulação de um de um sistema fotovoltaico conectado a uma rede de distribuição de baixa tensão (220/380V), considerando três níveis de penetração de geração. Uma avaliação é feita com base nos sinais observados, que medem as características de formas de ondas de tensão e corrente. A partir dessa avaliação, é possível realizar uma análise do impacto gerado pela planta fotovoltaica no ponto de conexão com a rede elétrica e nas cargas do sistema, a fim de se apresentar possíveis investigações e soluções para mitigar os impactos negativos.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Sistemas Conectados à Rede. Impactos na Rede Elétrica. Qualidade de Energia Elétrica.

ABSTRACT

Currently, there is a considerable increase in incentives for the generation of electricity from clean sources due to their renewable characteristics and, because they have a lower environmental impact, in addition to the reduced availability of fossil fuels, which were used on a large scale. Therefore, the distributed generation of energy, which uses renewable sources, is gaining strength with the reduction of taxes on the components used in these systems. However, the increase in the number of these systems connected to the low voltage distribution network can impact the quality of the electricity supplied. Thus, this monograph aims to evaluate the impacts on the quality of electricity in a distribution network, resulting from the connection of photovoltaic installations at different levels of penetration. For this, a simulation of a photovoltaic system connected to a low voltage distribution network (220/380V) was carried out, considering three levels of generation penetration. An assessment is made based on the observed signals, which measure the characteristics of voltage and current waveforms. From this assessment, it is possible to carry out an analysis of the impact generated by the photovoltaic plant at the point of connection to the electrical grid and on the system loads, in order to present possible investigations and solutions to mitigate the negative impacts.

Keywords: Distributed Generation. Grid-connected Systems. Impacts on the Electrical Grid. Electrical Energy Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.....	14
Figura 2 - Gráfico da Matriz Elétrica Brasile.....	15
Figura 3 - Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica.....	23
Figura 4 - Ilustração de uma célula fotovoltaica (A), um módulo fotovoltaico (B) e um arranjo de módulos fotovoltaicos (C)	24
Figura 5 - Modelo de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição.....	25
Figura 6 - Influência da variação do nível de irradiação solar nas curvas de corrente e potência em função da tensão.	26
Figura 7 - Influência da variação de temperatura de operação do gerador fotovoltaico nas curvas de potência e corrente em função da tensão.	26
Figura 8 - Total diário de irradiação global (média anual).....	27
Figura 9 - Sinal de onda senoidal com componente fundamental (60Hz).....	30
Figura 10 - Sinal de onda com componente harmônica de 3° ordem (180 Hz).....	30
Figura 11 - Sinal de onda com as componentes harmônicas de 3° e 5° ordem (300 Hz).....	31
Figura 12 - Sinal de onda com as componentes harmônicas de 3°,5° e 7° ordem (420 Hz).....	31
Figura 13 - Sinal de onda contendo os componentes harmônicos de 3°,5°,7° e 9° ordem (540Hz)	31
Figura 14 - FFT do sinal apresentado na Figura 13.....	32
Figura 15: Sistema Gerador Fotovoltaico no PSIM	42
Figura 16: Rede elétrica trifásica de distribuição	43
Figura 17: Cenário 1 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC.....	45
Figura 18: Cenário 1 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio da frequência).....	46
Figura 19: Cenário 1 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio do tempo)	47
Figura 20: Cenário 1 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio da frequência).....	47
Figura 21: Cenário 2 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio do tempo).....	49
Figura 22: Cenário 2 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio da frequência).....	49

Figura 23: Cenário 2 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio do tempo)	50
Figura 24: Cenário 2 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio da frequência).....	51
Figura 25: Cenário 3 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio do tempo).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – resposta às condições normais de tensão	21
Tabela 2 – Limite de distorção harmônica de corrente.....	22
Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais, em porcentagem da tensão fundamental.	33
Tabela 4 – Referência para distorções harmônicas individuais de tensão, em porcentagem da tensão fundamental.	34
Tabela 5 – Limites para flutuação de tensão.	36
Tabela 6 – Limites para os desequilíbrios de tensão	38
Tabela 7 – Dados do módulo DHM-72L9/BF	43
Tabela 8 – Níveis de DHT de corrente no Cenário 1	48
Tabela 9 – Níveis de DHT de corrente no Cenário 2	51
Tabela 10 – Níveis de DHT de corrente no Cenário 3	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor
DHT	Distorção Harmônica Total
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FD	Fator de Desequilíbrio
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor
FFT	<i>Fast Fourier Transformer</i>
FP	Fator de Potência
IEC	<i>Internacional Electrotechincal Comission</i>
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GFV	Gerador Fotovoltaico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SGFV	Sistema Gerador Fotovoltaico

SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standar Test Conditions</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 METODOLOGIA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO	19
2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	20
2.2.1 Características da Interface de Conexão com a Rede de Distribuição Elétrica	21
2.3 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	22
2.3.1 Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica	22
2.3.2 O módulo fotovoltaico.....	23
2.3.3 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos	24
2.3.4 Sistema fotovoltaico conectado à rede	24
2.3.5 Efeito da irradiância solar.....	25
2.3.6 Efeito da temperatura.....	26
2.3.7 O potencial energético solar brasileiro	27
2.4 A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	28
2.4.1 Harmônicos e Distorção Harmônica.....	29
2.4.2 Sobreensões (<i>swell</i>)	35
2.4.3 Flutuações de tensões (<i>flickers</i>).....	36
2.4.4 Desequilíbrio de tensão e corrente.....	37
2.4.5 Regulação do fator de potência	38
3 MODELO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO	39
3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA SIMULADO NO PSIM	42
4 RESULTADOS	45

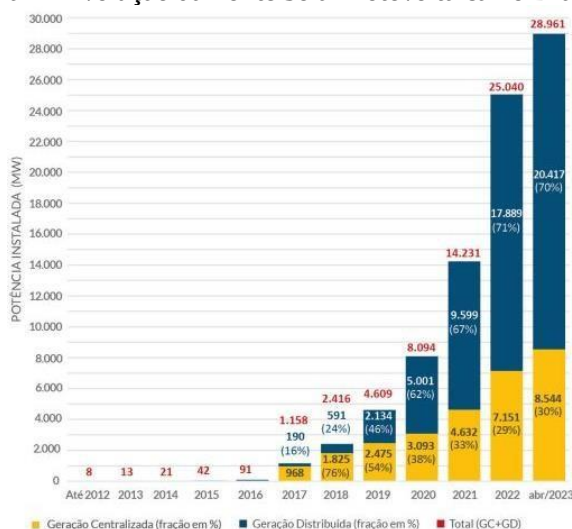
4.1 Cenário: 5% de penetração em relação potência da rede de 10kW	45
4.2 Cenário 2: 31,5% de penetração em relação a potência da rede de 10 kW	48
4.3 Cenário 3: 45% de penetração em relação a potência da rede de 10 kW	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é um recurso fundamental para o desenvolvimento humano e econômico. A história da eletricidade remete ao século VI a. C., quando o filósofo grego Tales de Mileto observou a atração de objetos leves por uma resina chamada âmbar, após ser atritada com uma pele de lã (LOPES, 2016). Desde então, a demanda por energia elétrica tem crescido rapidamente, impulsionada pelo crescimento econômico e urbanização. Entretanto, é importante que se perceba que a queima de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade é responsável pela emissão de gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global e mudanças climáticas. Portanto, limitar a queima dos combustíveis fósseis é crucial para minimizar os impactos ambientais (IPCC, 2014).

No Brasil, a matriz elétrica é composta principalmente por fontes hidrelétricas, seguidas por fontes térmicas a gás e óleo e fontes nucleares (EPE, 2023). Tendo em vista a necessidade de diversificação da matriz e a descentralização da geração de energia elétrica no país, observa-se uma expansão na conexão de sistemas de Geração Distribuída (GD) na rede elétrica, com destaque para a conexão de usinas de energia solar fotovoltaica, conforme representado pela Figura 1, na qual mostra a evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil (ABSOLAR, 2023; ANEEL, 2023).

Figura 1 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



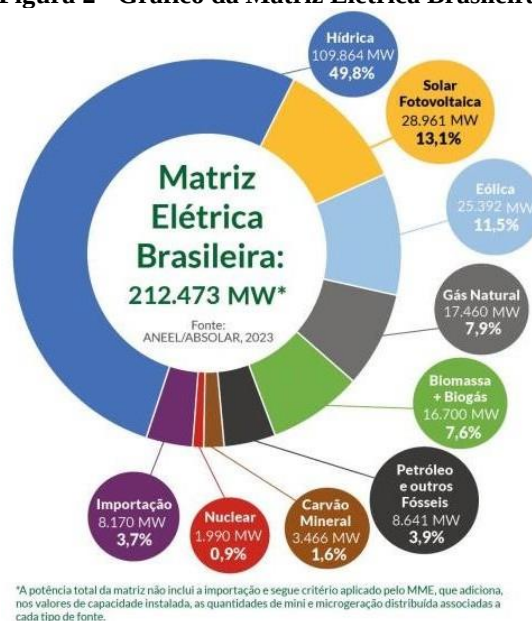
Fonte: ANEEL/ABSOLAR, (2023).

A Figura 1 apresentada ilustra claramente a ascensão da Geração Distribuída (GD) em comparação com a Geração Centralizada (GC), proveniente dos grandes centros de geração, manifestada em termos percentuais. Uma observação cuidadosa revela que a GD tem demonstrado, anualmente, um crescimento médio aproximadamente duas vezes superior ao da

GC. Este aumento significativo é exemplificado pela comparação anual, que mostra uma evolução de cerca de 70% para a GD, enquanto que a GC apresenta uma evolução de aproximadamente 30% em relação ao ano anterior. Este contraste enfatiza não apenas a taxa de crescimento mais rápida da GD, mas também sugere uma mudança em andamento nas preferências de geração de energia.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a capacidade instalada da geração de energia solar no Brasil atingiu 28,961 MW em maio de 2023, representando 13,1 % da matriz elétrica brasileira e ultrapassando a capacidade instalada da energia eólica, que é de 25.392 MW, como ilustra a Figura 2 (ABSOLAR, 2023; MME, 2023).

Figura 2 - Gráfico da Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, (2023).

Dentre os fatores que contribuíram para o crescimento da energia solar no Brasil, é possível citar a criação de regras pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamenta e incentiva a micro e minigeração distribuída. As principais normas são as Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015 que estabelecem o sistema de compensação de energia elétrica, pelo qual os consumidores podem injetar na rede o excedente de energia produzido pelos seus sistemas fotovoltaicos e receber créditos para abater na conta de luz, além da Lei 14.300, marco legal da GD, que foi sancionada em janeiro de 2022, trazendo mais segurança jurídica e regulatória para o segmento (ANEEL, 2015; 2023).

Outro fator que contribui para tal crescimento é o potencial solar fotovoltaico que o país apresenta, já que possui um dos maiores índices de irradiação solar do mundo, especialmente na região Nordeste. A ABSOLAR afirmou, por meio de uma estimativa da *Bloommber New Energy Finance*, que até 2050 a energia solar fotovoltaica poderá representar até 32% da matriz elétrica brasileira, o que demonstra a importância de estudos sobre os efeitos dessa tecnologia na qualidade da energia elétrica (QEE) fornecida aos consumidores (ABSOLAR, 2023).

A nível mundial, o crescimento da energia solar fotovoltaica tem sido ainda mais expressivo. Segundo a *International Energy Agency* (IEA), a capacidade instalada de geração solar fotovoltaica no mundo cresceu em média 38% ao ano entre 2010 e 2020, atingindo a marca de 765 GW em 2020. A IEA projeta que, até 2040, a capacidade instalada de geração solar fotovoltaica poderá chegar a 4,5 TW, o que representa um crescimento de aproximadamente cinco vezes mais em relação a 2020 (IEA, 2020).

A rápida expansão de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCRs) resultou na necessidade de avaliar a inserção desses sistemas, pois essa forma de conexão modifica toda a dinâmica do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica, influenciando em níveis de corrente de curto-circuito, sensibilidade de equipamentos de proteção, redução das perdas/cargas nas linhas de transmissão e distribuição, mudança no perfil de tensão das barras, dentre outros efeitos (AYIKPA, 2017).

Diversos estudos apontam que a conexão de sistemas geradores fotovoltaicos pode ocasionar uma degradação da QEE fornecida aos consumidores, devido problemas como flutuações de tensão e harmônicos (SILVA *et al.*, 2016). A aleatoriedade da irradiação solar pode apresentar dificuldades na operação das redes elétricas, principalmente no contexto de baixa tensão da rede de distribuição. Além disso, a presença de nuvens pode levar a oscilações na quantidade de energia produzida em um curto intervalo de tempo, o que pode provocar, por exemplo, flutuações de tensão e, conseqüentemente, danos a equipamentos elétricos conectados à rede, como computadores e demais equipamentos eletrônicos (BRINKEL *et al.*, 2020).

Por outro lado, também existem estudos que sugerem que a inserção de sistemas geradores fotovoltaicos pode melhorar a QEE. De acordo com Nunes (2017), essa melhoria na qualidade pode ocorrer porque esses sistemas geralmente são instalados em locais próximos aos consumidores, reduzindo a necessidade de transmissão de energia elétrica de longas distâncias e, conseqüentemente, diminuindo as perdas de energia e aumentando a confiabilidade da rede. Ademais, os sistemas geradores fotovoltaicos também podem contribuir para a estabilidade do sistema elétrico em emergências, como apagões, fornecendo energia elétrica localmente (NUNES, 2017).

Diante dessas informações, torna-se evidente a necessidade de estudar a relação entre a inserção de sistemas geradores fotovoltaicos e os efeitos consequentes na energia elétrica fornecida a longo prazo, à fim de se avaliar possíveis problemas e buscar soluções que possam minimizar esses efeitos, garantindo a segurança e eficiência do sistema elétrico, além de promover o uso de fontes de energia renovável em projeções futuras. Esses estudos podem ainda contribuir para o desenvolvimento de políticas e regulamentações específicas que incentivam a inserção de sistemas de GD de forma sustentável, mantendo a confiabilidade e segurança da rede elétrica (IEA, 2020).

Portanto, esta pesquisa tem como propósito explorar de maneira introdutória os impactos dos SFCRs na QEE em redes de distribuição de baixa tensão, analisando os possíveis efeitos e servindo como base para a proposição de estudos visando soluções adequadas para mitigar eventuais impactos negativos.

1.1 METODOLOGIA

A metodologia adotada inclui uma revisão bibliográfica sobre os principais parâmetros e características associados à conexão de SFCRs, bem como uma análise breve das políticas públicas e normatizações existentes no Brasil. Outrossim, serão realizados estudos utilizando dados de sistema fotovoltaico simulado no *software* PSIM, a fim de verificar os efeitos dos SFCRs na QEE e entender melhor as implicações da integração desses sistemas. Com base nas conclusões obtidas, serão elaboradas recomendações para se aprofundar as análises e propor melhorias ao que se relaciona à inserção de sistemas de geração fotovoltaica na rede elétrica de forma sustentável, mantendo a confiabilidade e segurança do sistema elétrico de potência.

1.2 OBJETIVOS

Analisar os efeitos na rede elétrica de distribuição de baixa tensão decorrentes da inserção de sistemas geradores fotovoltaicos.

Objetivos específicos:

- Realizar a pesquisa bibliográfica de trabalhos acerca do temo estudado;
- Simular uma rede com a presença de um sistema fotovoltaico;
- Analisar cenários em três diferentes níveis de penetração de geração fotovoltaica na rede elétrica de distribuição.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado da seguinte maneira:

- O capítulo 2 trata da fundamentação teórica a respeito do sistema elétrico de potência e o setor elétrico brasileiro, dos principais parâmetros relacionados à QEE no Brasil, sistemas de distribuição de eletricidade, GD, energia solar fotovoltaica e o potencial fotovoltaico do país.
- O capítulo 3 descreve os métodos adotados para a realização da pesquisa, a fim de avaliar os efeitos da inserção de sistemas geradores fotovoltaicos na QEE em uma rede de baixa tensão.
- O capítulo 4 reúne os resultados obtidos através do estudo desenvolvido utilizando o *software* de apoio PSIM.
- No capítulo 5 é descrita a conclusão do trabalho e sugeridas propostas para futuros trabalhos relacionados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta uma visão abrangente do setor elétrico brasileiro, do sistema elétrico de potência e redes de distribuição, abordando os principais parâmetros regentes à QEE, normas regulatórias e as características da interface de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. A GD, com foco na energia solar fotovoltaica e o potencial energético brasileiro para tal fonte são discutidos considerando os impactos e desafios na diversificação da matriz elétrica brasileira. Por fim, são apresentadas as últimas considerações no que diz respeito aos assuntos relevantes sobre o tema, destacando-se seus principais aspectos.

2.1 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) consiste em um conjunto de instalações e equipamentos responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em alta e média tensão (MAMEDE, 2017). No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) supervisiona esse sistema, coordenando e controlando a operação das instalações do Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável por conectar as diferentes regiões do país por meio de linhas de transmissão de alta tensão (ONS, 2021).

Conforme descrito por João Mamede (2017), a estrutura do SEP é dividida em três níveis: geração, transmissão e distribuição. A geração é responsável pela produção de energia elétrica em usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares, entre outras fontes. A transmissão transporta a energia produzida pelos geradores para as subestações responsáveis pela distribuição às cidades e consumidores finais (MAMEDE, 2017).

Anteriormente, o fluxo de carga no SEP era predominantemente unidirecional, com a energia elétrica sendo gerada nos grandes centros, transmitida às subestações e distribuída aos consumidores finais. No entanto, com o crescimento da GD, o fluxo de carga tornou-se bidirecional, com a energia elétrica sendo gerada também pelos consumidores através de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, dando origem ao termo *prosumer* (produtor e consumidor) de energia elétrica (FERREIRA, 2017).

O setor elétrico brasileiro é um dos mais importantes da América Latina, sendo responsável por fornecer energia elétrica para mais de 210 milhões de habitantes. De acordo como o Balanço Energético Nacional (BEN), o país possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, com a energia proveniente de hidrelétricas como a principal fonte de energia elétrica (EPE, 2021).

Apesar do sucesso e avanços do setor elétrico brasileiro, desafios futuros incluem a necessidade de modernizar o SEP para acomodar a crescente GD e expandir a rede de transmissão. Além disso, buscar fontes alternativas de geração de energia elétrica e implementar tecnologias mais eficientes e sustentáveis é essencial (EPE, 2023). Outro desafio é garantir a segurança energética do país, que enfrenta períodos de estiagem, afetando a produção de energia hidrelétrica e levando a crises energéticas e ao racionamento de energia elétrica, como ocorrido em 2001 (SILVA *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a GD surge como uma alternativa promissora para complementar e solidificar a matriz energética brasileira, contribuindo para a diversificação da matriz e aumento da segurança energética do país. No entanto, para que isso ocorra de forma adequada é necessário que o SEP passe por adaptações e modernizações para suportar o fluxo de energia elétrica bidirecional de forma que seja possível garantir que a qualidade e confiabilidade do sistema sejam mantidas.

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A GD consiste em uma modalidade de produção descentralizada de energia elétrica em pequena escala ou grande escala, geralmente próxima ou no local de consumo. Essa abordagem tem ganhado importância globalmente, já que tem o potencial de aumentar a segurança energética, diminuir as perdas no sistema e contribuir para a diversificação da matriz elétrica brasileira (GUIMARÃES, 2020).

A ANEEL define a GD como “a produção de energia elétrica proveniente de fontes renováveis ou não-renováveis, conectada diretamente ou por meio de instalações de terceiros ao sistema elétrico de distribuição, localizada no ponto de consumo ou próxima a ele”. A GD não se restringe apenas às fontes renováveis, mas também engloba fontes fósseis, como a geração por motores à diesel (ANEEL, 2019).

No Brasil, a GD tem sido fomentada por políticas públicas, como a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, que estabeleceu condições gerais para acesso de micro e minigeradores aos sistemas de distribuição. A energia é classificada em quatro modalidades: microgeração, minigeração, geração próxima ao ponto de consumo e geração compartilhada. Desde a atualização da normativa pela Resolução Normativa 687/2015, o número de sistemas de GD tem crescido significativamente (ANEEL, 2015).

Diante dessa perspectiva, torna-se fundamental adotar medidas que visam garantir a QEE injetada na rede pela GD, minimizando problemas como flutuações de tensão, distorções harmônicas, que podem afetar o fornecimento aos consumidores. É importante utilizar técnicas

de controle de qualidade de energia, como inversores com filtros de saída e sistemas de monitoramento da QEE gerada. A GD apresenta-se como uma alternativa promissora para o setor elétrico brasileiro, com potencial significativo de crescimento nos próximos anos. A adoção de medidas para garantir a QEE injetada na rede é necessária (ALVES, 2014).

1. 2.2.1 Características da Interface de Conexão com a Rede de Distribuição Elétrica

A norma NBR 16149, estabelece as recomendações específicas para a conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica, sendo aplicada aos sistemas fotovoltaicos que operam em paralelo com a rede de distribuição, ou seja, os sistemas *On-Grid*.

Esta norma estabelece ainda a compatibilidade com a rede, a qualidade de energia fornecida pelo sistema fotovoltaico às cargas em corrente alternada locais e à rede elétrica regida por normas referentes a tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência. Todos esses parâmetros de qualidade de energia devem ser medidos na interface da rede/ponto de acoplamento comum (PAC), exceto quando houver indicação de outro ponto (ABNT, 2013).

Em relação à faixa operacional normal de tensão, os SFCRs normalmente não regulam a tensão, e sim a corrente injetada na rede. Logo, a faixa operacional normal de tensão do sistema fotovoltaico é selecionada com uma função de proteção, que responde às condições anormais da rede. O sistema fotovoltaico deve operar dentro dos limites de variação de tensão definidos na Tabela 1.

Tabela 1 – resposta às condições normais de tensão

Tensão no PAC (% em relação à $V_{nominal}$)	Tempo máximo de desligamento
$V < 80\%$	0,4s
$80\% \leq V \leq 110\%$	Regime normal de operação
$110\% < V$	0,2s
O tempo máximo de desligamento refere-se ao tempo entre o evento anormal de tensão e a atuação do sistema fotovoltaico (cessar o fornecimento da rede). O sistema fotovoltaico deve permanecer conectado à rede, a fim de monitorar os parâmetros da rede e permitir a “reconexão” do sistema quando as condições normais forem reestabelecidas.	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR-16149, (2013).

A NBR – 16149 estabelece também conceitos relacionados aos harmônicos e distorção de forma de onda. É conveniente que a energia injetada pelo sistema fotovoltaico apresente baixos níveis de distorções harmônicas de corrente de forma a garantir que nenhum efeito

adverso ocorra nos demais equipamentos interligados à rede.

Os níveis estabelecidos de distorções harmônicas de tensão e corrente dependem das características da rede de distribuição, tipo de serviço, perfil de cargas conectadas e procedimentos adotados para a rede. A Distorção Harmônica Total (DHT), também chamada de *Total Harmonic Distortion* (THD) de corrente deve ser inferior a 5% em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Cada harmônica individual deve estar limitada aos valores contidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Limite de distorção harmônica de corrente

Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4,0%
11° a 15°	< 2,0%
17° a 21°	< 1,5%
23° a 33°	< 0,6%
Harmônicas pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1,0%
10° a 32°	< 0,5%

Fonte: Adaptado de ABNT NBR – 16149

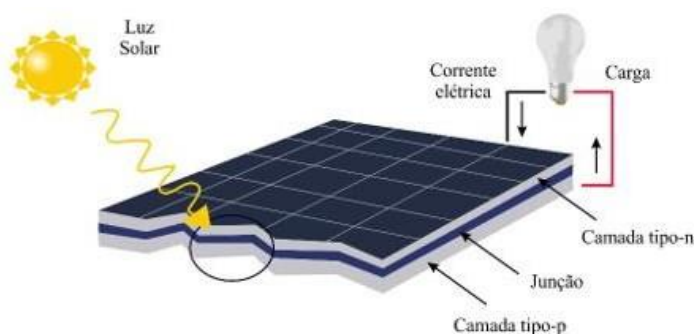
2.3 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Gerando uma importante parcela da matriz energética do mundo, uma das fontes de GD que mais se destacam, especialmente no Brasil, é energia solar fotovoltaica, que transforma a energia proveniente da luz solar em energia elétrica.

2.3.1 Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica

Os sistemas de geração solar fotovoltaica convertem energia solar em eletricidade. A tecnologia usada nos módulos fotovoltaicos é capaz de converter a energia solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas compostas por materiais semicondutores, que quando expostos à luz solar, realizam a transformação de energia eletromagnética em corrente elétrica consolidando o efeito fotovoltaico por meio do campo elétrico da junção p-n e de um circuito elétrico externo (AYIKPA, 2017). A figura 3 mostra o princípio de funcionamento da célula fotovoltaica.

Figura 3 - Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica



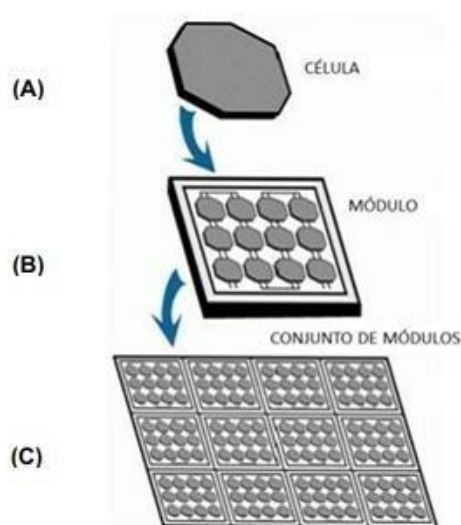
Fonte: Adaptado de Ayikpa (2017).

Quando expostas à luz solar, as células fotovoltaicas, geram corrente elétrica para alimentar uma carga. No entanto, a tensão e a corrente produzidas por uma única célula fotovoltaica são geralmente insuficientes para uso prático. Portanto, para alcançar a tensão e a corrente necessárias, as células fotovoltaicas são organizadas em uma combinação série-paralelo dentro dos sistemas fotovoltaicos. Este conjunto, resultante da associação dessas células, é o que comumente chamamos de módulo fotovoltaico.

2.3.2 O módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas arranjadas em uma conexão série e/ou paralelo para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática de energia. O número de células conectadas em série ou paralelo depende dos parâmetros de tensão e corrente elétrica de utilização desejados (CRESESB, 2014). Devido às suas características elétricas, é necessário um processo cuidadoso para a seleção de células à serem reunidas no momento da fabricação do módulo. A incompatibilidade dessas características pode resultar em módulos de baixa qualidade, devido ao efeito *mismatch* (incompatibilidade), onde as células de menor corrente limitam o desempenho do restante do conjunto, reduzindo a eficiência global do módulo fotovoltaico. A figura 4 ilustra a diferença entre célula, módulo e arranjo fotovoltaico (MACÊDO, 2015).

Figura 4 - Ilustração de uma célula fotovoltaica (A), um módulo fotovoltaico (B) e um arranjo de módulos fotovoltaicos (C)



Fonte: Adaptado de Macêdo (2015).

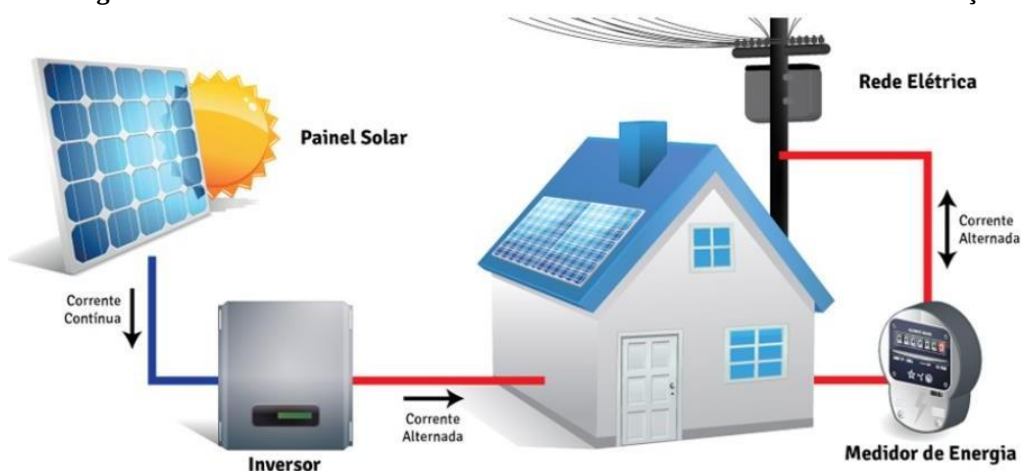
2.3.3 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Em um gerador elétrico, de forma geral, as características elétricas mais importantes são a potência nominal, a tensão e a corrente. A potência elétrica de um módulo fotovoltaico é identificada pela potência de pico (W_p), sendo definida nas condições de ensaio *Standard Testing Conditions* (STC), que corresponde a 1000 W/m^2 , 25°C de temperatura da célula, com uma referência solar de irradiância espectral chamado Massa de Ar (AM1.5), definido pela IEC (*Internacional Electrotechincal Comission*) 60904-3.

2.3.4 Sistema fotovoltaico conectado à rede

Os sistemas fotovoltaicos podem ser definidos em sistemas dos tipos conectado à rede (*On-grid*), sistemas desconectados à rede (*Off-grid*) e sistemas híbridos, que são a composição dos dois anteriores. Os SFCRs dispensam o uso de bateria, pois a energia produzida por eles pode ser consumida diretamente pela carga, ou injetada na rede elétrica, para suprir o consumo das demais unidades conectadas ao sistema de distribuição, permitindo uma grande variedade de aplicações. Esses sistemas podem ser utilizados em grandes plantas de geração ou em consumidores residenciais, comerciais, industriais (IEA, 2019). A figura 5 representa o modelo típico de conexão de um sistema fotovoltaico à rede elétrica, incluindo os principais componentes envolvidos.

Figura 5 - Modelo de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição



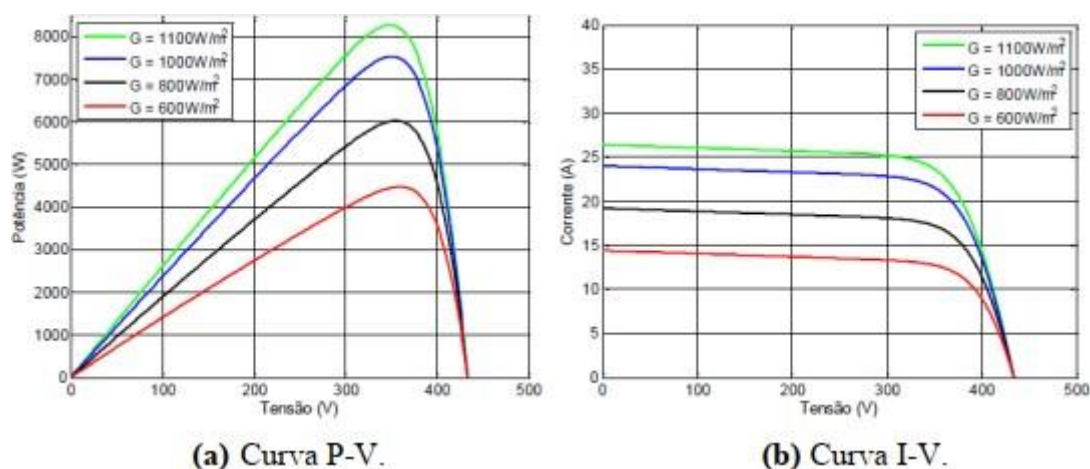
Fonte: Adaptado de Solar Controls (2020).

O primeiro componente é o módulo solar fotovoltaico utilizado para converter a luz solar em eletricidade. O segundo componente é o inversor solar, que converte a Corrente Contínua (CC), gerada pelos módulos fotovoltaicos, em Corrente Alternada (CA) compatível com a rede de distribuição. A energia consumida pelo estabelecimento e a injetada na rede elétrica são medidas através do medidor bidirecional. A energia excedente gerada pelo sistema é enviada para a rede elétrica de distribuição e, em troca são concedidos créditos de energia equivalentes, ao proprietário do sistema.

2.3.5 Efeito da irradiância solar

A corrente elétrica gerada por um módulo fotovoltaico aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, ao passo que a tensão do módulo varia de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura (PALUDO, 2014). A Figura 6 representa a influência da variação do nível de irradiação solar nas curvas P-V e I-V, considerando uma temperatura fixa em 25°C.

Figura 6 - Influência da variação do nível de irradiação solar nas curvas de corrente e potência em função da tensão.

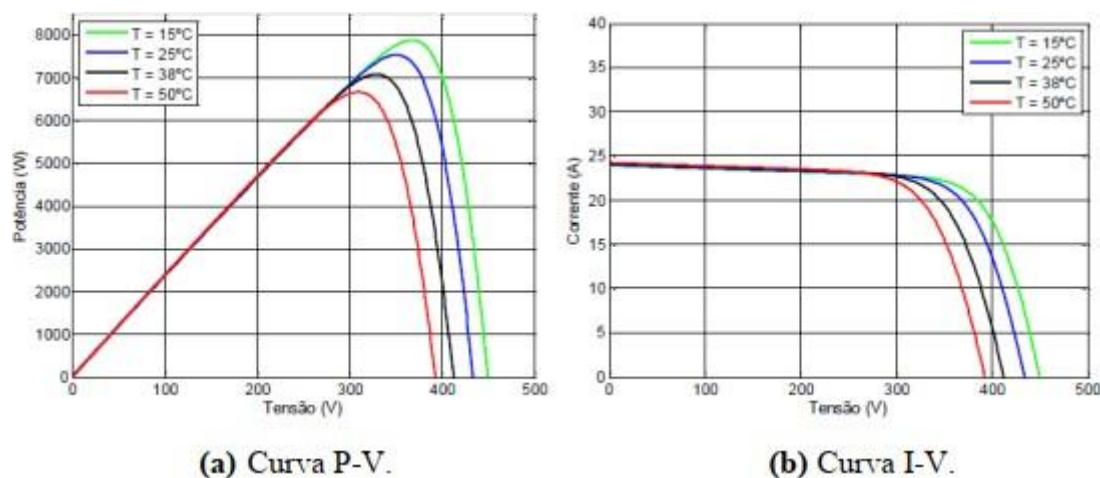


Fonte: Paludo, (2014).

2.3.6 Efeito da temperatura

A variação dos níveis de irradiância solar incidente e da temperatura ambiente afetam a temperatura de operação das células dos módulos fotovoltaicos. Uma elevação da irradiância e temperatura ambiente resulta em um aumento da temperatura da célula e consequente redução da sua eficiência (PALUDO, 2014). Isto se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto a corrente sofre uma elevação quase desprezível. Na Figura 7 é apresentado o impacto da variação da temperatura nas curvas P-V e I-V, mantendo-se a irradiância fixada em 1000 W/m^2 .

Figura 7 - Influência da variação de temperatura de operação do gerador fotovoltaico nas curvas de potência e corrente em função da tensão.



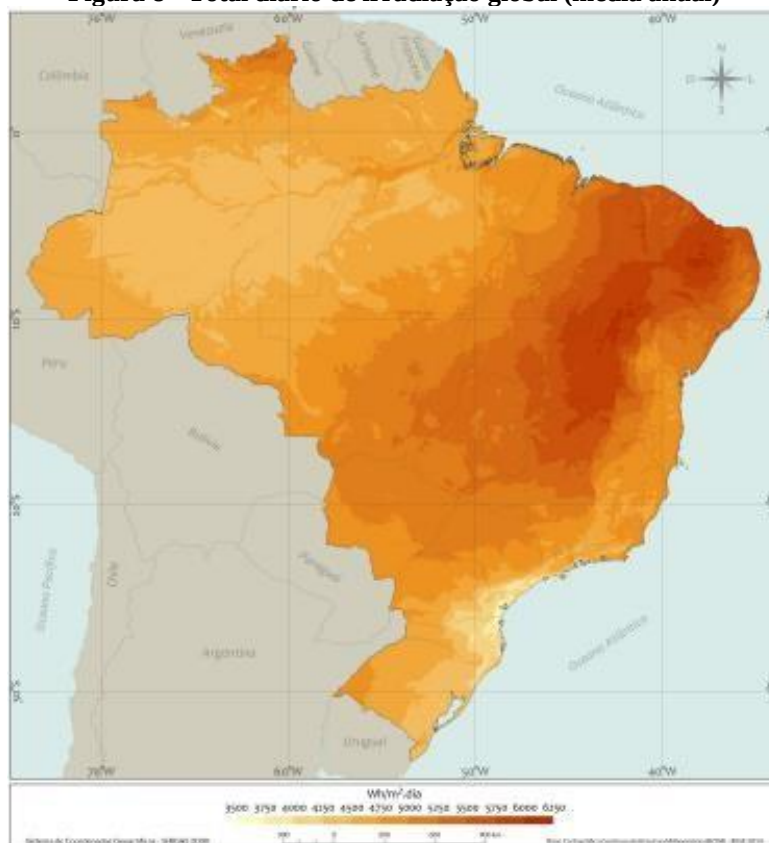
Fonte: Paludo, (2014).

2.3.7 O potencial energético solar brasileiro

A energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das principais fontes renovável no Brasil, com um grande potencial de crescimento visto seu potencial energético solar, fato que se dá pela localização geográfica do país, sendo próxima da linha do Equador (QUINTÃO, 2017).

Além disso, essa fonte de energia tem sido cada vez mais competitiva em relação às fontes tradicionais de energia elétrica no Brasil, como a geração hidrelétrica também considerada limpa e renovável, que apresenta um enorme potencial de geração no território nacional. De acordo com a ANEEL, o país possui um dos maiores potenciais solares do mundo, especialmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, como é mostrado na Figura 8, retirada do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017). Os níveis de coloração mais escurecida apresentam o maior índice de irradiação.

Figura 8 - Total diário de irradiação global (média anual)



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

Segundo dados do Atlas Solarimétrico do Brasil, elaborado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), a irradiação solar no país varia de 2.200 a 2.600 kWh/m²/ano, o que significa um potencial de geração solar estimado em 12 trilhões de kWh/ano (CARVALHO *et al.*, 2017). Apesar desse enorme potencial, a geração da energia solar ainda é pouco explorada

no Brasil.

Contudo, existem iniciativas em curso para incentivar a geração de energia solar em todo território nacional. O governo brasileiro lançou o programa Casa Verde e Amarela que prevê a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências de baixa renda (ALDO SOLAR, 2021). Além disso, o mercado de GD tem crescido significativamente nos últimos anos, impulsionado pela redução dos custos dos equipamentos que compõem um sistema fotovoltaico e pelas facilidades de financiamentos oferecidas pelos bancos.

No entanto, apesar do grande potencial, ainda existem desafios a serem superados para que a energia solar fotovoltaica seja amplamente utilizada no país. A falta de incentivos governamentais e a burocratização no processo de obtenção de licenças e autorizações para instalação de sistemas fotovoltaicos são alguns dos obstáculos enfrentados pelos investidores e consumidores (ABSOLAR, 2021).

Diante do cenário atual, é necessário que sejam implementados mais programas de políticas públicas que incentivem a geração de energia solar fotovoltaica, além de medidas que facilitem o acesso à conexão desses sistemas à rede elétrica. Desta forma, será possível explorar o potencial energético que o Brasil possui, contribuindo para a diversificação da matriz elétrica e para a redução das emissões de gases do efeito estufa.

2.4 A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste tópico, é apresentado um levantamento dos distúrbios que afetam a QEE associados à penetração de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica. Os distúrbios são referentes aos harmônicos, sobretensão, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e regulação do fator de potência, sendo analisados sob um conjunto de indicadores técnicos de referência.

A QEE é definida pela IEC como uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam as grandezas elétricas de tensão, corrente e frequência, analisadas em um determinado tempo e em uma dada localização (IEC, 2015). Para o IEEE, a QEE é o conceito de uma alimentação elétrica e aterramento adequados, de tal modo que os outros equipamentos conectados à mesma rede elétrica funcionem corretamente (IEEE, 2009).

Em sistemas reais, as características elétricas geralmente não estão em conformidade com os conceitos apresentados anteriormente, devido a diversos problemas relacionados à qualidade de energia. A definição de um problema relacionado à QEE, segundo Dugan *et al.* (2004), é qualquer anormalidade de energia elétrica que pode resultar em falha ou operação incorreta de equipamentos utilizados pelos consumidores, por meio de variações de tensão,

corrente ou frequência. A avaliação e a solução desses problemas têm influência direta do interesse econômico de todos os integrantes do sistema energético, uma vez que podem causar consideráveis perdas de receita (DUGAN *et al.*, 2004).

Com o aumento do número de unidades de GD conectadas às redes elétricas de baixa tensão, a preocupação com a influência dessas fontes de energia sobre o desempenho do sistema e a preservação da QEE tem ganhado especial atenção (KATIRAEI; AGUERO, 2011).

Entende-se que QEE é um tema relevante para a população em geral, uma vez que a energia elétrica é um dos principais recursos utilizados para desenvolvimento das atividades humanas. A qualidade desse produto é essencial para o bom funcionamento dos equipamentos eletroeletrônicos e para a segurança das pessoas que o utilizam, podendo ser afetada por diversos fatores, como por exemplo, a presença de distúrbios na rede de distribuição.

No Brasil, a ANEEL estabeleceu, por meio do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), um conjunto de regras e padrões para a QEE. O PRODIST é um regulamento técnico que define as condições de fornecimento e utilização da eletricidade pelas concessionárias de distribuição, buscando garantir a qualidade do serviço prestado aos consumidores (ANEEL, 2015).

Os requisitos estabelecidos pelo PRODIST incluem, ainda, além dos limites para as variações de tensão, frequência e potência, parâmetros relacionados à continuidade do fornecimento da energia elétrica, como indicadores de Duração Equivalente de Interrupção (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), os quais indicam, respectivamente, o número de horas que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal, e a média quantitativa de interrupções na unidade consumidora, seja ela residência, comércio, indústria, entre outras (MEHL, 2004).

Assim, torna-se essencial analisar a penetração de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica a fim de se mitigar os impactos nos parâmetros de fornecimento de energia elétrica e, consequentemente, garantir que as unidades de geração distribuída não afetem negativamente a QEE e atendam aos requisitos estabelecidos (ANEEL, 2015).

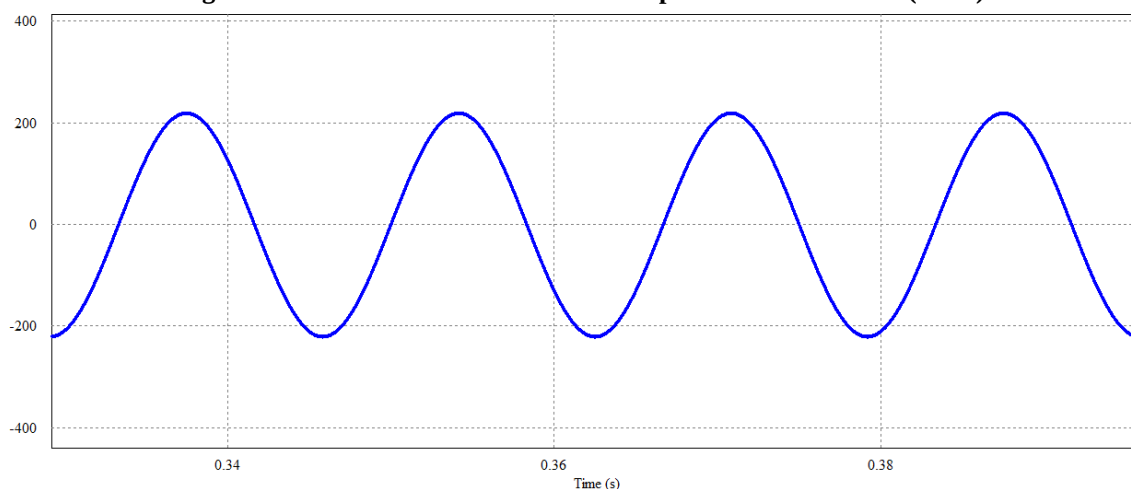
2.4.1 Harmônicos e Distorção Harmônica

Segundo o matemático e físico francês Joseph, uma determinada forma de onda pode ser composta através de um somatório de componentes senoidais de frequências múltiplas da onda original. Assim, qualquer forma de onda que não seja puramente senoidal é uma composição de infinitas formas de ondas senoidais, sendo a primeira delas conhecida como

forma de onda fundamental, enquanto as demais são múltiplas da fundamental, as quais são conhecidas como harmônicos (POLL, 2013).

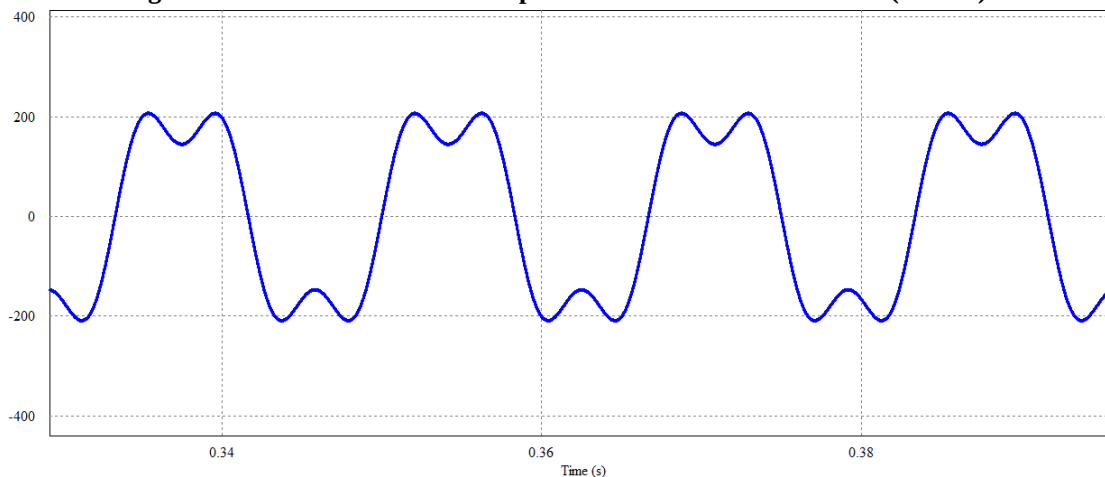
Em sistemas elétricos, harmônicas referem-se à deformação das formas de onda de tensão e corrente em comparação com uma onda senoidal pura de frequência fundamental, igual a 60 Hz no Brasil (ANEEL, 2015). Essas distorções são causadas pela presença de componentes senoidais alternados com frequências múltiplas da frequência fundamental, podendo levar a efeitos negativos no funcionamento de equipamentos, conforme explicado por Júnior (2015). As Figuras 7 a 11 ilustram a forma de onda senoidal com a componente fundamental, com a quinta harmônica, com a sétima harmônica, com a nona harmônica e a resultante da soma das harmônicas citadas, respectivamente. A Figura 12, por sua vez, ilustra a *Fast Fourier Transform* (FFT) aplicada ao sinal de onda distorcida (JÚNIOR, 2015).

Figura 9 - Sinal de onda senoidal com componente fundamental (60Hz)



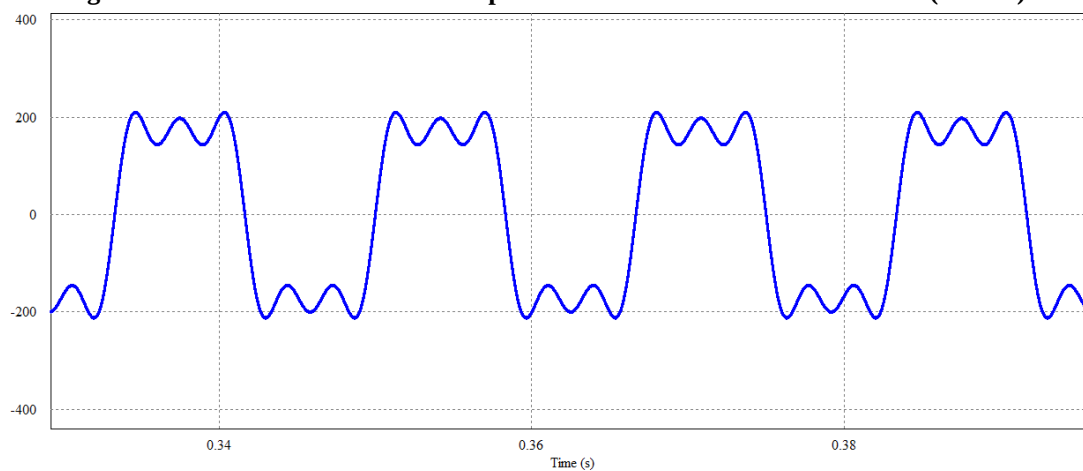
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 10 - Sinal de onda com componente harmônica de 3º ordem (180 Hz)



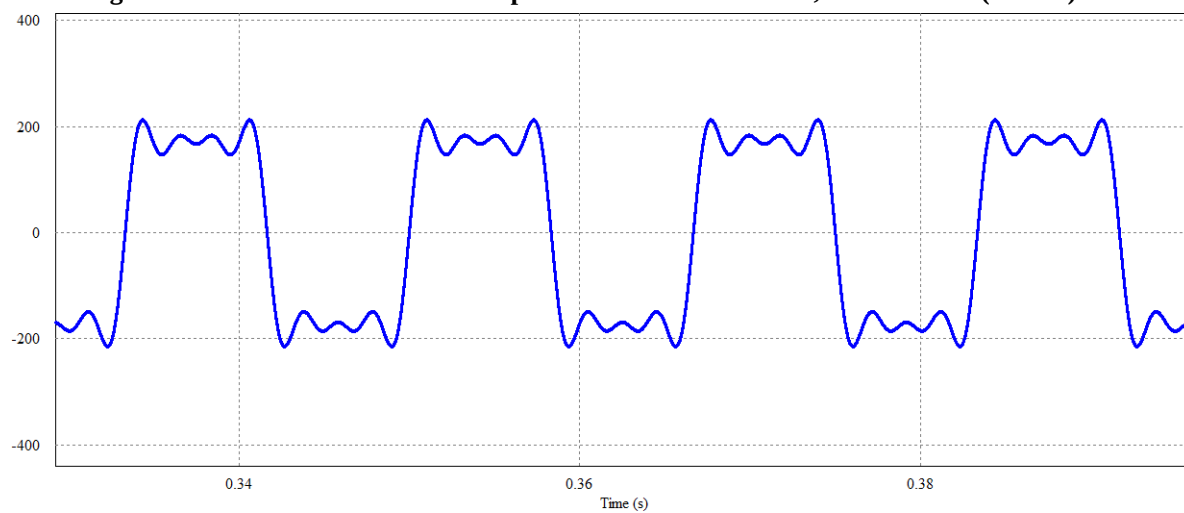
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 11 - Sinal de onda com as componentes harmônicas de 3° e 5° ordem (300 Hz)



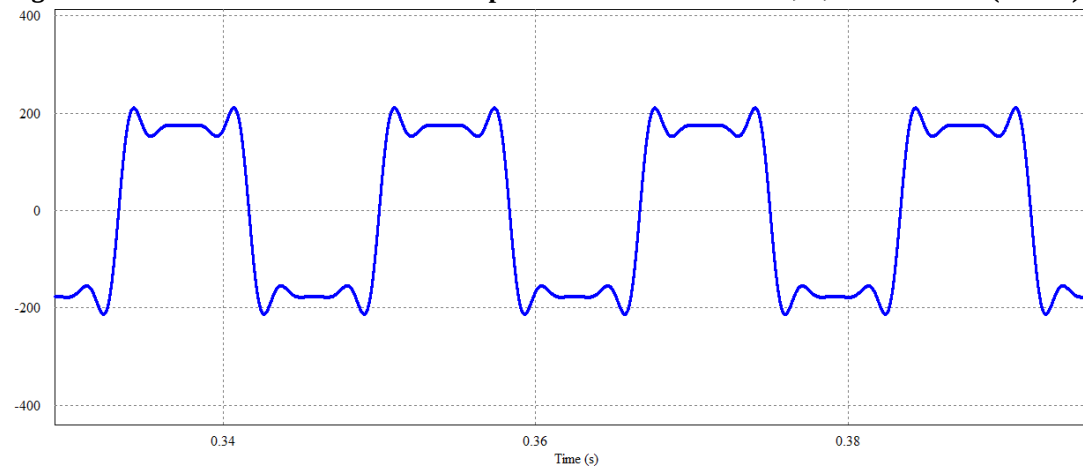
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 12 - Sinal de onda com as componentes harmônicas de 3°,5° e 7° ordem (420 Hz)



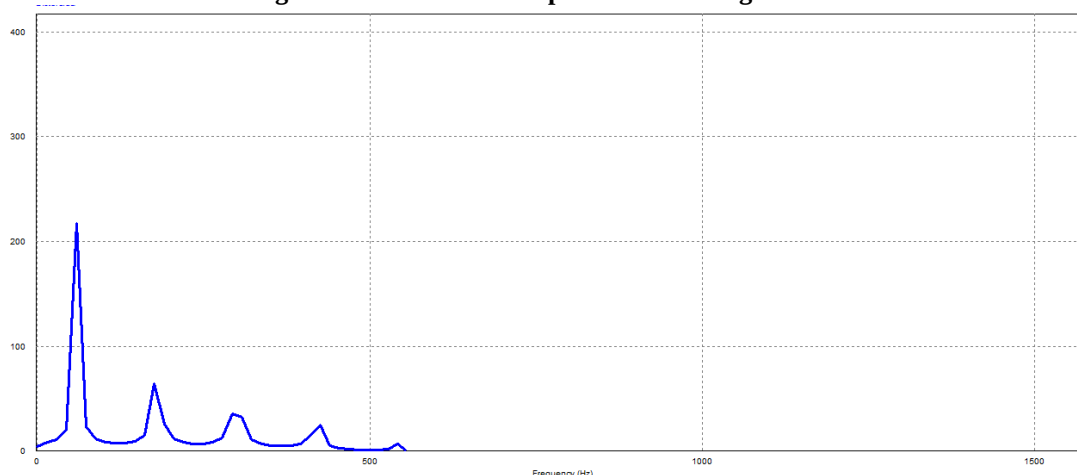
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 13 - Sinal de onda contendo os componentes harmônicos de 3°,5°,7° e 9° ordem (540Hz)



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 14 - FFT do sinal apresentado na Figura 13



Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, as harmônicas são ondas de amplitude menor do que a frequência fundamental e frequências múltiplas da fundamental aparecem quando o sinal não é puramente senoidal. Essas distorções surgem a partir da existência de cargas não-lineares na rede elétrica de distribuição, como reatores de luminárias, fontes chaveadas em dispositivos domésticos e inversores de frequência (ONS, 2011; POLL, 2013).

Essas cargas diferem das cargas lineares por não possuírem uma relação linear entre corrente e tensão, sendo normalmente geradas por equipamentos elétricos e eletrônicos que possuem componentes como diodos e transistores. Assim, as cargas não-lineares absorvem uma corrente diferente da forma de onda de tensão que as alimenta, gerando perturbações na onda de corrente (POLL, 2013).

No módulo 8 do PRODIST, estão estabelecidas as diretrizes para minimizar os impactos negativos de harmônicos na QEE, incluindo a conexão de sistemas fotovoltaicos (ANEEL, 2015). Medidas como o uso de filtros ativos e passivos, controle adequado de potência ativa e reativa e monitoramento regular da rede elétrica são fundamentais para garantir o cumprimento dessas diretrizes. O armazenamento de energia em baterias também pode ajudar na estabilidade do sistema, fornecendo energia de *backup* durante quedas de energia (CAO *et al.*, 2019).

A DHT (Distorção Harmônica Total) é o indicador mais utilizado para quantificar harmônicos. Ele representa a distorção correspondente a todos os harmônicos presentes em um sinal e é definido em um valor percentual da frequência fundamental. A DHT de tensão e a DHT de corrente são definidos, respectivamente, pelas equações (1) e (2) a seguir

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_l} \quad (1)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_l} \quad (2)$$

Sendo:

h – Número inteiro (ordem harmônica);

V_h -Valor rms da componente de tensão harmônica h ;

V_l – Valor rms da componente de tensão fundamental;

I_h – Valor rms da componente de corrente harmônica h ;

I_l – Valor rms de corrente fundamental.

De acordo com o PRODIST – Módulo 8, os limites de THD de tensão e corrente devem ser respeitados para se garantir a QEE. Esses limites variam dependendo do nível de tensão e do tipo de consumidor (residencial, comercial, industrial). Operadoras de distribuição de energia elétrica são responsáveis por monitorar a qualidade da energia e identificar possíveis problemas causados pelos harmônicos, aplicando medidas corretivas quando necessário (ANEEL, 2015). Os valores de referência globais das distorções harmônicas totais de tensão podem ser visualizados nas tabelas 3 e 4 abaixo.

Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais, em porcentagem da tensão fundamental.

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT _h) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1\text{ kV} \leq V_N \leq 13,8\text{ kV}$	8
$13,8\text{ kV} \leq V_N \leq 69\text{ kV}$	6
$69\text{ kV} \leq V_N \leq 230\text{ kV}$	3

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2015.

Tabela 4 – Referência para distorções harmônicas individuais de tensão, em porcentagem da tensão fundamental.

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão DTT _h) [%]				
	$V_N \leq 1kV$	$1kV \leq V_N \leq 13,8kV$	$13,8kV \leq V_N \leq 69kV$	$69kV \leq V_N \leq 230kV$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	0,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5

	>12	1	0,5	0,5	0,5
--	-----	---	-----	-----	-----

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2015.

É importante que os projetos de sistemas fotovoltaicos levem em consideração os impactos dos harmônicos na QEE, seguindo as diretrizes estabelecidas pela ANEEL por meio do PRODIST, buscando soluções eficientes para minimizar esses efeitos. A adoção de tecnologias avançadas como inversores de frequência com estratégias de controle aprimoradas pode contribuir para a redução da geração de harmônicas e, conseqüentemente, para a melhoria da QEE na rede. Ademais, é essencial estar ciente dos problemas relacionados e seguir as recomendações dos órgãos competentes.

2.4.2 Sobretensões (*swell*)

Segundo a ANEEL, as sobretensões são um dos principais distúrbios da QEE, podendo ser originadas tanto na rede de distribuição quanto nas instalações elétricas dos consumidores (ANEEL, 2019). As sobretensões podem ser classificadas em transitórias, permanentes e temporárias. As sobretensões transitórias têm curta duração e são geralmente causadas por descargas atmosféricas ou por manobras na rede. Já as sobretensões permanentes são causadas por falhas em equipamentos ou por desequilíbrio da rede elétrica. Por fim, as sobretensões temporárias podem ser decorrentes de variações na demanda de energia elétrica ou de problemas na operação da rede (ANEEL, 2015).

A presença de sobretensões na rede elétrica pode gerar diversos problemas, como danos a equipamentos eletrônicos, perda de dados e interrupções de processos produtivos (PAIVA; SOUSA; PÁDUA, 2018). Outrossim, essas elevações de tensão podem causar riscos à segurança das pessoas e à integridade das edificações, uma vez que podem gerar faíscas, incêndios e explosões (LACERDA; VAZ; RIBEIRO, 2015).

No contexto da GD, o aumento repentino de tensão pode ser causado por diversos fatores, incluindo a desconexão de equipamentos elétricos de grande porte, a operação de sistemas de compensação de reativos, o acionamento de cargas não-lineares e a mudança repentina de geração de energia solar devido a variações climáticas (OLEKOVICZ, 2007, *apud* JÚNIO, 2015).

Para evitar problemas causados por este fenômeno, o PRODIST estabelece a necessidade de adotar medidas de proteção, tais como a utilização de dispositivos de proteção de surtos (DPS) e a instalação de sistemas de aterramento adequados (ANEEL, 2015). Os DPS

são dispositivos que atuam na proteção contra sobretensões transitórias, desviando para o solo as correntes geradas por surtos elétricos.

2.4.3 Flutuações de tensões (*flickers*)

As flutuações de tensão ou *flickers* ocorrem quando a tensão fornecida pela concessionária de energia elétrica apresenta variações significativas em relação ao seu valor nominal, podendo causar danos nos equipamentos elétricos. Os limites para *flickers*, visando garantir a QEE são estabelecidos no PRODIST. Na Tabela 5, é possível conferir que esses limites variam de acordo com a tensão nominal. O indicador utilizado para medir a gravidade das flutuações é o Pst, que indica a Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração. O valor apresentado na tabela é Pst95%, isto é, a severidade de flutuação que é superada em apenas 5% do total das leituras válidas. (ANEEL, 2015).

Tabela 5 – Limites para flutuação de tensão.

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
Pst95%	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2015.

Um estudo realizado por Silva *et al.*, (2017) avaliou a QEE fornecida aos consumidores de uma região do estado de São Paulo, incluindo a análise das flutuações de tensão. Os resultados mostraram que os valores deste parâmetro estavam dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST. Outro estudo realizado por Figueiredo *et al.* (2018) avaliou os efeitos das flutuações de tensão na QEE em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, demonstrando que as *flickers* podem afetar significativamente o desempenho dos sistemas fotovoltaicos e que medidas de mitigação, como o uso de filtros e o cumprimento das normas estabelecidas, podem ser necessários para garantir a qualidade da energia (SILVA *et al.*, 2017; FIGUEIREDO *et al.*, 2018).

São diversos os fatores que podem causar os efeitos de flutuação de tensão, como a operação de equipamentos elétricos de grande porte, o desligamento e religamento de circuitos elétricos e a presença de cargas não-lineares na rede elétrica. De acordo com os estudos realizados por Katiraei e Aguero (2011), a alta penetração de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica pode causar variações de tensão no PAC, o que pode levar a flutuações de tensão na rede elétrica. Além disso, conforme será visto posteriormente, a GD de energia fotovoltaica

pode afetar a regulação do fator de potência (FP), outro fator importante para a QEE (KATIRAEI; AGUERO, 2011).

2.4.4 Desequilíbrio de tensão e corrente

O desequilíbrio de tensão e corrente é um problema caracterizado pelo desbalanceamento das amplitudes e assimetrias nas fases do sistema elétrico trifásico. Um sistema trifásico é considerado equilibrado quando as três formas de onda de tensão apresentam forma e amplitudes iguais e defasadas 120° entre si (JÚNIOR, 2015).

De acordo com a ANEEL (2015), o desequilíbrio de tensão pode causar superaquecimento de equipamentos elétricos e redução da vida útil dos componentes. As causas mais comuns para esse problema são: distribuição irregular de cargas monofásicas, falhas em banco de capacitores e filtros, desigualdade nas impedâncias das linhas de transmissão ou de enrolamentos de transformadores (OLESKOVICZ, 2007, *apud* JÚNIOR, 2015).

O FD (Fator de Desequilíbrio) é o indicador referente ao desequilíbrio de tensão nos barramentos dos transformadores de potência e nos barramentos da rede elétrica e pode ser dado pela relação entre os componentes de sequência negativa (V-) da componente de tensão de sequência positiva (V+), expresso em porcentagem da componente de sequência positiva conforme a equação (3) (ANEEL, 2015).

$$FD = \frac{V -}{V +} 100\% \quad (3)$$

O cálculo do fator FD se baseia no método das componentes simétricas, também conhecido como teorema de Fortescue. Esse método consiste na decomposição de um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas equilibrados, ou seja, qualquer sistema de vetores trifásicos desequilibrados pode ser decomposto em sistemas equilibrados que serão somados, os quais são: componente de sequência positiva, componente de sequência negativa e componente de sequência zero (POLL, 2013).

Os estudos realizados por Freitas *et al.* (2017) e Carvalho *et al.* (2018) evidenciam que a inserção de sistemas geradores fotovoltaicos pode gerar desequilíbrio de corrente e tensão. Um estudo avaliou 33 sistemas geradores fotovoltaicos em um sistema de distribuição de baixa tensão em São Paulo e mostrou um desequilíbrio de corrente na rede elétrica. Já outra pesquisa avaliou 22 sistemas em um sistema de distribuição de baixa tensão, também em São Paulo, e mostrou um desequilíbrio de tensão na rede elétrica (FREITAS *et al.*, 2017; CARVALHO *et al.*, 2018).

O PRODIST estabelece os critérios e procedimentos técnicos para a prestação de

serviços de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional, citando o fato de que as concessionárias devem garantir o cumprimento dos limites indicados na Tabela 7, estabelecidos (ANEEL, 2020).

Tabela 6 – Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2015.

Adicionalmente, o PRODIST estabelece critérios para a realização de estudos de impactos de sistemas geradores na rede elétrica, visando avaliar os efeitos desses sistemas no sistema de distribuição, determinando ainda que esses estudos devem ser realizados antes da conexão dos sistemas a fim de se garantir a segurança e qualidade do serviço prestado aos consumidores (ANEEL 2020).

2.4.5 Regulação do fator de potência

A regulação do FP se torna importante para a eficiência energética e minimização das perdas elétricas técnicas no sistema. A inserção de geradores fotovoltaicos na rede elétrica pode afetar a regulação do fator de potência, uma vez que a geração a partir de fontes renováveis pode gerar distorções na rede elétrica.

De acordo com estudos realizados por Silva *et al.* (2018), a utilização de técnicas de controle e condicionamento de potência reativa em SFCRs podem ajudar a manter o FP em níveis adequados, minimizando as distorções na rede elétrica. A utilização de condicionadores necessita da identificação das componentes harmônicas de correntes a fim de se realizar uma compensação satisfatória (SILVA *et al.*, 2018).

Esses equipamentos podem ser utilizados para ajustar a magnitude e a fase da tensão injetada na rede elétrica pelos sistemas, ajudando a manter o fator de potência em níveis adequados. Portanto, os sistemas geradores fotovoltaicos precisam ser projetados e instalados de acordo com as normas e regulamentações vigentes, visando também a regulação do fator de potência para garantir a QEE.

3 MODELO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo, será apresentado o Sistema Gerador Fotovoltaico (SGFV) implementado para o desenvolvimento dessa pesquisa, utilizado para as medições em diferentes pontos da rede de distribuição de baixa tensão.

O trabalho realizado, apresenta uma finalidade estratégica básica de estudo dos efeitos na QEE, decorrentes da inserção de SFCRs no sistema de distribuição de energia elétrica em baixa tensão. Trata-se de uma abordagem quanti-qualitativa, com a utilização de métodos hipotético-dedutivos para o estudo e avaliação dos resultados. A partir do referencial teórico apresentado, foi possível identificarmos os indicadores regentes à QEE que visam manter o correto funcionamento da rede elétrica e os possíveis efeitos provenientes da inserção de SFCRs, tais como a alteração no perfil de tensão e os níveis de corrente na rede elétrica. Com a realização destas simulações, foi possível comparar os diferentes cenários de penetração, visando-se observar os efeitos que podem ser gerados nos parâmetros regentes aos indicadores da QEE adotados.

Para a realização das simulações no sistema implementado, primeiramente foi estimada uma potência total de 10 kVA a ser disponibilizada para a rede elétrica do circuito. A natureza das cargas em cada fase foi considerada resistiva e indutiva e as proporções de cada tipo de carga foram estimadas de forma a representar diferentes cenários possíveis, buscando-se abranger um gama de condições de operação mais próximas da realidade.

Para a primeira fase, foi estimada uma carga majoritariamente resistiva, composta por 70% de resistência e 30% de indutância. Sendo, a potência resistiva resultante igual a 70% de 3,33 kVA, ou seja, 2,33 kW nesta fase. A resistência (R) então pode ser calculada usando a fórmula da potência para uma carga resistiva:

$$P = V^2/R \quad (4)$$

Reorganizando para:

$$R = V^2/P \quad (5)$$

Substituindo $V = 220V$ e $P = 2,33 \text{ kW}$, obtém-se:

$$R_1 = 20,76 \, \Omega$$

Consequentemente, a potência da carga indutiva seria de aproximadamente 1 kW, correspondente aos 30% restantes e, totalizando os 3,33 kW disponibilizados em cada fase.

Para converter a potência da carga indutiva para a indutância em Henrys, se faz necessário considerar a tensão e a frequência do sistema, que são 220/380V e 60 Hz, respectivamente. A potência reativa (Q) de uma carga indutiva pode ser calculada a partir da indutância (L) e da frequência (f) da seguinte forma:

$$Q = 2\pi fLV^2 \quad (6)$$

Que rearranjada:

$$L = \frac{Q}{(2\pi f * V^2)} \quad (7)$$

Sendo:

Q : Potência reativa [VA]

f : Frequência [Hz]

L : Indutância [H]

V : Tensão [V]

Assim, a indutância em Henry será:

$$L_1 = \frac{1000}{(2\pi * 60 * 380^2)} = \frac{1000}{549818,93} = 0,18 \text{ mH}$$

Para a segunda fase, assumiu-se uma carga igualmente resistiva e indutiva, com 50% de resistência e 50% de indutância. Logo, a potência resistiva resultante seria 50% de 3,33 kVA, ou seja, 1,665 kW. Assim, a resistência (R) deste cenário então pode ser calculada da mesma forma que antes, usando a equação 4.

Substituindo $V = 220V$ e $P = 1,665 \text{ kW}$, obtém-se:

$$R_2 = 29,07 \Omega$$

A potência indutiva seria 50% de 3,33 kVA, ou seja, 1,665 kW. A indutância (L), é calculada da mesma forma que antes, usando a equação 7 rearranjada. Substituindo os valores de $Q = 1,665 \text{ kVAR}$, $f = 60 \text{ Hz}$ e $V = 220V$, obtém-se:

$$L_2 = 0,25 \text{ mH}$$

Para a terceira fase, decidiu-se simular uma carga novamente majoritariamente resistiva, porém com uma proporção ligeiramente diferente da primeira fase: 60% resistiva e 40% indutiva. Portanto, a potência resistiva resultante seria 60% de 3,33 kVA, que é igual a aproximadamente 2 kW.

A resistência, então, pode ser calculada da mesma forma que antes, usando a fórmula da equação 5. Substituindo $V = 220\text{V}$ e $P = 2 \text{ kW}$, obtém-se:

$$R_3 = 24,20 \Omega$$

A potência indutiva seria 40% de 3,33 kVA, resultando em 1,33 kW. A indutância, neste último cenário, é calculada da mesma forma que antes, usando a Equação 7. Substituindo-se $Q = 1,33 \text{ kVAR}$, $f = 60 \text{ Hz}$ e $V = 220\text{V}$, obtém-se:

$$L_3 = 0,20 \text{ mH}$$

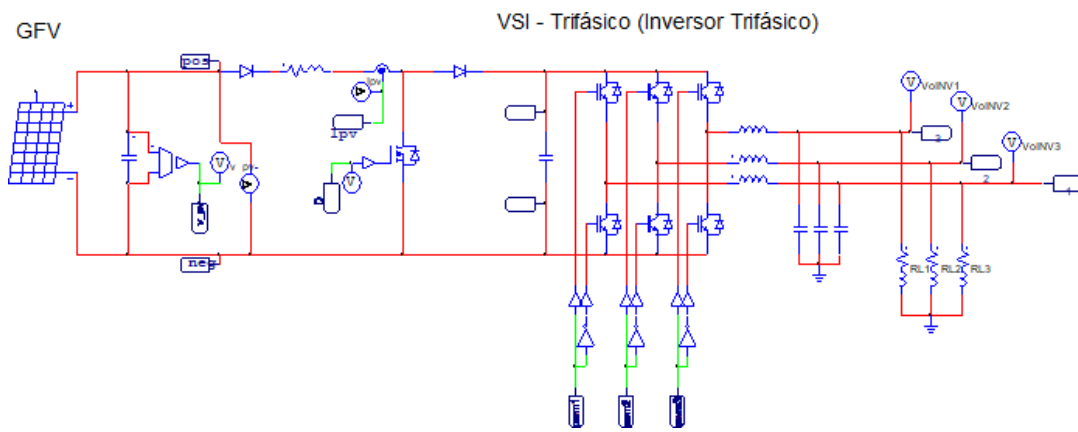
Dessa forma, foi possível estimar a carga e os valores das componentes R e L a serem utilizadas nas simulações. A carga foi mantida constante e os cenários foram definidos com base na relação de geração/carga. Foram definidos os seguintes cenários: 5% de penetração de Geração Fotovoltaica (GFV); 31,5% de penetração de GFV; 45% de penetração de GFV em relação à potência disponibilizada na rede elétrica. Os níveis de penetração adotados neste estudo, baseiam-se em estudos e projeções de instituições como IEA, que projeta um crescimento significativo da capacidade instalada de geração fotovoltaica nos próximos anos, com projeções de penetração que variam de 20% a 40% (IEA, 2020).

Dessa forma, o nível 5% representa uma introdução gradual da geração fotovoltaica a rede elétrica. Já o nível de 31,5% reflete uma perspectiva de crescimento considerando a capacidade atual de instalação e as metas de expansão estabelecidas por órgãos reguladores e entidades do setor energético. O nível de 45% representa uma projeção de alta penetração, alinhada com cenários futuros de aumento da demanda por energia fotovoltaica e avanços tecnológicos. Essa abordagem abrangente permitiu explorar de forma inicial diferentes estágios de integração da geração fotovoltaica, fornecendo uma visão mais ampla dos potenciais impactos estudados.

3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA SIMULADO NO PSIM

O *software* PSIM, foi escolhido para realizar este trabalho devido à sua capacidade de simular sistemas de energia elétrica, incluindo sistemas fotovoltaicos e inversores. Além disso, o PSIM, mesmo na versão limitada utilizada, oferece a capacidade de realizar análises de tempo e frequência, o que é essencial para entender o desempenho de um sistema de energia. O PSIM permitiu a realização da simulação de uma rede de distribuição elétrica com a inserção de um SFCR para a análise de diferentes cenários de simulação. A Figuras 15 apresenta as configurações do SGFV implementado, contemplando um modelo funcional, conversor CC-CC *Boost*, o circuito do Inversor Trifásico utilizando *Insulated-gate bipolar transistors* (IGBTs) que caracterizam o sistema de geração fotovoltaica conectado, juntamente com as cargas RLs definidas.

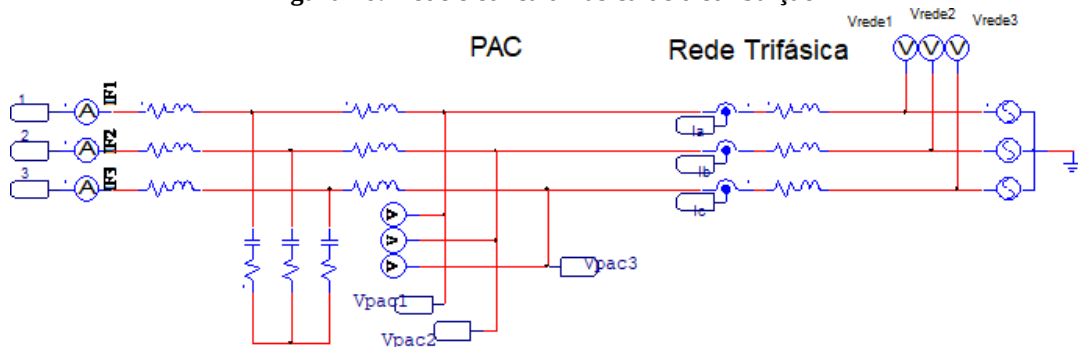
Figura 15: Sistema Gerador Fotovoltaico no PSIM



Fonte: Autoria Própria (2023).

A Figura 16, ilustra a configuração da rede elétrica trifásica de distribuição composta por uma fonte trifásica que simula uma rede elétrica em baixa tensão 220/380V, bem como a localização do PAC, ponto em que foram medidas as formas de onda simuladas.

Figura 16: Rede elétrica trifásica de distribuição



Fonte: Autoria Própria (2023).

Considerando, para fins de simulação a potência disponibilizada pela rede (10kW), a variação dos níveis de geração fotovoltaica para cada cenário definido foi realizada através da mudança dos parâmetros do módulo funcional que foi inserido utilizando-se como base os valores do modelo DHM-72L9/BF, cujo principais parâmetros, de acordo com o *datasheet* e considerando as condições de teste padrão, são listadas na Tabela 7 a seguir

Tabela 7 – Dados do módulo DHM-72L9/BF

DHM-72L9/BF	
<i>Tensão de circuito aberto (Voc)</i>	49.3 V
<i>Tensão de potência máxima (Vmp)</i>	42.11 V
<i>Corrente de curto-circuito (Isc)</i>	11.35 A
<i>Corrente de potência máxima (Imp)</i>	10.69 A

Fonte: Autoria Própria

Foram analisados os sinais de tensão próximo à rede elétrica e no PAC, além dos sinais de corrente no PAC e nas cargas. Os resultados obtidos foram avaliados e comparados com os conceitos e valores obtidos na pesquisa bibliográfica, estabelecidos pelas normas técnicas da ANEEL, por meio do PRODIST e demais órgãos regentes que estabelecem os requisitos mínimos para a QEE fornecida.

Diante da metodologia a ser realizada é possível afirmar, de antemão, que o tema deste trabalho ainda tem muito a ser explorado e que a metodologia adotada na pesquisa poderá contribuir para uma melhor compreensão dos efeitos da inserção dos SFCRs na rede elétrica, para que a partir deste trabalho, sejam realizados estudos mais incisivos e completos, permitindo a adoção de medidas que contribuam com a segurança e eficiência do sistema de distribuição elétrica no cenário de expansão da GD.

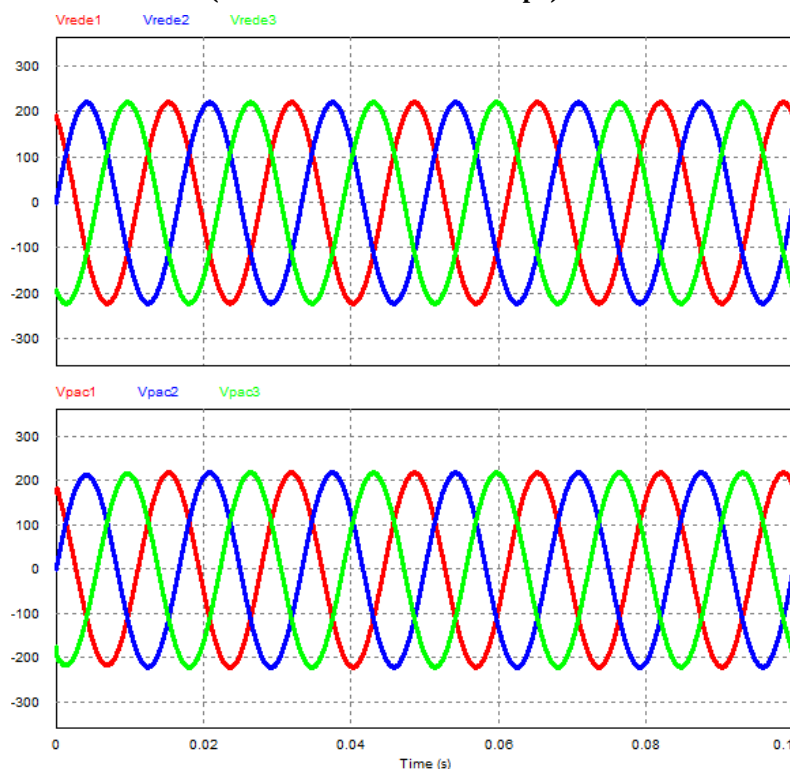
4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos por meio da simulação dos cenários estabelecidos. Os resultados serão analisados considerando os sinais de tensão próximo à rede elétrica e no PAC, bem como os sinais de corrente no PAC e nas cargas. As análises foram realizadas tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, analisando-se também os níveis de DHT em cada cenário, plotadas a partir do *Simview* integrado ao PSIM.

4.1 Cenário: 5% de penetração em relação potência da rede de 10kW

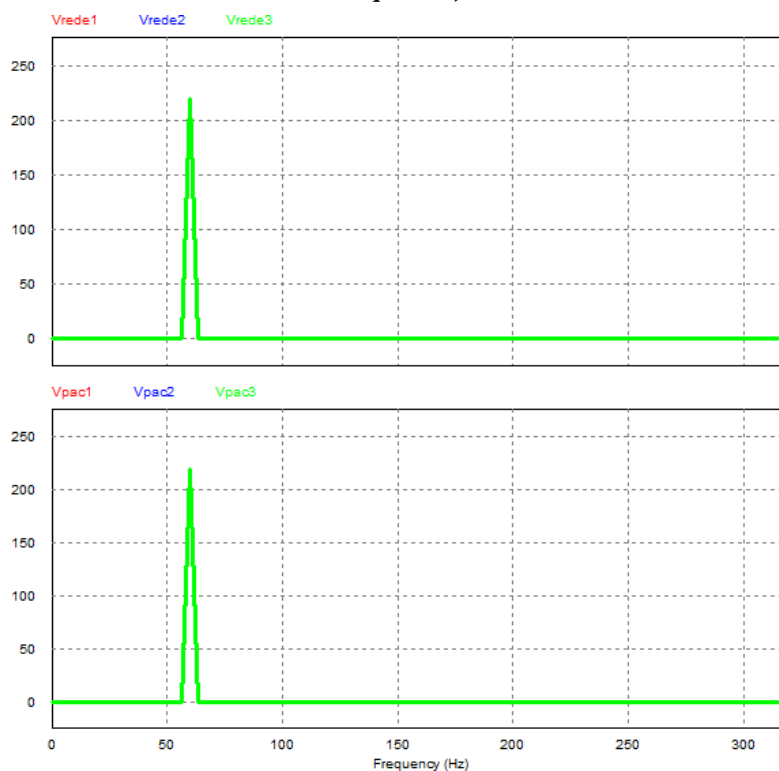
Neste cenário, consideramos a inserção de um sistema gerador fotovoltaico que corresponde a 5% da carga de referência. Ao analisarmos as formas de onda no domínio do tempo apresentadas nas Figuras 17 e 18, observou-se que as tensões nos pontos próximo à alimentação *Vrede* e no PAC *Vpac* mantiveram-se estáveis, sem a presença de ruídos significativos. Isso indica que, neste nível de penetração, a inserção de geração fotovoltaica não causou impactos notórios na qualidade da tensão da rede elétrica.

Figura 17: Cenário 1 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio do tempo)



Fonte: Autoria Própria (2023).

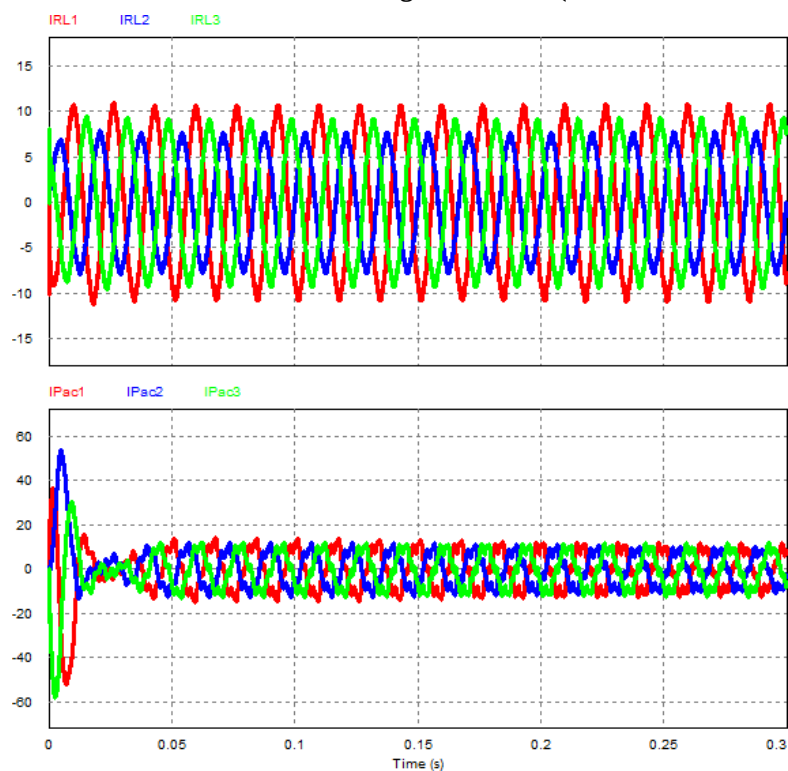
Figura 18: Cenário 1 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio da frequência)



Fonte: Autoria Própria (2023).

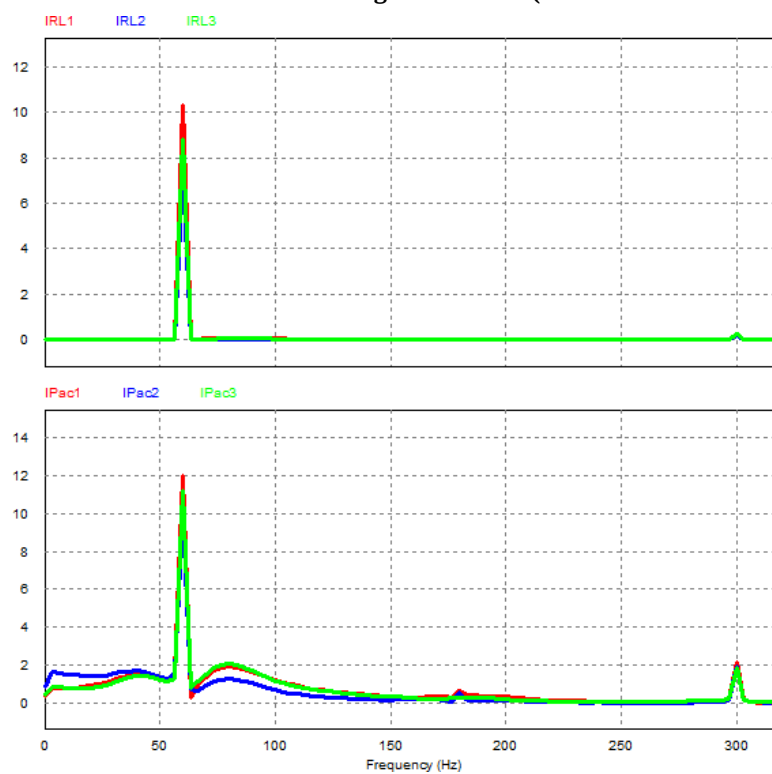
Referente às correntes, as formas de onda na carga também não apresentaram alterações significativas, reforçando a ideia de que a geração fotovoltaica de 5% não afeta de maneira relevante a QEE do sistema. As Figuras 19 e 20 a seguir apresentam os gráficos de correntes analisadas nas cargas e no PAC, referentes às três fases do sistema.

Figura 19: Cenário 1 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio do tempo)



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 20: Cenário 1 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio da frequência)



Fonte: Autoria Própria (2023).

Se tratando dos níveis de DHT no cenário abordado, percebe-se que estes estão dentro dos limites definidos, de acordo com a literatura utilizada. A Tabela 8 abaixo ilustra os níveis de DHT₁ obtidos através do *Simview*, para o cenário de 5% de inserção utilizado:

Tabela 8 - Níveis de DHT de corrente no Cenário 1

DHT₁ [%]	
Fundamental Frequency	60 Hz
IRL1	4.75700e-002
IRL2	4.92423e-002
IRL3	4.95236e-002
IPac1	2.32591e-001
IPac2	2.59388e-001
IPac3	2.24898e-001

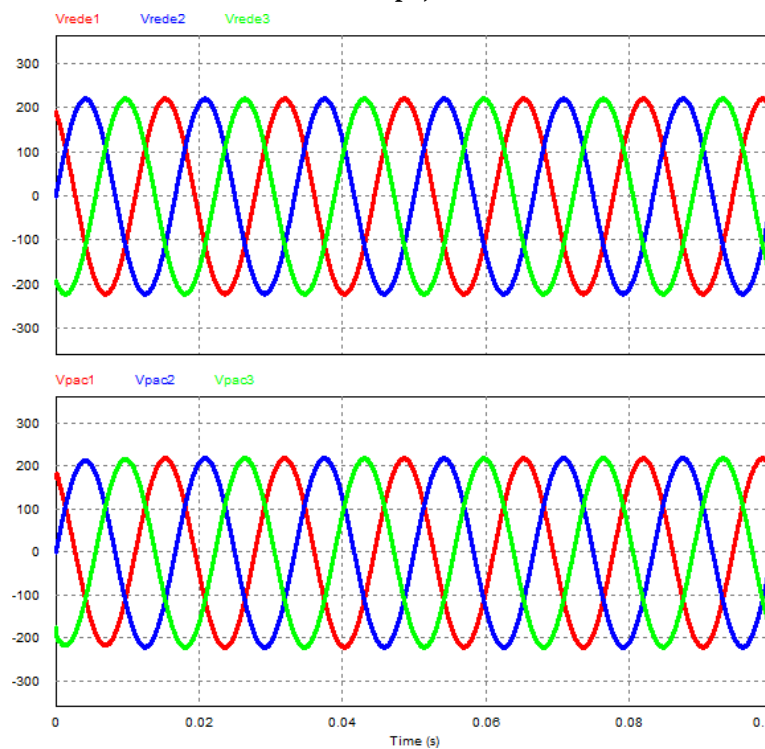
Fonte: Autoria Própria (2023).

No cenário de 5%, observou-se que a inserção de geração fotovoltaica parece ter um impacto mínimo sobre a QEE na rede elétrica, o que sugere que os níveis baixos de penetração podem ser alcançados monitorando-se continuamente a qualidade e eficiência dos equipamentos utilizados, sem a necessidade de grandes ajustes ou controles na rede.

4.2 Cenário 2: 31,5% de penetração em relação a potência da rede de 10 kW

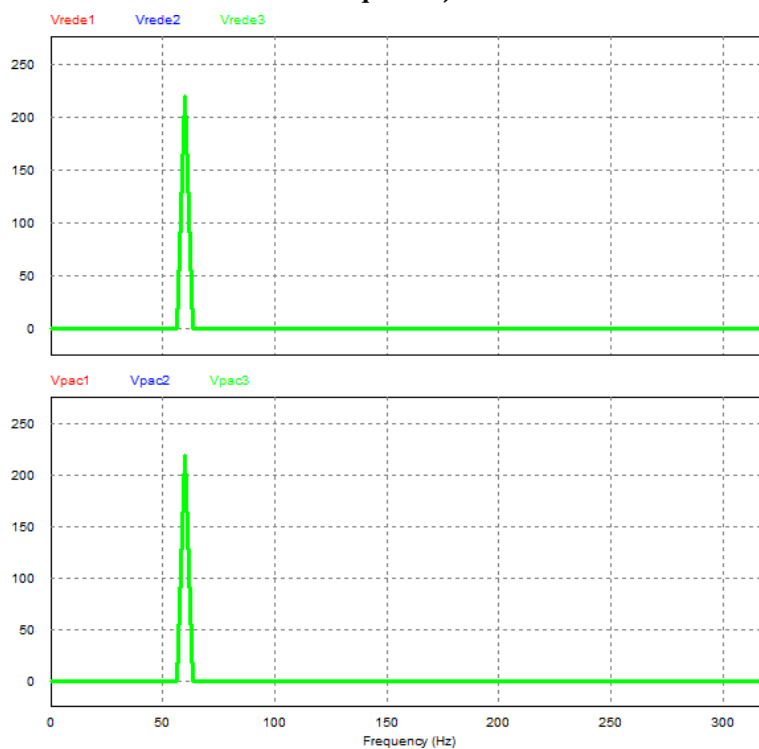
Neste cenário, com aproximadamente um terço da energia sendo produzida por fontes fotovoltaicas, esperava-se que evidenciasse maiores impactos da inserção da geração fotovoltaica na qualidade da energia elétrica, com as formas de onda com maiores distorções, em grande parte, devido as harmônicas induzidas pelo conjunto do sistema fotovoltaico. No entanto, a variação dos níveis de tensão foi considerada pequena, o que pode se dá ao fato das idealidades da rede elétrica implementada. Nas Figuras 21 e 22, estão ilustrados os sinais de tensão nos pontos analisados.

Figura 21: Cenário 2 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio do tempo)



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 22: Cenário 2 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio da frequência)

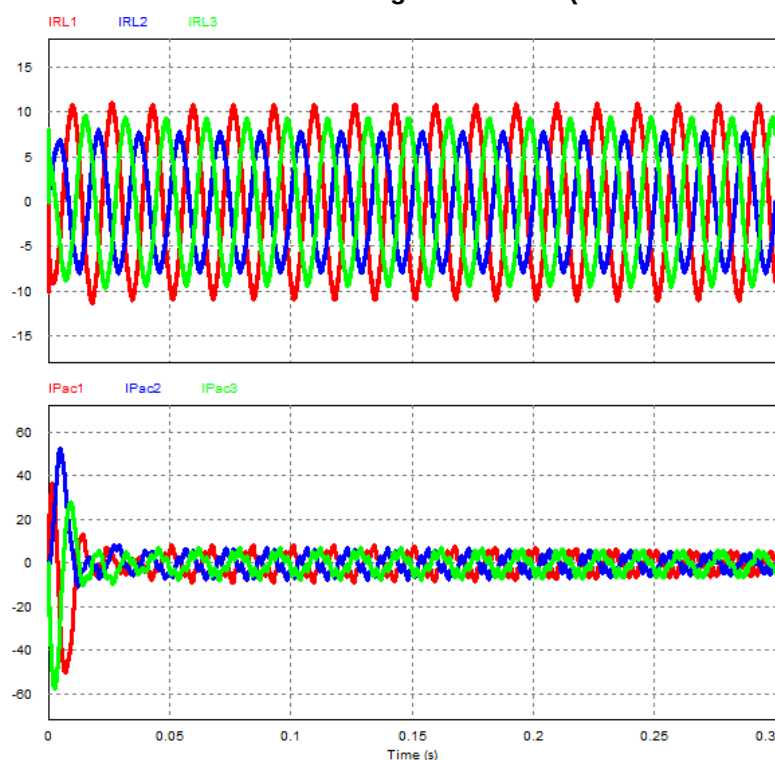


Fonte: Autoria Própria (2023).

Em relação às correntes, como apresentado na Figura 23, houve uma diminuição das correntes no PAC, que podem ser devido à geração local de eletricidade pelos sistemas fotovoltaicos, visto que em um sistema de distribuição de energia elétrica, a corrente que flui através do PAC é tipicamente a soma da corrente de carga e da corrente de geração. No cenário de baixa penetração de GFV, a maior parte da corrente no PAC seria atribuída à corrente de carga, pois a maior parte da eletricidade é fornecida pela rede. No entanto, à medida que aumentamos a penetração da GFV, uma porção maior da demanda de energia é atendida localmente pelos sistemas fotovoltaicos.

É importante notar que essa diminuição das correntes no PAC pode ter efeitos na operação da rede, incluindo potenciais melhorias na eficiência e na perda de energia, mas também pode apresentar desafios em termos de gerenciamento e controle da rede, especialmente em cenários de alta penetração de GFV.

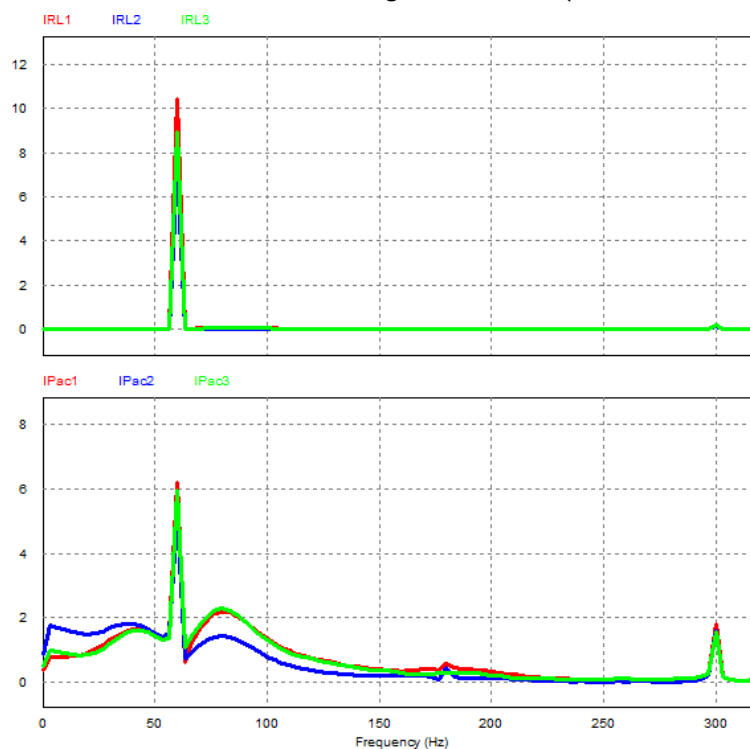
Figura 23: Cenário 2 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio do tempo)



Fonte: Autoria Própria (2023).

A análise no domínio da frequência evidencia a presença dessas componentes no sinal de onda, especialmente com valores bastante elevados. Esse fenômeno observado na Figura 24 pode ser atribuído à maior penetração da geração fotovoltaica e injeção de corrente na rede elétrica.

Figura 24: Cenário 2 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio da frequência)



Fonte: Autoria Própria (2023).

Na análise do domínio da frequência, os sinais obtidos podem sugerir a presença de harmônicos de valores elevados no PAC. Analisando-se os sinais de correntes, é possível observar a presença de componentes distintas da frequência fundamental de 60Hz. Caso que não ocorreu nas correntes das cargas. Este fato fica evidente se analisarmos os níveis de DHT_i apresentados na Tabela 9 a seguir, onde é possível observar e se comprovar, além do gráfico analisado no domínio da frequência, a presença de componentes harmônicas de corrente que ultrapassam os valores limites definidos pela NBR – 16149.

Tabela 9 - Níveis de DHT de corrente no Cenário 2

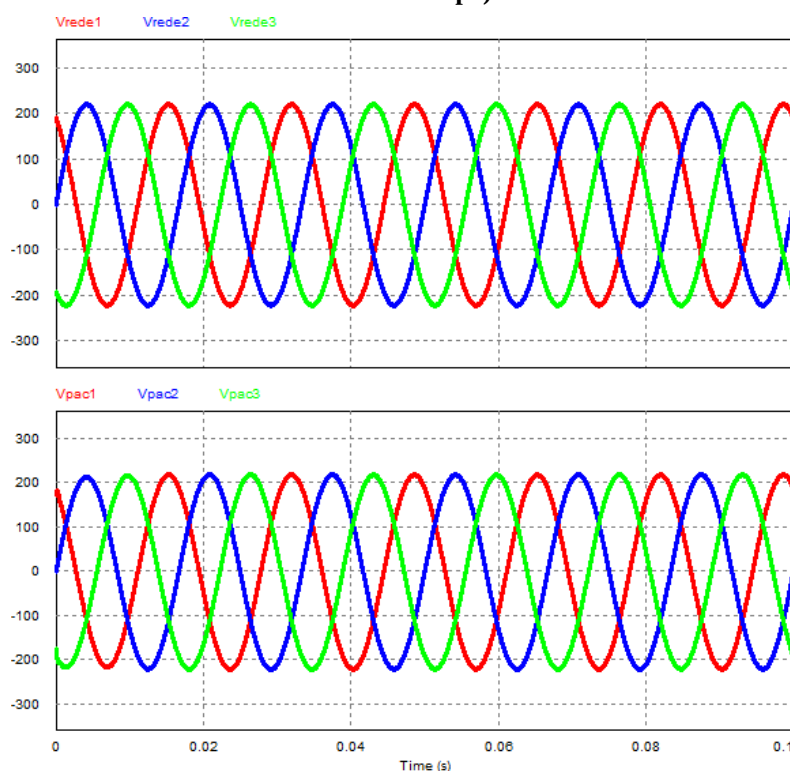
DHT_i [%]	
Fundamental Frequency	60 Hz
IRL1	3.81046e-002
IRL2	3.88249e-002
IRL3	3.98702e-002
IPac1	4.04720e-001
IPac2	3.98097e-001
IPac3	3.79516e-001

Fonte: Autoria Própria (2023).

2. 4.2 Cenário 3: 45% de penetração em relação a potência da rede de 10 kW

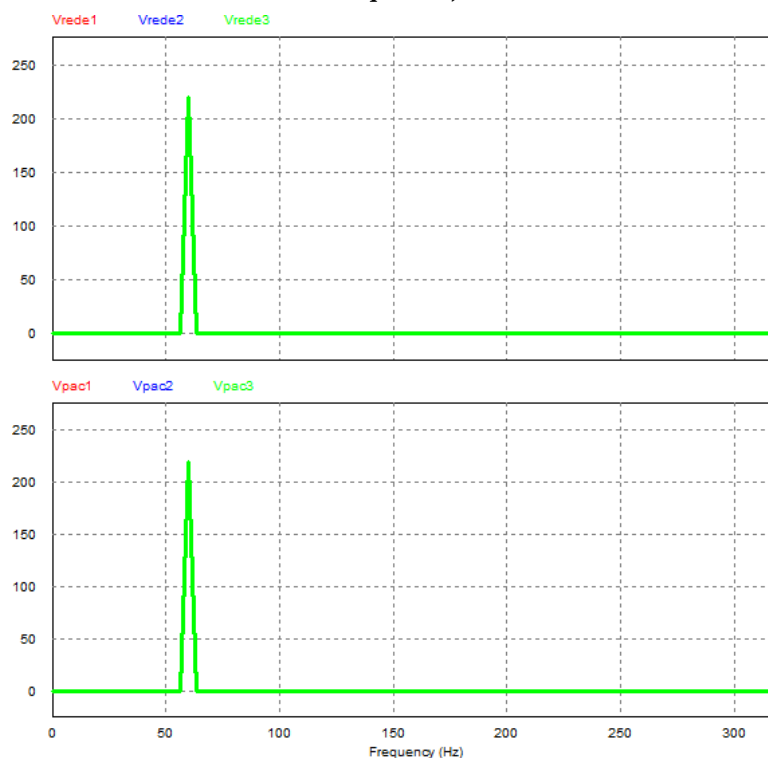
No terceiro e mais extremo cenário, os resultados obtidos foram semelhantes ao cenário de 31,5% de penetração, o que já era esperado, considerando a pequena mudança de variáveis. Nas formas de onda de tensão, nenhum efeito significativo foi observado, e, mais uma vez, destaca-se que a ausência de efeitos pode ser devido à configuração idealizada da rede implementada para simulação, sendo necessária uma implementação mais detalhista e elaborada para resultados mais próximos da realidade.

Figura 25: Cenário 3 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio do tempo)



Fonte: Autoria Própria (2023).

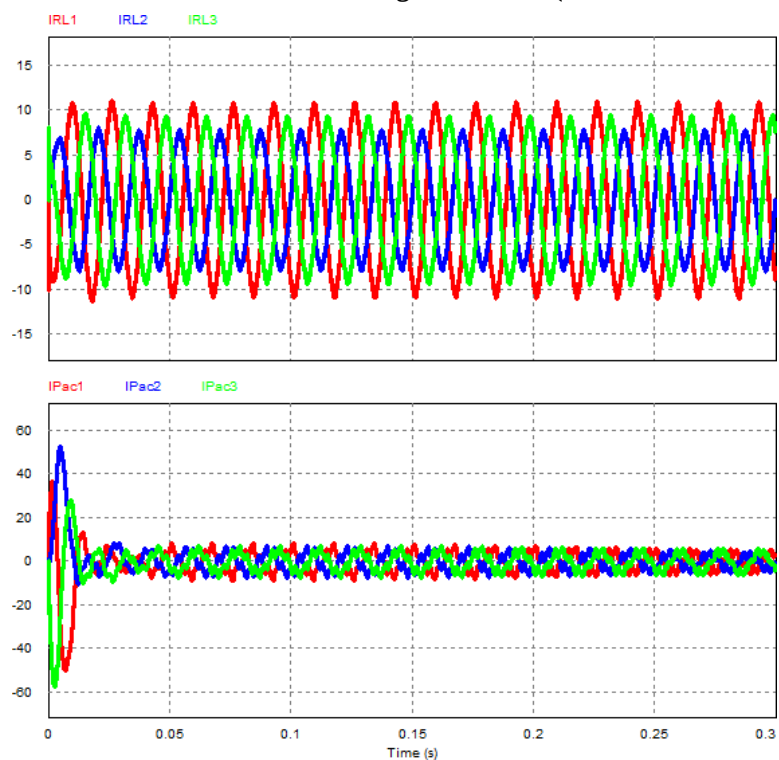
Figura 26: Cenário 3 - Sinais de tensão nos pontos próximo a alimentação e no PAC (Análise no domínio da frequência)



Fonte: Autoria Própria (2023).

No que diz respeito às formas de onda de corrente, com quase a metade da energia sendo fornecida localmente pelos sistemas fotovoltaicos, a corrente no PAC diminuiu um pouco mais em comparação com o cenário de 31,5% de penetração de GFV. Isso poderia sugerir uma eficiência operacional melhorada, já que a demanda na rede principal está sendo reduzida.

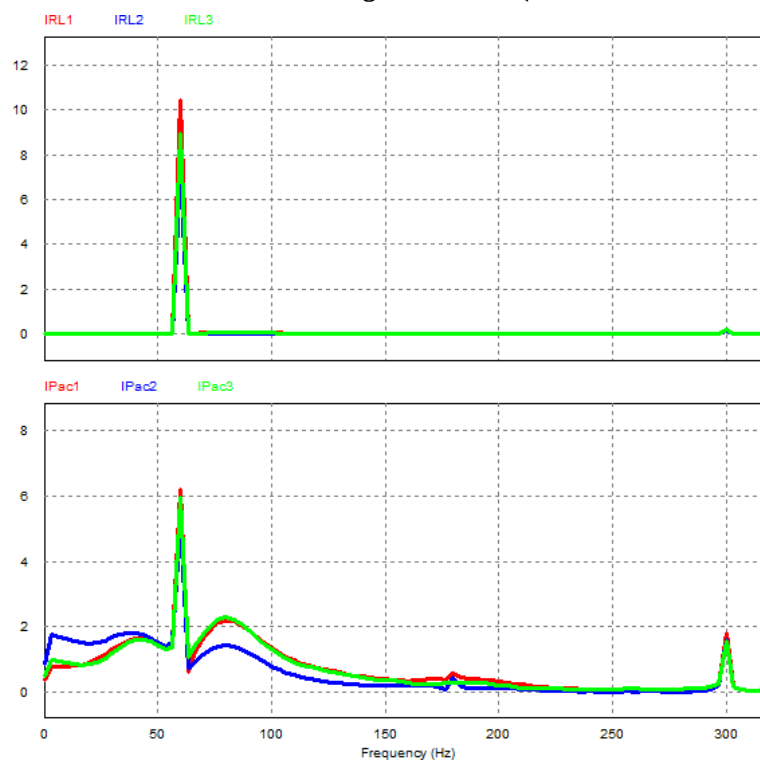
Figura 27: Cenário 3 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio do tempo)



Fonte: Autoria Própria (2023).

No entanto, este alto nível de geração fotovoltaica pode levar a uma maior flutuação na corrente do PAC. Assim como ocorrido no cenário de 31,5% de penetração de geração fotovoltaica na rede, os sinais de corrente analisados no domínio da frequência sugerem a presença de componentes de diferentes frequências adicionadas ao sistema.

Figura 28: Cenário 3 - Sinais de corrente nas cargas e no PAC (Análise no domínio da frequência)



Fonte: Autoria Própria (2023).

A análise deste cenário, trouxe evidências do impacto da inserção da geração fotovoltaica na QEE, visto que as variações nos sinais de correntes são indicativas de que a rede está sendo afetada pela maior contribuição da geração fotovoltaica. De forma semelhante ao que ocorreu no caso anterior, é possível verificar, através da Tabela 10, a elevação dos níveis de DHT_I sendo influenciados pela maior inserção de geração fotovoltaica no sistema da rede de distribuição analisada.

Tabela 10 - Níveis de DHT de corrente no Cenário 3

DHT_I [%]	
Fundamental Frequency	60 Hz
IRL1	3.81046e-002
IRL2	3.88249e-002
IRL3	3.98702e-002
IPac1	4.04720e-001
IPac2	3.98097e-001
IPac3	3.79516e-001

Fonte: Autoria Própria (2023).

Desta forma, com o objetivo de avaliar os impactos potenciais na rede de distribuição elétrica decorrentes de um aumento na conexão de sistemas geradores fotovoltaicos, uma análise comparativa considerando os sinais de tensão, corrente e distorções harmônicas nos três cenários simulados distintos possibilitou uma apreciação mais aprofundada dos efeitos causados na rede elétrica à medida que mais sistemas fotovoltaicos são conectados. A comparação dos sinais gerados em cada cenário fornece um retrato claro dos possíveis desafios associados à expansão da geração fotovoltaica.

Um resultado particularmente significativo que emergiu da análise comparativa dos cenários de 5%, 31,5% e 45% de geração foi a constatação de que um maior número de GFV pode influenciar de maneira substancial os níveis de QEE. Mais especificamente, nota-se que uma maior inserção de sistemas de geração fotovoltaica na rede elétrica pode levar a um aumento proporcional dos componentes de DHT_I . Esta conclusão sugere que, enquanto a inserção de mais sistemas fotovoltaicos na rede elétrica tem o potencial de contribuir para a transição energética rumo a uma matriz mais sustentável, também é necessário avaliar os possíveis desafios associados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, a QEE foi avaliada em diferentes cenários de penetração de geração fotovoltaica em uma rede trifásica 220/380V, com uma potência disponibilizada de 10kW. Três cenários foram considerados, representando 5%, 31,5% e 45% da penetração de geração fotovoltaica em relação à potência disponibilizada na rede.

No primeiro cenário, com uma penetração baixa de 5%, os efeitos da geração fotovoltaica na QEE foram discretos. As formas de onda de tensão e corrente mantiveram-se senoidais e estáveis, sem distorções significativas, e a tensão no PAC não apresentou alterações visíveis.

Com um aumento de 31,5% de penetração, surgem indícios de DHT_I analisadas no PAC, inclusive com a presença de componentes harmônicas ímpares de 3ª e 5ª ordem acima do limite de distorção (4,0%) definido pela NBR – 16149. Esses resultados reforçam a necessidade de estudos mais detalhados e mecanismos de controle mais eficientes à medida que a penetração de geração fotovoltaica aumenta.

Considerando o terceiro e mais extremo cenário, com uma penetração alta de 45%, os impactos na QEE foram semelhantes ao cenário anterior de 31,5%, com características levemente mais significativos. Ainda assim, a tensão no PAC apresentou uma presença notável de componentes harmônicas ímpares acima do limite de distorção desejado, assim como no caso anterior.

Com base na avaliação dos sinais de tensão, corrente e dos distúrbios causados pela adição de componentes harmônicos, nota-se que a penetração de geradores fotovoltaicos pode afetar os níveis de QEE, principalmente nos pontos mais próximos à geração. Além disso, a natureza das cargas conectadas a um sistema elétrico, assim como a variação da demanda ao longo do tempo, apresenta um impacto na QEE. A utilização de filtros ativos e passivos nas saídas dos inversores, por exemplo, e de técnicas de controle já existentes, é necessária, podendo trazer benefícios para o fornecimento de energia em geral.

Com a inserção de sistemas fotovoltaicos injetando energia na rede elétrica, uma parcela menor da demanda total de energia precisa ser fornecida pela rede, o que resulta em uma diminuição na corrente que flui através do PAC. Em outras palavras, à medida que mais energia é gerada localmente pelos sistemas fotovoltaicos, menos energia precisa ser fornecida pela rede, resultando em uma diminuição das correntes no PAC.

É importante notar que essa diminuição das correntes no PAC pode ter efeitos na operação da rede, incluindo potenciais melhorias na eficiência e na perda de energia, mas também pode apresentar desafios em termos de gerenciamento e controle da rede, especialmente em cenários de alta penetração de GFV.

Neste sentido, mesmo diante dos desafios associados à natureza multifacetada da QEE, o trabalho proposto foi realizado e alcançou os objetivos estabelecidos, de forma a se contribuir com futuras investigações mais profundas e refinadas. No entanto, é necessário reconhecer algumas limitações desse estudo. Primeiramente, a análise foi realizada em uma rede idealizada, sem considerar a variabilidade de condições do ambiente na geração fotovoltaica e a demanda da carga foi considerada de acordo com a potência disponibilizada estimada para a rede elétrica.

Para uma pesquisa ainda mais aprimorada, seria interessante a realização de análises de sensibilidade, variando não apenas os níveis de penetração de geração fotovoltaica, mas também outras variáveis, como a radiação solar e a temperatura ambiente. Isso permitiria uma compreensão mais aprofundada de como diferentes fatores podem afetar a qualidade da energia na rede de distribuição.

Outro ponto, é que a análise focou prioritariamente nas elevações de tensão e corrente e distorções harmônicas, deixando de lado outros parâmetros importantes da QEE, como o desequilíbrio da tensão e a regulação do fator de potência. Pesquisas envolvendo o desenvolvimento de estratégias avançadas de controle e proteção, a análise da coordenação e integração de sistemas fotovoltaicos, além da avaliação dos impactos da alta penetração desses sistemas na operação e planejamento da rede elétrica, poderão contribuir para aprimorar a estabilidade, qualidade e segurança do sistema elétrico em situações críticas. Todos esses aspectos mencionados representam potenciais áreas para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ABNT, NBR – 16149: **CARACTERÍSTICAS DA INTERFACE DE CONEXÃO COM A REDE DE DISTRIBUIÇÃO**. Rio de Janeiro, 2013.

ABREU JUNIOR, Breno Antonio Ribas de. **APLICAÇÃO DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA PARA MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SOB DISTÚRBO DE QUALIDADE DE ENERGIA**. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Bauru - Unesp, Bauru – São Paulo, 2015.

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **INFOGRÁFICO ABSOLAR**. 24. ed. São Paulo. 2023

ALVES, G. H. **ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL PARA USO RESIDENCIAL**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.

ANEEL. Módulo 8 – QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST**, 2021. 69p

ANEEL. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST** Módulo 8 – QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015. 76P. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf Acesso em 08/05/2023.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NOMARTIVA 482**:Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Brasília: Aneel, 2012. 13 p.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 687**, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015: 25 p. 2015. BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 25. 2015.

AYIKPA, M. E. **MODELAGEM DE CENTRAIS FOTOVOLTAICAS NO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO TRIFÁSICO PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DESBALANCEADOS**. 2017. 152 F. Dissertação – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

BEN - Balanço Energético Nacional - **RELATÓRIO SÍNTESE ANO BASE 2015**. 2016. BRINKEL, N. et al. **IMPACT F RAPID PV FLUCTUATIONS ON POWER QUALITY IN THE LOW-VOLTAGE GRID AND MITIGATION STRATEGIES USING ELETRIC VEHICLES**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier BV, v. 118p. 105741, 2020.

CARRASCO, *et al.* **QUALITY OF SERVICE IMPROVEMENT THROUGHT DISTRIBUTED GENERATION: A case study.** Applied Energy, v. 226, p. 1135-1143, 2018.

CARVALHO, J. L. *et al.* **ESTUDO DO IMPACTO DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO COM GERADOR FOTOVOLTAICA.** 2017.

Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Brasília: Aneel, 2012. 13 p.

DUGAN, R. C. *et al.* **ELECTRICAL POWER SYSTEMS QUALITY.** 2ª Edição. The McGraw-Hill Companies, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2019-** Ano Base 2018. Brasil, 2019.

FERREIRA, S. A. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA: Desafios e Oportunidades.** Anais do IX Congresso Brasileiro de Redes Elétricas Inteligentes. 2017.

Figueiredo, M. C. *et al.* **IMPACT OF VOLTAGE FLUCTUATIONS ON THE PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 103, 372-381. 2018.

FORTESCUE, C. L. **METHOD OF SYMMETRICAL COORDINATES APPLIED TO THE SOLUTION OF POLYPHASE NETWORKS.** Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 37, n. 2, p. 1027 - 1140, 1918.

FREITAS, W. R. H.; SANTOS, S. F.; OLIVEIRA, A. C.; SILVA, L. C. P. **ANÁLISE DO DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.** 2017.

GONZÁLEZ, P. *et al.* **IMPACT OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN THE POWER QUALITY OF A DISTRIBUTION NETWORK.** In: Camarinha-Matos L.M. (eds) Technological Innovation for Sustainability. DoCEIS 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 349. Springer, Berlin, Heidelberg.

GUIMARÃES, Rodrigo. **A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL E SEUS IMPACTOS SOBRE O SETOR DE DISTRIBUIÇÃO.** 2020.

IEA. International Energy Agency. **SOLAR ENERGY.** 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/renewables/solar/>. Acesso em: 20/04/2023.

IEA. International Energy Agency. **SOLAR PHOTOVOLTAIC (PV).** 2020. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/solar-photovoltaic>. Acesso em: 20/04/2023.

IEEE. IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY. IEEE Std 1159-2009 (*Revision of IEEE Std 1159-1995*). 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE); CENTRO DE CIÊNCIA DO SISTEMA TERRESTRE (CCST); LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (LABREN). **ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR.** São José dos Campos, 2017. 80 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60904-3:2019: **PHOTOVOLTAIC DEVICES – PART 3: MEASUREMENT PRINCIPLES FOR TERRESTRAL PHOTOVOLTAIC (PV)** solar devices with reference spectral irradiance data. Geneva: IEC, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **DISTRIBUTED SOLAR PV.** Disponível em: Acessado em: 08/05/2023.

IPCC. Climate Change 2014: **SYNTHESIS REPORT. CONTRIBUTION OF WORKING THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE.** Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.) IPCC Geneva, Switzerland, 151 pp. (2014).

JUNIOR, E. L. R. **MODELAGEM DE CENTRAIS FOTOVOLTAICAS NO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COM APLICAÇÃO A SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.** Universidade Federal de Santa Catarina. [S.l.], p. 136. 2015.

KATIRAEI, F.; AGUERO, J. R. **SOLAR INTEGRATION: ADDRESSING THE CHALLENGES OF HIGH-PENETRATION PV DEPLOYMENTS ON THE DISTRIBUTION GRID.** IEEE Power Energy Mag. 2011, 9, 62–71.

LOPES, J. P. **ELETRICIDADE: UMA BREVE HISTÓRIA.** São Paulo: Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2016.

MACÊDO, W. N. **ANÁLISE DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR APLICADO A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE.** 2006. 183 f. Tese (Doutorado em Energia) – Escola Politécnica da Faculdade de Economia e Administração e Instituto de Eletrotécnica e Energia e Instituto de Física da Universidade de São Paulo. 2019.

MAMEDE, J. L. P. **INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS.** 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MEHL, E. L. M. **QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**. 8p. 2004.

MME. **BOLETIM DE MONITORAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO**, 48p. 2023.

NERIS, A. **CASA VERDE E AMARELA: a energia solar beneficiará famílias de baixa renda**. Aldo Solar, 21 maio 2021. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/casa-verde-e-amarela-a-energia-solar-beneficiara-familias-de-baixa-renda/>. Acesso em 16/05/2023.

NUNES, E. A. F. **ANÁLISE DE IMPACTOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DECORRENTES DA INSERÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICOS**. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do RioGrande do Norte, Natal, 2017.

OLESKOVICZ, M. Qualidade da energia elétrica – **APOSTILA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA USP**– Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

Operador Nacional do Sistema (ONS). **GERENCIAMENTO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO DA REDE BÁSICA E DOS BARRAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE FRONTEIRA, E DE SEUS COMPONENTES**: Sub-módulo 8. 9 nov. 2011.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/ons-operador-de-sistema/ons-operador-de-sistema.aspx>. Acesso em: 10/04/ 2021.

PALUDO, J. A. **AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE ELEVADOS NÍVEIS DE PENETRAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM REGIME PERMANENTE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

POLL, F. C. **ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM BAIXA TENSÃO: ESTUDO DE CASO EM UM AMBIENTE UNIVERSITÁRIO**. 2013. 91 f. TCC (Doutorado) - Curso de Bacharel em Engenharia Elétrica, Fundação Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

QUINTÃO, M.; **PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**. João Monlevade, 2017.

SILVA, A. K. F. *et al.* **ESTUDO DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE.** 2018. 8 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, Rn, 2018.

SILVA, F. B. *et al.* **ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA REGIÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO.** 8º Congresso Brasileiro de Regulação de Energia, São Paulo, Brasil.2017.

SILVA, R. A. *et al.* **CONEXÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM REDES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO: PROBLEMAS E SOLUÇÕES.** In: III Congresso Brasileiro de Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, Florianópolis: UFSC, 2016. p. 1-8.