

João Pedro Nunes Rossi

Análise da Qualidade de Energia de um Sistema Fotovoltaico Instalado em Viçosa-MG

Viçosa - MG, Brasil

2023

JOÃO PEDRO NUNES ROSSI

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO INSTALADO EM VIÇOSA-MG**

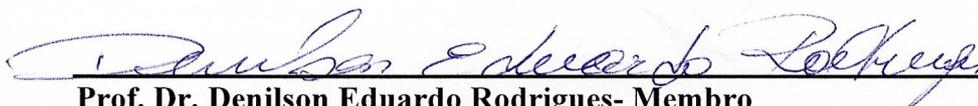
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 23 de Junho de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Denilson Eduardo Rodrigues- Membro
Universidade Federal de Viçosa



Eng. Didary Gonçalves - Membro
Universidade Federal de Minas Gerais

João Pedro Nunes Rossi

Análise da Qualidade de Energia de um Sistema Fotovoltaico Instalado em Viçosa-MG

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos referentes à disciplina ELT 402 - Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Viçosa
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Mauro de Oliveira Prates

Viçosa - MG, Brasil

2023

À minha família.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por colocar as pessoas certas no meu caminho, o que, sem dúvidas, contribuiu para a conclusão desta etapa.

Aos meus pais Silvana e João, por terem me criado, e dado o direcionamento para as melhores escolhas ao longo da minha formação, até aqui. Às minhas irmãs Stephania e Bruna, pelo companheirismo nos momentos difíceis. À minha sobrinha Antonella, que chegou recentemente para renovar as energias nesta jornada.

Aos amigos que a ELT colocou no meu caminho, em especial ao César e o Thiago, que compartilharam os momentos mais complexos, e também as conquistas desta graduação, contribuindo para que este período seja mais leve e menos desgastante. À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao departamento de Engenharia Elétrica (DEL), e todos funcionários da UFV, que estiveram comigo no dia a dia ao longo dos anos de graduação.

Agradeço também aos projetos de extensão Fórmula UFVolts Majorados e Dielétrica, pela oportunidade de desenvolver trabalhos e experimentar um pouco do ambiente profissional.

Por fim agradeço aos amigos e parceiros da T3 Engenharia Elétrica, por acreditarem neste sonho e se aventurarem no mundo do empreendedorismo junto a mim, mesmo durante a graduação. Agradeço também ao Matheus Moraes, por compartilhar as primeiras experiências profissionais desta graduação.

Muito obrigado,
João Pedro Rossi

*“O mais competente não discute,
domina a sua ciência e cala-se.”*

Voltaire

Resumo

As profundas mudanças que os sistemas de distribuição de energia elétrica vêm experimentando, devido ao crescimento no emprego de unidades de Geração Distribuída, têm resultado na alteração da forma tradicional de controlar e operar o sistema elétrico. A conexão em larga escala de unidades de geração distribuída acarreta às distribuidoras de energia uma série de desafios técnicos, econômicos e regulatórios, que se fazem necessários para manter a confiabilidade, continuidade no fornecimento e o nível de Qualidade da Energia Elétrica no sistema, principalmente devido à bidirecionalidade do fluxo de potência na rede. Diante do exposto, a proposta deste trabalho é analisar os impactos da geração distribuída, especificamente a fotovoltaica, na rede de distribuição secundária de baixa tensão, sob parâmetros de Distúrbios harmônicos e Distúrbios de tensão, através de dados coletados de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede de 15KW presente em Viçosa, MG. Os dados técnicos da instalação foram obtidos através da documentação técnica referentes à implementação da usina, a curva de carga obtido através de medição in loco utilizando analisador de qualidade da energia elétrica. Neste trabalho é feita a correlação entre operação do sistema e impactos observados nos parâmetros abordados, visando analisar tecnicamente a qualidade da energia elétrica do sistema em questão. Foi possível observar que a operação do Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede impactou no perfil de tensão, a qual sofreu elevação em períodos de alta geração, caracterizados pela injeção do excedente de potência ativa na rede. Também pode-se verificar que este sistema em operação nominal não ocasionou extrapolação nos limites de distorção harmônica de tensão, e também no desequilíbrio de tensão. Já em períodos de baixa produção, notou-se um aumento na distorção harmônica da corrente elétrica injetada pelo inversor fotovoltaico.

Palavras-chaves: Geração distribuída, Qualidade de energia elétrica, Sistemas fotovoltaicos, Distúrbios de harmônicos, Distúrbios de tensão.

Abstract

The profound changes that electrical energy distribution systems are experiencing, due to the growth in the use of Distributed Generation units, have resulted in changing the traditional way of controlling and operating the electrical system. A large-scale connection of distributed generation units entails to the distribution companies of energy a series of technical, economic and regulatory challenges, which are necessary to maintain the reliability, continuity of supply and the level of Quality of Electrical energy in the system, mainly due to the bidirectionality of the power flow on the network. Given the above, the purpose of this work is to analyze the impacts of generation distribution, specifically photovoltaic, in the secondary low-cost distribution network voltage, under parameters of Harmonic Disturbances and Voltage Disturbances, through data collected from a 15KW Grid Connected Photovoltaic System present in Vicoso, MG. The technical data of the installation were obtained through the technical documentation referring to the implementation of the plant, the load curve obtained through in loco measurement using power quality analyzer. In this work, the correlation between system operation and impacts observed on the parameters addressed, aiming to technically analyze the quality of the electrical energy of the system in question. It was possible to observe that the operation of the Photovoltaic System Connected to the Grid had an impact on the profile of tension, which increased in periods of high generation, characterized by injection of surplus active power in the network. It can also be verified that this system in Nominal operation did not cause extrapolation within voltage harmonic distortion limits, and also in voltage imbalance. Already in periods of low production, it was noticed an increase in the harmonic distortion of the electric current injected by the photovoltaic inverter.

Key-words: Distributed Generation, Power Quality, Photovoltaic Systems, Harmonic Disturbances, Voltage Disturbances.

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxo de potência com fonte de geração centralizada e GD.	16
Figura 2 – Matriz elétrica brasileira: Potência Instalada em Operação (MW). . . .	20
Figura 3 – Portfólio de capacidade de produção das fontes renováveis no Brasil. .	21
Figura 4 – Rede elétrica com geração distribuída.	21
Figura 5 – Matriz elétrica do Brasil em 2023 (ANEEL).	22
Figura 6 – Demandas residenciais e comerciais para SFCR com excedente de produção.	24
Figura 7 – Arranjo fotovoltaico em módulo fotovoltaico.	25
Figura 8 – Esquema de funcionamento do SFCR.	26
Figura 9 – Medição bidirecional em sistemas SFCR.	26
Figura 10 – Oscilograma com alguns dos principais distúrbios de QEE.	28
Figura 11 – Oscilograma com componente fundamental e harmônicos.	31
Figura 12 – Esquema de ligação utilizado	36
Figura 13 – Montagem do equipamento utilizado.	37
Figura 14 – Perfil da potência ativa trifásica injetada - dia 02/06.	39
Figura 15 – Distorção harmônica total de tensão por registro.	43
Figura 16 – Perfil da corrente de saída do inversor dia 04/06, nas fases A, B e C. .	43
Figura 17 – Comportamento do DIT de ordem 5 dia 03/06.	44
Figura 18 – Comportamento do DIT de quinta ordem dia 03/06.	44
Figura 19 – FD95% para dia 31/05.	45
Figura 20 – FD95% para dia 30/05.	45

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Limites para desequilíbrio de tensão.	30
Tabela 2 – Terminologia para cálculo do desequilíbrio de tensão	30
Tabela 3 – Limite das distorções harmônicas totais.	34
Tabela 4 – Mínimos e Máximos para tensão de linha	40
Tabela 5 – Mínimos e Máximos para tensão de fase	40
Tabela 6 – Indicadores DRP e DRC para Tensão de linha	41
Tabela 7 – Indicadores DRP e DRC para Tensão de fase	41
Tabela 8 – Variações de tensão de curta duração	41
Tabela 9 – Indicadores de Distorção Harmônica	42
Tabela 10 – Indicadores Totais de Distorção Harmônica	42

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SFCR	Sistema fotovoltaico conectado a rede
DRP	Duração relativa de transgressão de tensão precária
DRC	Duração relativa de transgressão de tensão crítica
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
GD	Geração Distribuída
GC	Geração Centralizada
UC	Unidade consumidora
BT	Baixa tensão
MT	Média tensão
MPPT	Maximum Power Point Tracker
FV	Fotovoltaico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
RN	Resolução Normativa
NREL	National Renewable Energy Laboratory
SIN	Sistema Interligado Nacional
RMS	Root medium square
PCH	Pequena Central Hidrelétrica

CGH	Central de Geração Hidrelétrica
EOL	Central Geradora Eólica
UFV	Central Geradora Fotovoltaica
UTE	Usina Termelétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
QGBT	Quadro geral de distribuição de baixa tensão
SEP	Sistema Elétrico de Potência
IEA	Agência Internacional de Energia

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Visão Geral	15
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivos Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Organização do Texto	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	Sistema Solar Fotovoltaico	19
2.2	Geração Distribuída	20
2.2.1	Vantagens da Geração Distribuída	22
2.2.2	Desvantagens da Geração Distribuída	23
2.2.3	Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos	25
2.3	Qualidade de Energia Elétrica	27
2.4	Transitório	28
2.4.1	Transitório Impulsivo	28
2.4.2	Transitórios Oscilatórios	28
2.5	Desequilíbrio de Tensão	29
2.6	Variações RMS de Curta Duração	30
2.7	Variações RMS de Longa Duração	31
2.8	Harmônicos	31
2.8.1	Indicadores de QEE de Distorções Harmônicas	32
2.9	Tensão em Regime Permanente	34
2.10	Categorias dos SFCR	35
2.11	Considerações Parciais	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Descrição do Sistema Fotovoltaico	36
3.2	Coleta de dados	36
3.3	Análise de dados	37
3.3.1	Primata	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Análise das Curvas de Potência	39
4.2	Comportamento da Tensão em Regime Permanente	39
4.3	Análise de Distúrbios de Tensão	41

4.4	Análise de Harmônicos	42
4.5	Análise do Desequilíbrio de Tensão	45
4.6	Considerações Parciais	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	BIBLIOGRAFIA	49

1 Introdução

Este capítulo é introdutório e tem como objetivo apresentar o panorama de crescimento na demanda por energia elétrica, a difusão do uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica, explanando sobre os impactos da geração distribuída na rede de distribuição, relacionados à qualidade de energia elétrica e apresentando o objetivo do presente trabalho.

1.1 Visão Geral

Com a expansão dos centros urbanos, as cargas foram se localizando cada vez mais longe da fonte geradora de energia e a demanda de energia elétrica aumenta constantemente. Dessa forma, fez-se necessário integrar um sistema de distribuição robusto, que fosse capaz de transmitir a potência requerida pelas cargas. É fato que as redes de distribuição, tanto de baixa quanto de alta tensão, foram projetadas para operar em um modelo de geração centralizada, em que o fluxo de potência acontece em um único sentido, da fonte geradora para a carga. Vale ressaltar que, a geração centralizada muitas vezes está ligada ao processo de produção de energia elétrica através de fontes não-renováveis, principalmente em países com baixa capacidade hídrica.

O constante crescimento do consumo energético mundial acaba por permitir melhor qualidade de vida para a população, ao poder usufruir das comodidades modernas movidas a eletricidade. Porém, a preocupação com o aquecimento global também se intensifica, e a produção de energia utilizando fontes de origem fósseis contribuem diretamente para o aumento da emissão de gases de efeito estufa. Assim, intensifica-se a busca pela diversificação da matriz elétrica, de modo a manter a capacidade de entrega da demanda solicitada e intensificar a geração de energia elétrica no mundo a partir de fontes renováveis, como a fonte solar.

A expansão no uso de fontes de energias renováveis para geração de energia elétrica, está atrelada diretamente à expansão da geração distribuída. A geração distribuída tem como característica principal de gerar a energia próximo a carga responsável pelo consumo. Tal prática acarreta uma série de benefícios relacionados a redução de gastos dos consumidores, menor investimento necessário em linhas de distribuição e redução das perdas de energia elétrica no processo de distribuição. A expansão da geração distribuída beneficia o consumidor-gerador, a economia do país e os demais consumidores, pois esses benefícios se estendem a todo o sistema elétrico [4].

Dessa forma, o conceito de unidade consumidora sofre alteração, uma vez que ante-

riormente a UC atuava somente como consumidor, agora passa a atuar como fonte geradora de energia elétrica. Ao tornar-se produtor de energia elétrica, a unidade consumidora que utiliza GD injeta potência ativa na rede de baixa tensão através do Ponto de Acoplamento Comum, estabelecendo eventuais cenários de fluxo bidirecional de potência na rede de BT. A Figura 1 ilustra a diferença entre redes com geração centralizada e geração distribuída.

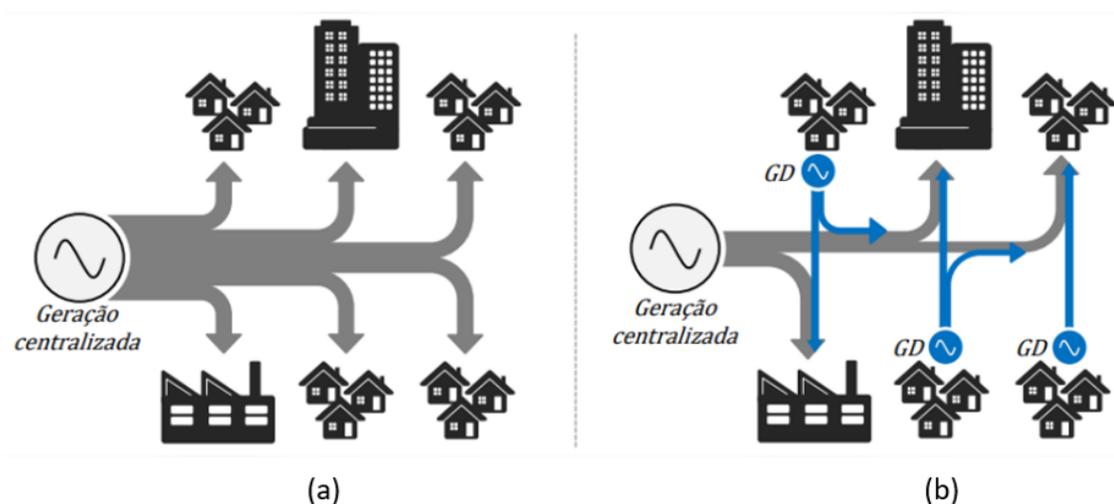


Figura 1 – Fluxo de potência com fonte de geração centralizada e GD.

No âmbito regulatório, a Agência Nacional de Energia Elétrica publicou a resolução normativa n. 482/2012, com a atualização RN n. 687/2015, com intuito de regular a conexão de mini e micro geração distribuída na rede de distribuição, em que a fonte de energia seja incentivada através de regras da conexão à rede de distribuição e da forma de faturar a energia gerada, realizando a compensação de energia. A partir da criação dessa norma pela ANEEL, as concessionárias criaram suas próprias resoluções normativas, as quais contém todas informações e premissas a serem seguidas sobre requisitos de segurança e qualidade de energia, proteções necessárias, ponto de acesso e certificações exigidas.

De acordo com o estudo realizado pela National Renewable Energy Laboratory – NREL, o percentual de penetração acima de 10% entre a GD e a demanda do sistema já pode ser considerado como nível significativo de penetração de GD, tendo em vista os impactos ocasionados. Apesar de tais mudanças no modo tradicional de operação da rede, as resoluções normativas de cada concessionária responsável pelo fornecimento de energia expõem que os quesitos de segurança e qualidade de energia elétrica devem ser mantidos e alcançados.

O termo “qualidade da energia” (QEE) deve ser conhecido por todos os setores envolvidos com o consumo, transmissão e geração de energia elétrica, uma vez que abrange desde as áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas de comunicação

relacionados à transmissão de dados [5]. Quando abordamos a questão de QEE, vários parâmetros de operação da rede elétrica devem ser analisados. Entre todos parâmetros a serem considerados, destacam-se: Harmônicos e Inter-Harmônicos, Ruído, Flutuação de Tensão, Variações de frequência e Variações RMS.

As mudanças no sistema elétrico devido a conexão de GD possuem pontos positivos e negativos, tanto para a concessionária quanto para o consumidor. Algumas vantagens técnicas se dão pela redução de perdas técnicas ao longo das linhas de distribuição devido à diminuição da potência demandada pelas cargas, capacidade de adequar o perfil de tensão da carga no PAC, possibilidade de alimentação da carga que está diretamente conectada em casos de falta de energia, e também a redução do impacto ambiental (quando emprega-se fontes renováveis nessa modalidade de geração). Porém, há outro cenário que deve ser considerado, uma vez que a conexão de geração distribuída na rede de baixa tensão pode existir fluxo reverso de potência, causando distúrbios como a alteração do perfil de tensão da rede em regime permanente, instabilidade de tensão e frequência, sobretensões, aumento de harmônicos, alteração das correntes de curto circuito, os quais acabam por prejudicar a QEE.

Diante do exposto, a proposta do trabalho é analisar os impactos da geração distribuída, especificamente a fotovoltaica, na rede de distribuição secundária de baixa tensão, através de dados colhidos de um SFCR (Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede) presente em uma Usina de 15KW de potência instalada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Geral

Analisar a qualidade de energia do sistema fotovoltaico instalado em uma usina localizada na cidade de Viçosa - MG, para demonstrar a importância dos estudos de viabilidade técnica a partir dos projetos de implantação do sistema.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Demonstrar a importância dos estudos de viabilidade técnica e projetos para implementação dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs) destacando as perdas de geração de energia solar fotovoltaica;
- Analisar a geração do sistema fotovoltaico instalado em uma usina localizada na cidade de Viçosa;
- Estudar os seguintes parâmetros de QEE: Transitório, Desequilíbrio de Tensão, Variações RMS de Curta Duração, Variações RMS de Longa Duração e Harmônicos;

- Verificar e propor às aplicações técnicas pertinentes a operação eficiente do sistema fotovoltaico ligado à rede.

1.3 Organização do Texto

Este trabalho está dividido da seguinte maneira: Este capítulo apresenta uma introdução geral sobre o trabalho, destacando os objetivos pretendidos. O Capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica acerca do estado da arte no campo de energia solar fotovoltaica, também é realizado um estudo completo sobre Qualidade de Energia, consolidando o conhecimento necessário para o desenvolvimento do trabalho. Por conseguinte, é apresentado no Capítulo 3 os equipamentos utilizados na aquisição de dados, bem como as ligações e detalhes da usina em estudo. No Capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos pelo autor e, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais do trabalho, bem como propostas para trabalhos futuros.

2 Revisão de Literatura

O crescimento no uso de fontes renováveis de energia está diretamente ligado à expansão no uso de geração distribuída conectada ao sistema elétrico de distribuição. Tal conexão concebe particularidades antes não existentes no modelo de geração centralizada. A partir disso, o presente capítulo tem como objetivo explicar sobre o cenário no uso de energia renovável no país, com foco em energia fotovoltaica, caracterizando vantagens, impactos negativos na interação com o sistema elétrico, apresenta sobre a legislação em vigor e categoriza a modalidade do SFCR. Além disso, é apresentado um estudo sobre os parâmetros de QEE que serão abordados neste trabalho.

2.1 Sistema Solar Fotovoltaico

O constante crescimento do consumo energético mundial acaba por permitir melhor qualidade de vida para a população, ao poder usufruir das comodidades modernas movidas a eletricidade. Porém, a preocupação com o aquecimento global também se intensifica, e a produção de energia utilizando fontes de origem fósseis contribuem diretamente para o aumento da emissão de gases de efeito estufa.

Segundo [11], o principal fator ambiental que favorece o aproveitamento solar para a produção de energia é a não modificação do equilíbrio térmico da terra, isso porque os equipamentos empregados na energia solar, utilizam parte da irradiação disponível como eletricidade útil, antes da energia ser degradada como calor para o meio ambiente. Além disso, esse tipo de geração contribui para o suprimento da demanda por energia elétrica, sem haver a emissão de gases ácidos ou gases de efeito estufa. Dessa forma, no que tange aos benefícios ambientais advindos do uso de tal tecnologia, destaca-se a contribuição para atingir as metas de redução na emissão de gases poluentes, não há poluição sonora, e consiste em uma fonte renovável, limpa e sustentável.

O mercado de energia solar mostra-se cada vez mais promissor e produtivo não só no Brasil como no mundo. Devido à diversos fatores, como mudanças climáticas, independência energética, políticas públicas, queda no preço dos módulos fotovoltaicos, desenvolvimento tecnológico e diminuição nas barreiras técnicas no processo de aplicação, a energia fotovoltaica é, atualmente, o segmento energético que mais cresce no mundo.

Com tal cenário de constatare expansão, em meados de 2021, o país atingiu a marca de 1,7% da matriz elétrica proveniente de energia solar, como ilustrado na Figura 2. Esse número contempla tanto mini e microgeração, quanto grandes usinas. Já com previsões globais, estima-se que em 2050, 11% de toda energia produzida no mundo tenha cunho

solar, segundo [12]. Tal crescimento é responsável por alavancar a geração de empregos de qualidade, atrair novos investimentos privados, diversificar a matriz energética e desenvolver uma nova cadeia produtiva no país.

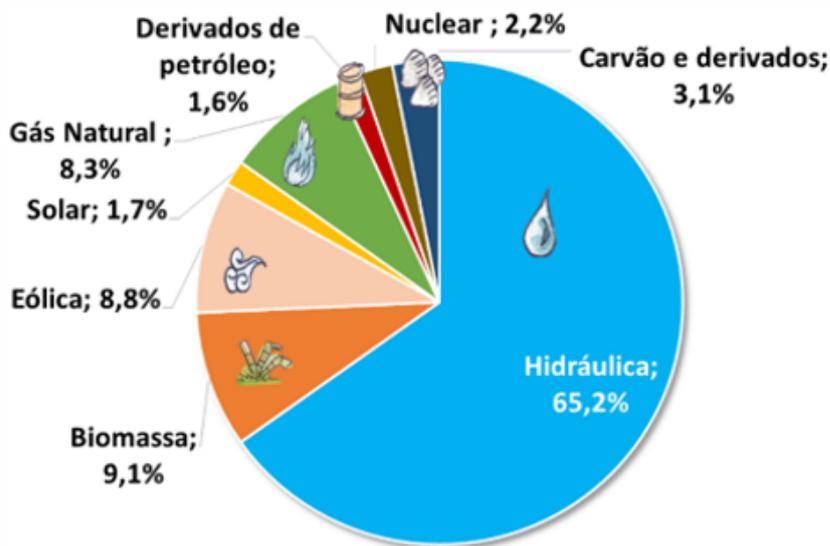


Figura 2 – Matriz elétrica brasileira: Potência Instalada em Operação (MW).

Enquanto o MME em 2014 estimou que em 2050, 11% de toda energia elétrica do mundo será proveniente de fonte solar, a BNEF em 2016 estipulou que em 2040, 32% da Matriz Elétrica Brasileira seja de energia solar fotovoltaica. Com isso, confrontando com o atual cenário exposto na Figura 2, a difusão do uso de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica deverá ter comportamento exponencial para atingir a meta de 32%.

A expansão exposta acima, garante maior complementariedade de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, de forma a diminuir a dependência de fontes hídricas e o uso de fontes de energia não renováveis. Vale salientar que, a energia solar possui a menor variabilidade mensal e anual, em relação às demais fontes renováveis aplicadas no Brasil, conforme é apresentado na Figura 3 abaixo. Essa característica garante maior assertividade no planejamento de geração, de acordo com a demanda do SIN.

2.2 Geração Distribuída

Com o advento da geração distribuída, na qual plantas de geração alimentam os consumidores injetando energia em um sistema de distribuição [IEA], tal topologia de rede sofrerá mudanças, uma vez que o fluxo de energia pode ocorrer fluindo da carga ao consumidor, ou até mesmo de um consumidor para outro consumidor, conforme ilustrado na Figura 4. Por mais que a energia elétrica esteja tão presente no dia-a-dia de grande parte da população, ainda se encontra no Brasil, pessoas de baixa renda que não possuem

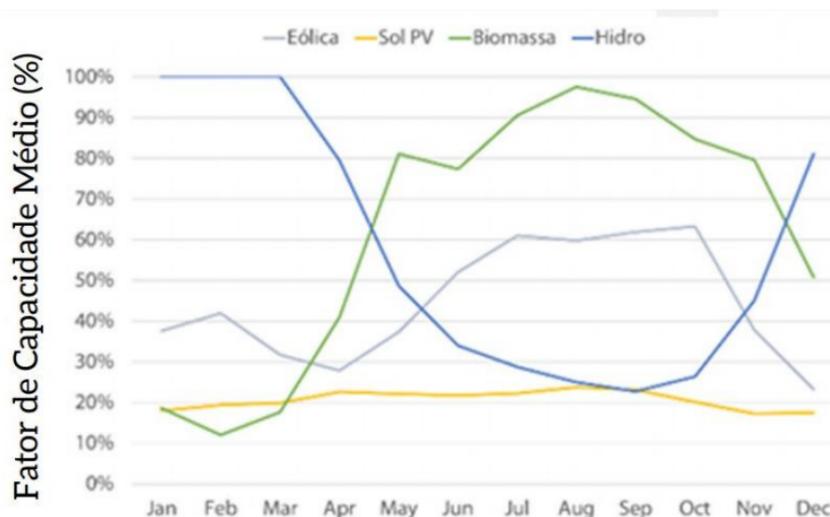


Figura 3 – Portfólio de capacidade de produção das fontes renováveis no Brasil.

acesso à energia elétrica. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cerca de um milhão de residências ainda não tem acesso à energia elétrica. A grande maioria desses domicílios, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), estão em regiões rurais onde a quantidade populacional é mais baixa. Para atender essas regiões, há a demanda de grandes investimentos econômicos por parte dos concessionários, acompanhado de baixo retorno financeiro, o que faz tais regiões ainda não possuírem acesso à energia elétrica. A GD é uma solução em discussão para ajudar a prover energia para esses lugares.



Figura 4 – Rede elétrica com geração distribuída.

Ainda que o conceito de geração distribuída esteja atrelado à expansão no uso de fontes renováveis, a matriz elétrica brasileira possui grande dependência da energia provinda da geração centralizada. Tal afirmação se dá pelo fato de que toda energia elétrica proveniente de fonte hídrica, a qual compõe 56,77% da matriz elétrica do país, é gerada distante das unidades consumidoras. A energia elétrica proveniente de importação, nuclear e fóssil também é gerada distante das cargas consumidoras, intensificando tal dependência. A Figura 5 ilustra a atual situação da matriz energética brasileira.

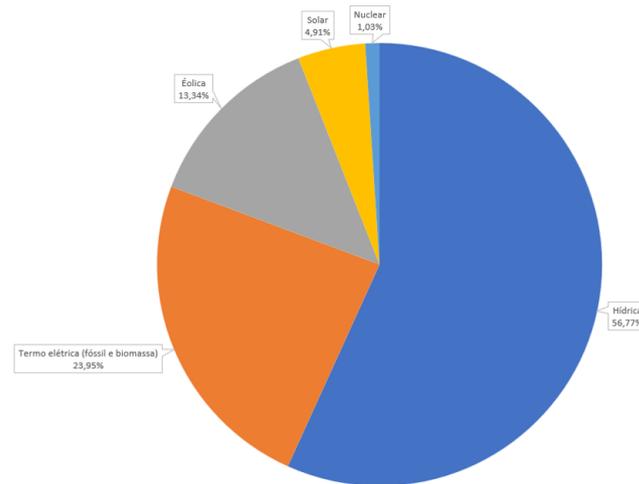


Figura 5 – Matriz elétrica do Brasil em 2023 (ANEEL).

A geração distribuída atualmente é classificada pela ANEEL a partir da potência instalada em modalidade de minigeração e microgeração. A microgeração distribuída é caracterizada como central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

2.2.1 Vantagens da Geração Distribuída

O crescimento na adesão de GD faz com que haja diversidade na matriz elétrica, de modo a possibilitar um planejamento estratégico em relação à quais fontes geradoras utilizar em cada momento do ano. Isso se dá pelo fato de que, diversas fontes de energia podem ser empregadas na GD, como a Biomassa, Eólica, Fotovoltaica, Resíduos urbanos, PCH e CGH. Tal diversificação faz com que haja diminuição no uso de energia elétrica proveniente de termelétricas e até mesmo de hidroelétricas, fato que contribui para o reestabelecimento nos níveis dos reservatórios e diminuição na emissão de gases poluentes. A Nota Técnica n° 0043/2010–SRD/ANEEL de 08/09/2010 [24] expõe alguns benefícios ao sistema elétrico com a presença de pequenos geradores próximos às cargas, sendo:

- Baixo impacto ambiental e conseqüente diversificação da matriz energética;
- A postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão;
- Menor tempo de implantação;
- Redução no carregamento das redes e perdas elétricas;

- A melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada;
- Redução nas perdas elétricas devido ao processo de transmissão, uma vez que a energia é produzida junto à carga.

Além desses pontos levantados pela Nota Técnica n° 0043/2010–SRD/ANEEL, também pode-se afirmar que:

- A produção de energia pode ser feita utilizando espaço físico já ocupado e não utilizados, uma vez que em grande maioria os sistemas são integrados à edificação;
- O sistema possui modularidade, ou seja, pode ser ampliado caso a carga da unidade se amplie;
- Fonte limpa e renovável de energia, uma vez que utiliza uma fonte primária inesgotável que está disponível em quase todos locais.

2.2.2 Desvantagens da Geração Distribuída

A instalação de GD conectada à rede exige mudanças e adaptações no sistema elétrico de distribuição, visto que foi projetado para operar com sentido unidirecional, fluindo da geração para carga. Com isso, surgiram diversas barreiras técnicas para operação e garantia nos parâmetros de QEE, uma vez que irá existir no sistema elétrico fluxo de potência fluindo da carga à fonte geradora. Quando a instalação ocorre somente em pequena quantidade de sistemas, o sistema não sofre grandes impactos, porém, com o crescimento exponencial na quantidade de sistemas instalados, o nível de perturbação gerado pode ser significativo.

Grande parte dos dispositivos de proteção, coordenação e seletividade instalados foram projetados somente para o fluxo unidirecional de potência, fato que faz com que o sistema comece a necessitar de adequações para operar de forma correta com a presença de geração distribuída. Essa adequação se faz necessária devido à existência de fluxo de potência reverso, o qual consiste no fluxo de potência partindo dos níveis mais baixos de tensão para os mais altos. Essa mudança se intensifica nas situações em que a geração é maior que o consumo da carga, com a unidade consumidora se comportando de forma ativa. Isso se faz como um fator de extrema importância para os órgãos de regulamentação e também para as concessionárias de distribuição, uma vez que pode afetar diretamente a correta operação do sistema.

Esse comportamento da unidade consumidora/geradora depende do perfil de consumo da instalação, o qual é definido de acordo com a quantidade de potência demandada, o período de maior consumo e a capacidade de geração instalada. A Figura 6 ilustra a diferença entre o perfil de consumo de uma instalação residencial e outra comercial,

expondo também a curva característica de geração FV, a qual atinge maiores valores em horários de sol a pico.

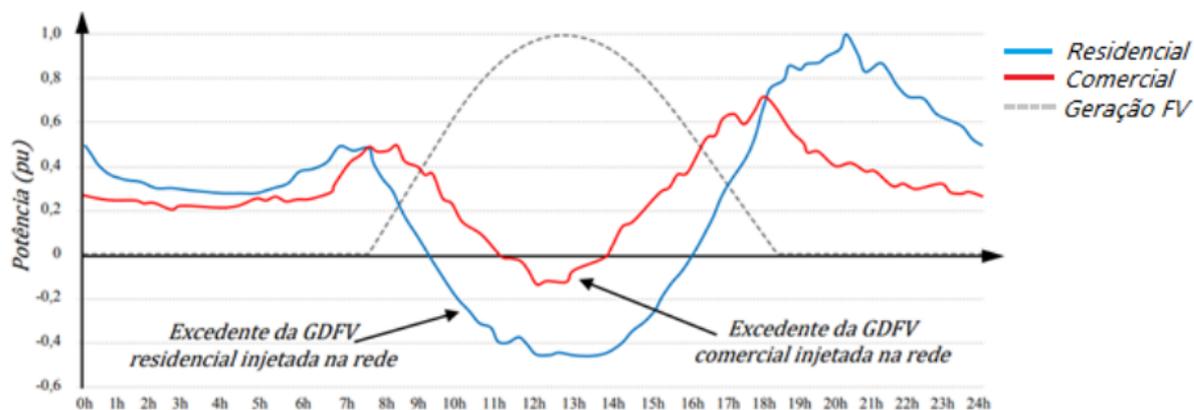


Figura 6 – Demandas residenciais e comerciais para SFCR com excedente de produção.

Outra barreira técnica para instalação de GD é a alteração no nível de curto-circuito do sistema. É de extrema importância que sejam realizados estudos sobre este parâmetro, uma vez que grande parte dos equipamentos de proteção são especificados a partir deste. Neste contexto, a instalação de GD em sistemas de distribuição pode alterar o nível de curto-circuito da rede, passando a ter duas fontes de contribuição para o nível curto, a subestação e o sistema de GD, podendo provocar efeitos indesejados, tais como: perda de coordenação dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente, violação da capacidade de interrupção de disjuntores, extrapolação dos limites térmicos e mecânicos de equipamentos.

O tipo de fonte da GD a ser aplicada, influencia diretamente nas alterações nos níveis de curto-circuito. A energia eólica contribui consideravelmente para tal, uma vez que no momento do curto-circuito ainda é injetado uma potência no sistema, proveniente da conversão da energia cinética residual presente nas pás das turbinas. No caso do SFCR, a contribuição com o nível de curto-circuito depende do modelo e tipo do inversor a ser utilizado, os quais em grande maioria, não geram incremento de potência durante a falta devido à ação do MPPT –Maximum Power Point Tracker. É importante ressaltar que este dispositivo busca encontrar o ponto de máxima potência dos módulos, otimizando a geração das usinas fotovoltaicas. Além disso, os inversores são normalmente equipados com relés de subtensão e sobrecorrente, visando identificar faltas e cessar sua contribuição com a corrente de curto-circuito por meio da desconexão com a rede, reconectando-se de forma automática após um período predeterminado [19].

Em relação à QEE, existem vários parâmetros que devem ser observados e respeitados. Todos os valores de referência para tais parâmetros a serem monitorados, e seus respectivos limites, nos sistemas de GD, estão estabelecidos na Seção 8.1 do Módulo 8 do PRODIST. A Nota Técnica n° 0043/2010–SRD/ANEEL de 08/09/2010 lista algumas

desvantagens associadas ao aumento da quantidade de pequenos geradores espalhados na rede de distribuição, pontuando:

- Alto custo de implantação e conseqüente grande tempo de retorno do investimento;
- Necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes, devido ao aumento na complexidade das mesmas;
- Aumento da dificuldade para controlar o nível de tensão da rede no período de carga leve;
- Aumento da distorção harmônica e alteração nos níveis de curto-circuito na rede.

2.2.3 Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos

A energia fotovoltaica se caracteriza como um gerador que utiliza o sol como fonte primária de energia, podendo operar em sistema não conectado à rede (OFF-GRID) ou conectado com a rede (SFCR). Os módulos fotovoltaicos são os equipamentos responsáveis por captar a irradiância solar e converter em energia elétrica. Cada módulo é composto por células fotovoltaicas, compostas de material semicondutor, conforme exposto na Figura 7.

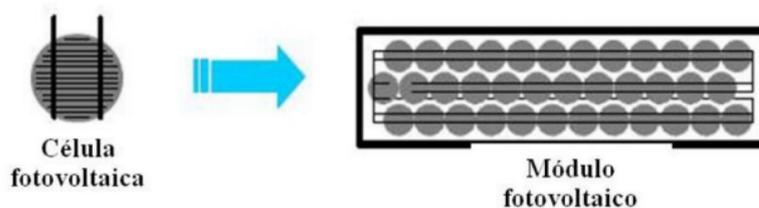


Figura 7 – Arranjo fotovoltaico em módulo fotovoltaico.

Após a geração da energia elétrica nos módulos, em corrente contínua, a energia passa pelo inversor, o qual converte essa energia para corrente alternada e cria uma diferença angular entre vetores de tensão do inversor e da rede, criando um fluxo de potência no sentido do ângulo de maior valor para menor, possibilitando a injeção de potência no sistema elétrico. Dessa forma, caso a relação Geração/Consumo da unidade seja maior que 1, ou seja, existe mais potência sendo gerada do que consumida, haverá injeção de potência ativa na rede, surgindo fluxo reverso de potência na rede, conforme ilustrado na Figura 8.

Nesta configuração de sistema ilustrada, e a qual é abordada pelo presente trabalho, não se faz uso de baterias, uma vez que o fornecimento de energia elétrica é feito pela rede quando o SFCR não é suficiente para tal, como no período noturno. É muito importante salientar que quando há falha no fornecimento da rede, o inversor deve ser capaz de identificar tal falta e desligar o fornecimento proveniente do SFCR, mesmo que este

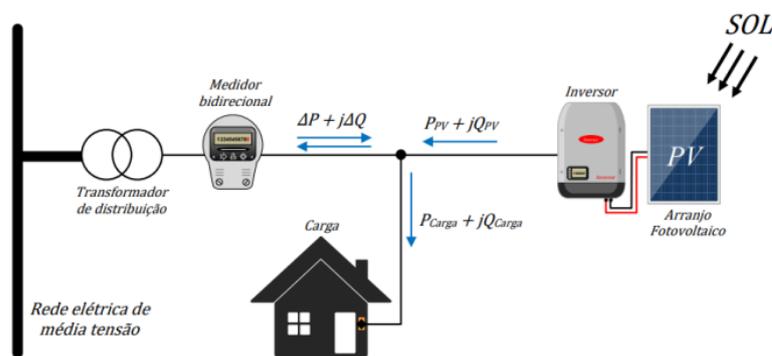


Figura 8 – Esquema de funcionamento do SFCR.

seja capaz de suprir a carga por si só. Tal função é exigida para garantir a segurança de funcionários que estejam fazendo intervenções na rede, evitar a reenergização de dispositivos isolados da rede pela ação dos dispositivos de segurança e até mesmo para proteger a integridade do sistema FV. Quando se deseja utilizar a potência gerada pelo sistema FV mesmo durante falhas na rede, deve ser instalado um segundo inversor fotovoltaico capaz de operar de maneira isolada, ou um inversor capaz de trabalhar com ou sem falta, porém sempre assegurando que o SFCR desconecte imediatamente da rede em caso de falhas.

A compensação da potência ativa excedente produzida, a qual é injetada na rede, é regulamentada pela resolução 687/2015, a qual altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 – PRODIST. Segundo RN 687, o excedente de energia é a diferença positiva entre a energia injetada e a consumida, exceto para o caso de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, em que o excedente é igual à energia injetada. Dessa forma, o sistema deve ser capaz de contabilizar o total consumido e o total injetado na rede, afim de verificar a resultante dessas grandezas. Com isso, justifica-se a necessidade de instalação do medidor eletrônico de energia bidirecional, o qual é responsável por realizar tal tarefa, conforme ilustrado na Figura 9.



Figura 9 – Medição bidirecional em sistemas SFCR.

No caso da microgeração distribuída, o medidor bidirecional deve ser capaz de diferenciar a energia elétrica ativa consumida da rede da energia elétrica ativa injetada na rede pelo sistema da GD. Já para os sistemas de minigeração distribuída, deverá ser

utilizado medidor de quatro quadrantes que, os quais possibilitam a medição e faturamento de excedente reativos, além dos recursos exigidos para o medidor utilizado na microgeração.

Para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses (ANEEL, 2015). Para unidades consumidoras conectadas na baixa tensão pelo grupo B, a compensação é feita dentro de alguns limites impostos pela legislação vigente na Resolução Normativa 687 de 2015. Desta forma, deve ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B, ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A, conforme o caso [25]. Esta afirmação expõe que, para unidades consumidoras em baixa tensão do grupo B, mesmo que a energia injetada na rede seja superior ao consumo por um período, ainda deverá ser cobrado o valor em Reais referente à disponibilidade da rede elétrica, o qual é equivalente a 30 KWh (monofásico), 50 KWh (bifásico) ou 100 KWh (trifásico). Na mesma situação para consumidores conectados em média tensão (grupo A), caso alcance o balanço energético de consumo e geração na unidade, ainda deverá ser cobrado o correspondente à demanda contratada [21].

2.3 Qualidade de Energia Elétrica

O constante e expressivo crescimento da demanda nacional de energia elétrica, juntamente com a dificuldade em construir grandes empreendimentos de geração, desperta uma barreira, em que a inclusão da GD fotovoltaica é incentivada. Tal incentivo também é impulsionado por questões financeiras, ambientais, sociais e técnicas, se destacando frente à demais tipos de sistemas de geração. Para manter a QEE da rede, esses sistemas devem fornecer energia elétrica seguindo parâmetros mínimos de qualidade, os quais devem ser compreendidos para análise correta dos impactos técnicos na rede elétrica.

O termo “qualidade de energia elétrica”, em geral, compreende a qualidade das formas de onda da tensão e corrente elétricas em um sistema elétrico [13]. A variação das formas de onda ocorre devido à fenômenos eletromagnéticos, que acabam por caracterizar as formas de onda de corrente e tensão, em um determinado instante no sistema elétrico. Logo, segundo [14], esses fenômenos podem ser classificados em transitórios, variações RMS de curta duração e de longa duração, variações de frequência e distorções na forma de onda. Além disso, também vale ressaltar a importância da análise do fator de potência.

A Figura 10 apresenta oscilogramas dos principais distúrbios de QEE que ocorrem na forma de onda da tensão de alimentação de um Sistema Elétrico de Potência.

A ANEEL, através do PRODIST Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, não define com precisão todos os parâmetros ligados aos distúrbios do sistema elétrico. Porém,

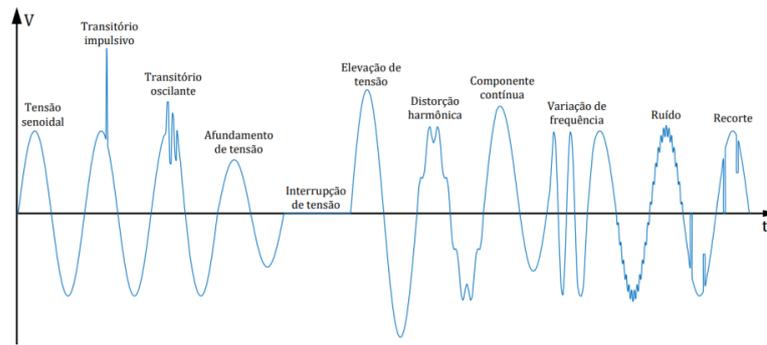


Figura 10 – Oscilograma com alguns dos principais distúrbios de QEE.

define com precisão e de forma diferente do exposto pela norma IEEE Std. 1159/2009, quanto às Variações de Tensão de Curta Duração, conforme exposto na tabela 3.

A seguir serão expostos e descritos alguns parâmetros indicadores de qualidade de energia elétrica, que serão analisados neste trabalho, como os parâmetros de níveis de tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica e flutuação de tensão.

2.4 Transitório

Transitórios são perturbações de tensão ou corrente de duração muito curta (alguns milissegundos), mas durante esse curto período de tempo o sistema elétrico poderá ser submetido a grandes variações desses parâmetros. Os transitórios costumam ser subdivididos em transitórios impulsivos ou oscilatórios. Em grande parte, surgem dos efeitos das descargas atmosféricas (transitórios impulsivos) ou do chaveamento de cargas muito grandes ou reativas (transitórios oscilatórios) [15].

2.4.1 Transitório Impulsivo

Transitórios são perturbações de tensão ou corrente de duração muito curta (alguns milissegundos), mas durante esse curto período de tempo o sistema elétrico poderá ser submetido a grandes variações desses parâmetros. Os transitórios costumam ser subdivididos em transitórios impulsivos ou oscilatórios. Em grande parte, surgem dos efeitos das descargas atmosféricas (transitórios impulsivos) ou do chaveamento de cargas muito grandes ou reativas (transitórios oscilatórios) [15].

2.4.2 Transitórios Oscilatórios

São alterações repentinas nas condições de regime permanente da tensão ou corrente, caracterizando-se por apresentar impulsos com polaridade positiva e negativa. Segundo [15],

normalmente são decorrentes da energização de linhas, eliminação de faltas, chaveamento de banco de capacitores e transformadores.

2.5 Desequilíbrio de Tensão

As tensões geradas em sistemas trifásicos são senoidais, com mesma magnitude e defasadas em 120 graus. Porém, esse cenário pode sofrer alteração devido a desigualdade na magnitude da tensão e desvios nos ângulos de fase. O desequilíbrio de tensão em uma rede é um problema grave de qualidade de energia elétrica, uma vez que pode afetar significativamente o funcionamento dos equipamentos nela conectados. Salienta-se que, esse problema atinge principalmente sistemas de distribuição de baixa tensão. A principal causa de desequilíbrio nas correntes, e conseqüentemente, nas tensões é o desequilíbrio na distribuição de cargas monofásicas. Logo, a realização de um estudo de distribuição de cargas, considerando os chaveamentos dessas cargas ao longo do dia e futura carga de expansão, é uma forma de atenuar tal problema.

Outra fonte de desequilíbrios são as linhas aéreas, as quais devido à alocação geométrica dos condutores ao longo da linha, as capacitâncias intrínsecas entre condutores de fases distintas não são iguais. Assim, ocasiona quedas de tensões diferentes em cada fase, uma vez que cada uma tem diferentes parâmetros. Uma forma de atenuar essa problemática é a transposição das fases.

Atualmente, existem barreiras técnicas no cenário de microgeração distribuída no que tange à garantia do equilíbrio de tensão entre fases. Nessa modalidade de geração, é comum o uso de sistema monofásicos, logo, deve-se atentar para que a fase de conexão da GD mantenha o nível de tensão permitido e que o sistema não ultrapasse os limites de desequilíbrio.

Para a regulação dos níveis de desequilíbrio de tensão da rede, existem normas que estabelecem limites permitidos. Normas internacionais como a EN-50160 ou IEC 61000-3-x estabelecem o limite de 1% para alta tensão e 2% para baixa tensão. No Brasil, a norma em vigor, PRODIST módulo 8, determina que, o valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, exceto em baixa tensão, deve ser igual ou menor a 2%, enquanto em baixa tensão o valor é de 3%. A Tabela 1 expõe os limites para o fator de desequilíbrio de tensão que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas (FD95%). Vale ressaltar que, os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

Para caracterizar o nível de desequilíbrio de tensão, o PRODIST módulo 8 prioriza a utilização do método das componentes simétricas. Nesse método, o valor é obtido através da relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e sequência positiva. A Tabela 2 apresenta a terminologia aplicada para cálculo do desequilíbrio de tensão.

Tabela 1 – Limites para desequilíbrio de tensão.

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1kV$	$1kV < V_n < 230kV$
FD95%	3%	2%

Tabela 2 – Terminologia para cálculo do desequilíbrio de tensão

Identificação da Grandeza	Símbolo
Fator de desequilíbrio da tensão	FD
Fator de desequilíbrio da tensão	V-
Fator de desequilíbrio da tensão	V+
Magnitudes das tensões eficazes de linha - frequência fundamental	Vab, Vbc, Vca
Valor do FD% que superado em 5% das 1008 leituras válidas	FD95%

A fórmula de cálculo é apresentada a seguir.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100. \quad (2.1)$$

De acordo com Equação 2.1, quanto maior a presença da tensão de sequência negativa, maior o valor do desequilíbrio de tensão. Sendo assim, como consequência, a circulação da componente negativa de tensão em sistema elétrico de potência acarreta aumento nas perdas de energia, maior aquecimento de equipamentos elétricos, diminuição de transmissão de energia pela componente de sequência positiva e também afeta na operação de motores de indução.

2.6 Variações RMS de Curta Duração

Segundo [14], as variações RMS de curta duração são caracterizadas por afundamentos e elevações, ou até mesmo pela total ausência de tensão por um período de tempo inferior a 1 minuto. Tais variações podem ocorrer sendo afundamento, elevação ou interrupção da tensão, caracterizados cada um de forma diferente.

O afundamento de tensão é caracterizado pela redução da tensão de 10 a 90% em relação a tensão base do sistema, com duração entre 0,5 ciclo até 1 minuto. Geralmente, os afundamentos de tensão são causados por faltas na rede, partida de grandes motores ou conexão de grandes cargas.

Já a elevação de tensão é caracterizada pelo aumento da tensão superior a 10% em relação a tensão base do sistema, com duração entre 0,5 ciclo até 1 minuto. Geralmente, as elevações de tensão são causadas pela conexão de bancos de capacitores e desconexão de grandes cargas. Por fim, a interrupção é caracterizada pela redução da tensão para valores abaixo de 10% da tensão base do sistema, com duração de até 1 minuto. Normalmente, as interrupções são causadas por faltas na rede e falhas em equipamentos.

2.7 Variações RMS de Longa Duração

Segundo [14], as variações RMS de longa duração são caracterizadas por sobre/sub tensões ou até mesmo pela total interrupção de tensão, por um período superior a 1 minuto.

A subtensão é caracterizada pela redução de 10 a 90% em relação a tensão base do sistema, com tempo superior a 1 minuto. Geralmente, as causas da subtensão são as mesmas do afundamento de tensão. Já a sobretensão caracterizada pelo aumento acima de 10% em relação a tensão base do sistema, com duração superior a 1 minuto. Normalmente, as causas são as mesmas da elevação de tensão.

A interrupção permanente é caracterizada pela redução da tensão para valores abaixo de 10% da tensão base do sistema, com duração superior a 1 minuto. Normalmente, as interrupções são causadas por faltas na rede, falhas em equipamentos e por desligamento programado.

2.8 Harmônicos

Harmônicos são componentes, em tensão ou corrente, que são múltiplos inteiros da frequência fundamental da rede (60 Hz para o Brasil). Combinado com a componente fundamental da rede, resultam em uma forma de onda distorcida, conforme ilustrado na Figura 11. Uma vez que os harmônicos são representações matemáticas de uma forma de onda distorcida, através da Transformada de Fourier consegue-se substituir a onda distorcida pela representação da soma de ondas senoidais puras, com frequências múltiplas da frequência fundamental.

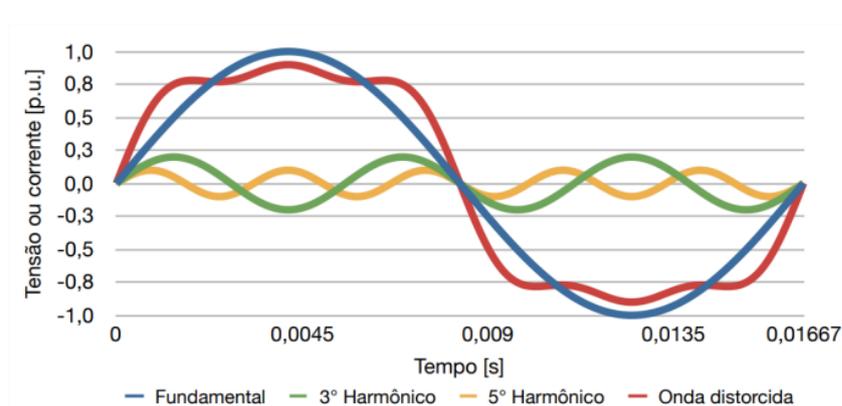


Figura 11 – Oscilograma com componente fundamental e harmônicos.

Os harmônicos de corrente são distúrbios produzidos pela operação de dispositivos e cargas não lineares na rede elétrica. Tais cargas, mesmo sendo alimentadas com tensão puramente senoidal, geram correntes não senoidais. Essas correntes distorcidas circulam pela impedância do sistema, que é a resultante da impedância da fonte somada impedância

dos cabos condutores e transformadores, gerando uma forma de tensão distorcida. Vale ressaltar que na geração, a concessionária produz tensão com forma de onda puramente senoidal. De acordo com Chicco (2005) as contribuições para a distorções harmônicas são cada vez mais significativas quando o ponto de operação do inversor é inferior a 20% da sua potência nominal, em virtude da estratégia de controle da maioria dos inversores não conseguir encontrar ponto de operação eficiente para entregar uma onda senoidal na saída.

Também é importante salientar que, os harmônicos de ordem 3 e seus múltiplos inteiros ímpares, não existem quando se tem carga trifásica alimentada a três fios. Isso ocorre pelo fato de que não existe caminho de retorno pelo neutro, uma vez que são harmônicos de sequência zero.

Em relação aos harmônicos par, uma vez que o semiciclo positivo tem simetria com o semiciclo negativo das ondas de corrente e tensão, eles se cancelam. Essa afirmação somente é aplicável em cenários que é considerado ondas perfeitamente simétricas, no caso de fins didáticos. Na prática, devido à falta de total simetria das ondas, ao realizar análises, consegue-se observar a presença de componentes pares

2.8.1 Indicadores de QEE de Distorções Harmônicas

Afim de garantir a adequada operação do sistema elétrico e da instalação, existem níveis a serem seguidos, para cada um dos equacionamentos para cálculo dos indicadores de distorção harmônica. Existem instituições responsáveis por estabelecer os níveis limites para os harmônicos, como o IEC (International Electrotechnical Commission) e IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), sendo ambas instituições internacionais.

A regulamentação vigente no Brasil que trata de limites harmônicos é o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) Módulo 8. Nesse documento são estabelecidos metodologia de medição, a instrumentação, terminologia e valores de referência para distorção harmônica de tensão. Atualmente esta resolução não normatiza limites para harmônicos de corrente.

Com intuito de permitir a quantificação dos níveis de interferência harmônica em determinado ponto de acoplamento à rede conforme as regulamentações, foram criados indicadores de distorção harmônica.

A distorção harmônica individual (DIT_h), é a relação entre a amplitude da harmônica de ordem “h”, e a grandeza correspondente fundamental. A equação 2 mostra a formulação da distorção harmônica individual da tensão de ordem harmônica “h” em percentual.

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde V_h é o valor eficaz da componente harmônica individual da tensão de ordem “h”, e V_1 representa o valor eficaz da componente fundamental da tensão.

De acordo com a norma ABNT NBR 16.149 e IEEE 1547/2018, o limite de DITH deve ser inferior a 5% da corrente fundamental em condições nominais de operação.

Além da distorção harmônica individual, também calcula-se a distorção harmônica total (DTT). A DTT é a relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas e a correspondente grandeza fundamental. A revisão 10 do Módulo 8 do PRODIST, que entrou em vigor em janeiro de 2018, introduziu mudanças na caracterização e quantificação das distorções harmônicas, dividindo a DTT convencional em três grupos espectrais, os quais serão apresentados a seguir.

- DTT_p: Distorção harmônica total de tensão para componentes pares não múltiplas de 3;
- DTT_i: Distorção harmônica total de tensão para componentes ímpares não múltiplas de 3;
- DTT₃: Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.

A Equação 2.3 apresenta a formulação para cálculo da Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100, \quad (2.3)$$

onde h representa todas as ordens harmônicas pares não múltiplas de 3, e h_p a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

A Equação 2.4 apresenta a formulação para cálculo da Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100, \quad (2.4)$$

onde h representa todas as ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3, e h_i a máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

A Equação 2.5 apresenta a formulação para cálculo da Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100, \quad (2.5)$$

onde h representa todas as ordens harmônicas múltiplas de 3, e h_3 a máxima ordem harmônica, múltipla de 3.

A Tabela 3 ilustra os limites de distorções permitidos. Segundo [31], caso a medição com analisador de energia seja feita com o transformador de potência com delta aberto, os valores de DTT₃ são 50% abaixo dos expostos pela Tabela 7.

Tabela 3 – Limite das distorções harmônicas totais.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1kV$	$1kV < V_n < 69kV$	$69kV < V_n < 230kV$
DTT95%	10%	8,0%	5,0%
DTTp95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTTi95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT(3)95%	6,5%	5,0%	3,0%

2.9 Tensão em Regime Permanente

Afim de garantir o correto funcionamento do sistema elétrico, de forma a evitar falhas no sistema, as concessionárias definem limites adequados, precários e críticos para nos níveis de tensão em regime permanente da rede. A distribuidora de energia elétrica deve dotar-se de recursos de engenharia para acompanhar a tensão do sistema em regime permanente, atuando preventivamente para que a tensão permaneça dentro dos padrões adequados.

Com a presença de GD, alguns parâmetros da rede são afetados, como fluxo de potência devido à existência de fluxo bidirecional de potência, perfil de perdas elétricas e o perfil da tensão da rede. A operação dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede resulta no comprometimento da qualidade da energia elétrica, em especial a elevação de tensão em níveis acima do permitido [17]. Quando a potência gerada ultrapassa a potência demandada pela carga, o excedente é injetado na rede de distribuição causando elevação de tensão no ponto de acoplamento comum [18].

Os níveis de tensão são analisados a partir da comparação entre o valor de tensão obtido por meio de medição correta realizada no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e os níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos, conforme exposto no item 2 -Módulo 8 do PRODIST. Os níveis de tensão devem estar em conformidade com o que está exposto pela legislação em todo sistema. A ocorrência de valores adequados, precários e críticos é verificada a partir dos valores dos índices DRP (Duração relativa de transgressão de tensão precária) e DRC (Duração relativa de transgressão de tensão crítica). Tais índices são calculados a partir das Equações 2.6 e 2.7 a seguir, respectivamente.

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100\% \quad (2.6)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100\% \quad (2.7)$$

em que nlp e nlc representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente. O limite para DRP é 3%, enquanto para DRC é de 0,5%.

2.10 Categorias dos SFCR

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são classificados pela ANEEL de acordo com a capacidade de produção energética. Estes sistemas podem ser centralizados, formando as usinas solares de geração, ou micro e minissistemas descentralizados, instalados em unidades consumidoras. Segundo RN nº 687 de 2015, a categorização é a seguinte:

- Microgeração: Potência instalada até 75kW;
- Minigeração: Potência instalada acima de 75kW até 5MW;
- Usinas de geração: Potência instalada acima de 5MW;

2.11 Considerações Parciais

Devido à baixa participação na matriz elétrica. Porém, devido à diminuição nos custos de implantação, contínua preocupação com o desenvolvimento sustentável e facilidades provenientes dos modelos de negócios, é evidente o crescimento futuro no uso dos SFCR. Também se nota que é necessário empenhar esforços, afim de aplicar conceitos de engenharia na nova topologia de rede a partir da conexão de SFCR, afim de dirimir as barreiras técnicas para uso desta tecnologia. A partir do conhecimento das vantagens e desvantagens, requisitos mínimos para instalação e fluxo normativo para implantação, é possível mensurar os esforços necessários para fazer uso da tecnologia, melhorando o planejamento necessário para adotar a tecnologia de geração em questão.

3 Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta os materiais utilizados para a aquisição dos dados, bem como as informações acerca do dimensionamento, e aspectos construtivos ao SFCR analisado.

3.1 Descrição do Sistema Fotovoltaico

Para a análise deste trabalho foi utilizado uma usina fotovoltaica localizada no estabelecimento "Mercadinho do Pedro", na cidade de Viçosa-MG, Rua João Batista da Costa, Bairro Santo Antônio. A mesma é composta por 42 módulos de 400W da Trina, os quais foram conectados em 1 inversor trifásico da Growatt de 15KW com saída em 380V. Para adequar o nível de tensão do inversor com a da rede, foi utilizado um transformador de 20KVA da fabricante IDEAL, como mostra a figura 12.

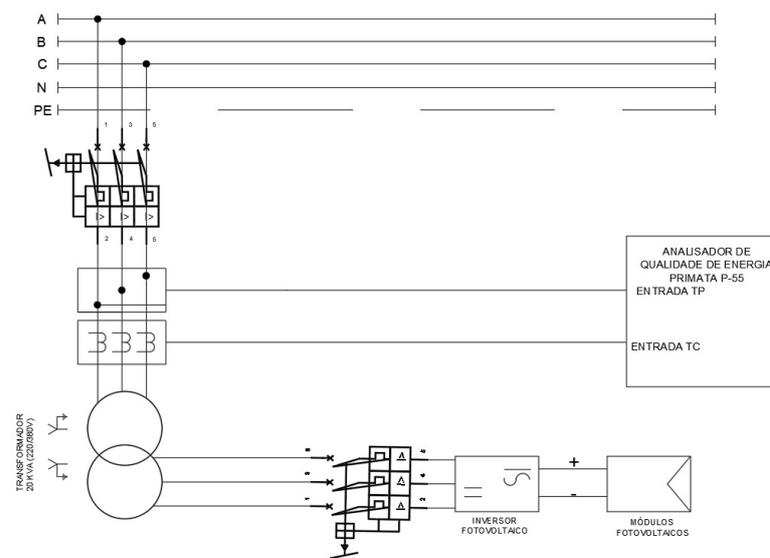


Figura 12 – Esquema de ligação utilizado

3.2 Coleta de dados

Para realizar a coleta de dados foi utilizado o analisador de qualidade de energia elétrica do fabricante PRIMATA Tecnologia Eletônica, acoplado na saída do inversor. O analisador foi configurado para registrar os dados de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente, componentes harmônicas e fator de potência em um intervalo de 10 minutos. A Figura 13 mostra a montagem realizada.



Figura 13 – Montagem do equipamento utilizado.

O equipamento foi configurado de modo a realizar coletas com período de integração de 10 minutos, conforme previsto no módulo 8 do PRODIST. As medições foram iniciadas às 13h:50min:43s da manhã do dia 27 de maio e permaneceram até o dia 03 de junho de 2022 para atender ao intervalo de 1008 leituras válidas exigidas.

3.3 Análise de dados

Os dados coletados pelo analisador são armazenados diretamente no equipamento e posteriormente são transferidos para o computador. Para o tratamento dos dados, primeiramente é utilizado o *software* PRIMATA e em seguida, os dados são convertidos para o formato .CSV, proporcionando uma comparação mais usual através do *Excel*.

3.3.1 Primata

O SMD – Sistema de Manipulação de Dados é um software desenvolvido pela PRIMATA ELETRÔNICA que se encontra em constante evolução. Ele permite gerenciar, programar e analisar, através de diversos recursos (gráficos, planilhas, histogramas, relatórios, etc.), todas as informações que são coletadas por nossos equipamentos, de forma bastante inteligente e intuitiva. O software SMD é instalado em uma base de dados que fica salva no computador do usuário, permitindo que ele se conecte rapidamente ao equipamento via porta USB. É fornecido de forma gratuita juntamente com nossos Analisadores e Registradores.

O SMD – Sistema de Manipulação de Dados é um programa aplicativo de computador que permite ao usuário programar aquisições de dados, bem como recuperar e analisar os dados registrados por qualquer um dos nossos modelos de Analisadores e Registradores. Os dados são exibidos através de gráficos, podendo ser impressos ou salvos em arquivos. O

SMD possibilita ainda exportar os dados para outros aplicativos (planilhas eletrônicas, etc.) e também gerar relatórios (conforme padrões da ANEEL), além de possuir uma interface amigável e ser de fácil instalação.

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados coletados a partir das medições e dados técnicos da instalação analisada. Vale ressaltar que todos os resultados apresentados estão em conformidade com os métodos de medição apontados em [31], afim de garantir maior assertividade na caracterização dos dados.

4.1 Análise das Curvas de Potência

Para análise dos impactos do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) ao perfil de potência da instalação, foi plotada a curva de potência injetada com os dados coletados, como mostra a Figura 14. É importante ressaltar que devido ao local onde foram realizadas as medições deste trabalho, na saída do inversor, nota-se o comportamento de potência característico dos sistemas fotovoltaicos, com o pico de potência no período de 11:30 a 12:30, em que ocorre a maior irradiância do dia.

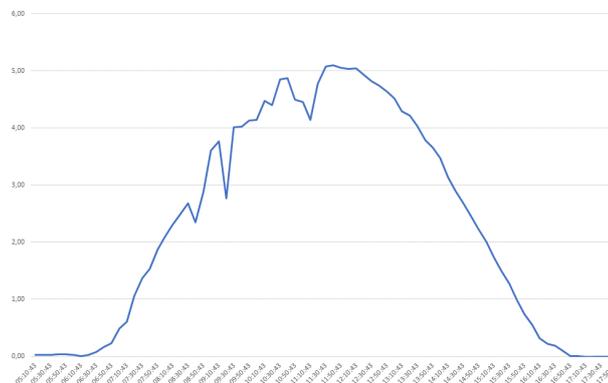


Figura 14 – Perfil da potência ativa trifásica injetada - dia 02/06.

4.2 Comportamento da Tensão em Regime Permanente

O período de análise iniciou-se em 27 de maio de 2022, e finalizou em 03 de Junho de 2022, período em que a usina estava em funcionamento normal. Os valores mínimos e máximos para tensão de linha, estão expostos na Tabela 4. Já em relação aos valores mínimos e máximos para tensão fase-neutro, estão expostos na Tabela 5, respectivamente.

De acordo com o PROODIST, para o nível de tensão da rede local determina-se que os valores aceitáveis para que a tensão fase-fase seja considerada adequada, deve estar no intervalo de 202 a 231V. Diante disto, nota-se que dentre as amostras coletadas, o

maior valor medido para as tensões de linha ultrapassou o limite de 231V em Vab, Vbc e Vca. Já os mínimos foram ultrapassados em Vab e Vbc, fato que ocorreu na primeira coleta do estudo.

Tabela 4 – Mínimos e Máximos para tensão de linha

Mínimos			
Linha	Valor (V)	Data	Hora
UAB	118,94	27/05/2022	13:50:43
UBC	118,65	27/05/2022	13:50:43
UCA	205,76	27/05/2022	13:50:43
Máximos			
Linha	Valor (V)	Data	Hora
UAB	234,36	02/06/2022	07:40:33
UBC	234,33	02/06/2022	07:40:33
UCA	234,32	02/06/2022	07:40:33

Analisando as amostras entre fase e neutro, observa-se que as mesmas devem permanecer entre 117 a 133V, para serem consideradas adequadas. Além disso, nota-se que os máximos extrapolaram o intervalo em VaN, VbN e VcN, porém em relação aos mínimos, não houve valores ultrapassando os limites adequados.

Tabela 5 – Mínimos e Máximos para tensão de fase

Mínimos			
Fase	Valor (V)	Data	Hora
VaN	118,94	27/05/2022	13:50:43
VbN	126,34	27/05/2022	13:50:43
VcN	118,65	27/05/2022	13:50:43
Máximos			
Fase	Valor (V)	Data	Hora
VaN	135,24	02/06/2022	07:40:43
VbN	135,37	02/06/2022	07:40:43
VcN	135,22	02/06/2022	07:40:43

Em relação aos índices DRP e DRC, as tensões fase-fase atingiram 5 vezes o nível crítico de classificação, ou seja, estiveram ou menor que 191V ou maior que 233V. Não houveram registros na zona precária de classificação, logo DRP com valor igual a zero. Destaca-se também que o índice DRC não extrapolou o limite proposto pelo módulo 8 do PRODIST de 3 pontos percentuais para DRP e 0.5 para DRC. A Tabela 7 expõe o valor dos índices.

Já para as tensões fase-neutro houve 3 coletas na faixa crítica, abaixo de 110V ou acima de 135V. Não ocorreram amostras consideradas precárias, entre 110 e 117V e no intervalo de 133 a 135V. Por fim nota-se que as outras amostras foram classificadas adequadas, entre 117 e 133V. Com isso, os valores aceitos de DRP e DRC aceitos são 3 e 0.5 pontos percentuais, consecutivamente.

Tabela 6 – Indicadores DRP e DRC para Tensão de linha

Fase	Adequado	Precário	Crítico	DRP	DRC
VAB	1006	0	2	0	0.19
VBC	1006	0	2	0	0.19
VAC	1007	0	1	0	0.09

Tabela 7 – Indicadores DRP e DRC para Tensão de fase

Fase	Adequado	Precário	Crítico	DRP	DRC
VaN	1007	0	1	0	0.09
VbN	1007	0	1	0	0.09
VcN	1007	0	1	0	0.09

A conexão do sistema fotovoltaico não impactou os indicadores DRP e DRC, já que durante as medições o sistema estava injetando potência na rede e a porcentagem de amostras que destoou do aceitável pelo PROODIST foi inferior às determinadas pelo mesmo. Já em relação aos afundamentos, a falta de energia na concessionária foi a responsável por tais distúrbios.

4.3 Análise de Distúrbios de Tensão

Durante o período de medição foram identificados alguns distúrbios na tensão medida. Considerando os conceitos de variação de curta duração, conforme exposto em 3.3 e 3.4, a Tabela 8 apresenta os resultados obtidos referente às variações de tensão de curta duração.

Tabela 8 – Variações de tensão de curta duração

Fase	Elevações		Afundamentos		Interrupções	
	Moment.	Temp.	Moment.	Temp.	Moment.	Temp.
VaN	0	0	1	0	0	0
VbN	0	0	1	0	0	0
VcN	0	0	0	0	0	0

Verifica-se que foram identificados um total de 2 variações, sendo ambas ocorrências AMT (Afundamento momentâneo de tensão) nas fases VaN e VbN. A classificação das ocorrências em momentâneas, temporárias ou interrupções é baseada nas durações, de acordo com o exposto no Capítulo 3.

Vale ressaltar que eventos temporários são de maior duração do que eventos momentâneos, conforme definido no Capítulo 3. Para análise da magnitude da tensão durante os distúrbios, 220 volts é o valor de referência para 1 p.u.. O caso mais crítico ocorreu na fase B, alcançando 98,51 volts durante 5,4 segundos.

4.4 Análise de Harmônicos

Para análise de distorções harmônicas, as medições se iniciaram no dia 27/05/2021 e finalizaram em 03/06/2022, totalizando 1008 medições intervaladas em 10 minutos, conforme exposto em [31]. Os resultados apresentados a seguir foram gerados considerando 50 como ordem harmônica máxima. A Tabela 9 expõe os resultados dos cálculos dos indicadores de distorções harmônicas de tensão, considerando os limites para faixa de tensão igual ou inferior a 220 kV, a qual é a faixa de tensão do secundário do transformador e utilizando o percentual de conformidade de 95%, ou seja, admitindo que os limites sejam extrapolados em 5% das amostras coletadas (1008 amostras).

Tabela 9 – Indicadores de Distorção Harmônica

[%]	Limite	Va	Vb	Vc
DTT95	10.00	3.98	4.00	4.01
DTTp	2.50	0.10	0.10	0.10
DTTi95	7.50	3.98	4.00	3.97
DTT395	3.30	0.20	0.23	0.24

A partir da análise dos resultados, observa-se que nenhum dos indicadores ultrapassaram o patamar máximo regulamentado pelo PRODIST - módulo 8. Sendo assim, os distúrbios harmônicos permaneceram abaixo dos limites estabelecidos. Também pode-se salientar que, os maiores valores de distorção são os de distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTTi95%). Isso ocorre devido aos tipos de inserção de potência dos inversores fotovoltaicos. Os baixos índices de distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTTp95%) demonstram que há baixa interferência de componentes de tensão contínua no sistema, garantindo certa simetria na forma de onda da tensão.

Tabela 10 – Indicadores Totais de Distorção Harmônica

		Va	Vb	Vc
DTT95	Media	3.40	3.55	3.39
	Maximo	4.24	12.14	4.44
DTTp	Media	0.05	0.05	0.04
	Maximo	0.14	0.33	0.16
DTTi	Media	3.39	3.51	3.38
	Maximo	4.24	7.55	4.23
DTT3	Media	0.14	0.22	0.20
	Maximo	0.30	9.50	2.78

Os indicadores totais ilustram os valores médios e máximos alcançados com cada categoria de distorção harmônica, ilustrados na Tabela 10. Através do mapeamento de todos registros, exposto na Figura 15, verifica-se que ocorreram distorções na fase B que superaram o limite de 10% proposto pela norma, alcançando 12%. Porém, como os

indicadores da Figura 51 estão dentro dos limites da norma, isso demonstra que essa variação na fase B ocorreu em um número inferior que 5% das amostras.

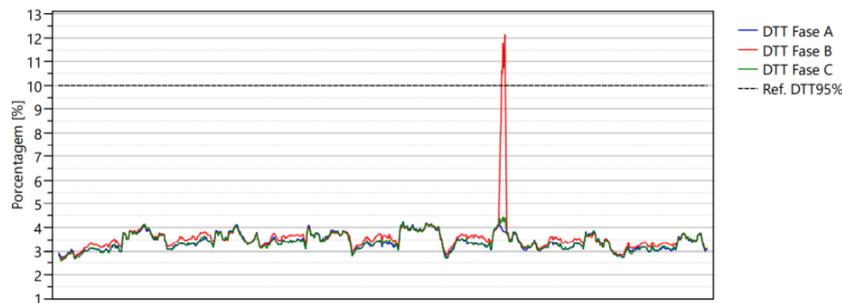


Figura 15 – Distorção harmônica total de tensão por registro.

Em relação ao perfil da corrente, verificou-se comportamento praticamente senoidal nos períodos em que a produção é nominal. Tal comportamento da onda de corrente caracteriza o que foi abordado no capítulo 3.5, de que a relação de potência entregue pelo inversor e os níveis de distorções harmônicas são inversamente proporcionais.

Já no dia 04/06 pode-se observar o efeito do sombreamento parcial a partir da passagem de nuvens, ocasionando falta de uniformidade na irradiação solar. Se a irradiação solar incidente não for uniforme, e algumas células fotovoltaicas ficarem sujeitas a passagem de nuvens, a potência disponível diminui, causando impactos no rendimento total da instalação e na qualidade da energia elétrica.

Com análise da Figura 16, pode-se verificar que o perfil da corrente RMS injetada pelo inversor sofreu distúrbios nas três fases, devido ao fenômeno de sombreamento, caracterizada pela queda brusca na potência entregue pelo inversor.

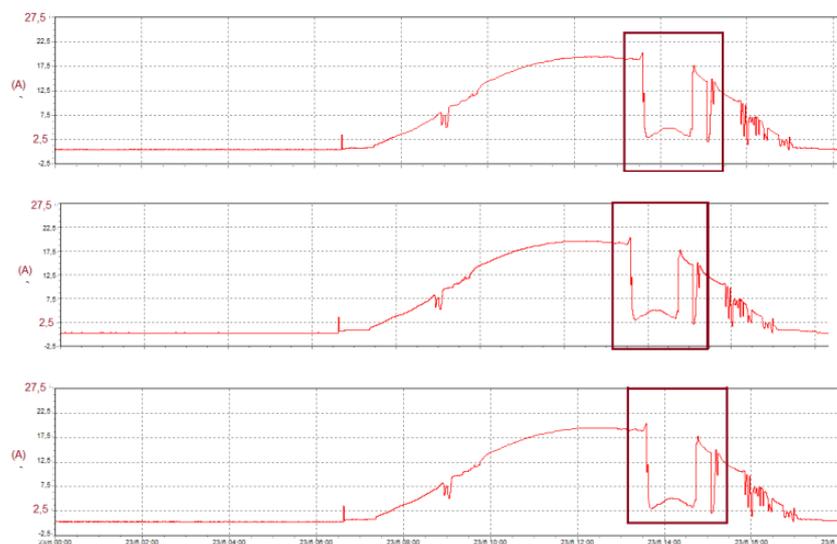


Figura 16 – Perfil da corrente de saída do inversor dia 04/06, nas fases A, B e C.

O comportamento do DIT de quinta ordem do dia 3 de junho é ilustrado na Figura 17. Com isso, pode-se observar que durante a queda na potência fornecida pelo inversor, evidenciada pelo comportamento do perfil de corrente (Figura 16), que houve aumento no DIT de ordem 5 do sistema.

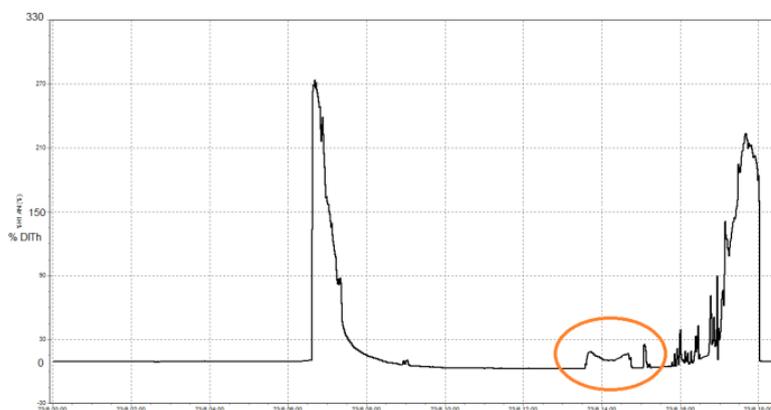


Figura 17 – Comportamento do DIT de ordem 5 dia 03/06.

O fenômeno de sombreamento não é o único responsável por atingir a capacidade de geração do sistema fotovoltaico. Os períodos de início e final do dia, quando há baixa produção, também se verifica aumento significativo no índice de DIT de quinta ordem conforme exposto na Figura 18.

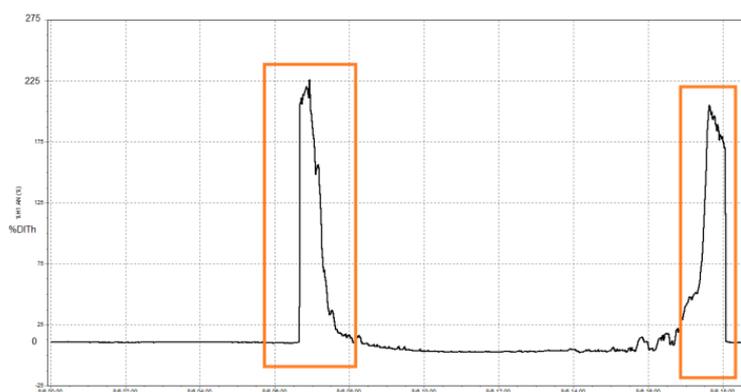


Figura 18 – Comportamento do DIT de quinta ordem dia 03/06.

Assim sendo, a produção de harmônicos de corrente pelo inversor é diretamente dependente do nível de potência elétrica fornecido pelo sistema fotovoltaico, caracterizando uma relação inversamente proporcional. Portanto, ocorreu intensificação nos índices de DIT durante início e fim dos períodos de geração.

4.5 Análise do Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é outro indicador de qualidade da energia elétrica, o qual também foi observado através dos dados coletados durante o período de medição. O Fator de Desequilíbrio (FD) foi calculado por (1), de acordo com PRODIST [31]. O valor limite para o FD95%, considerando-se tensão nominal abaixo de 1 kV, é de 3%. O fator FD95% representa o valor do indicador FD que foi superado em 5% das leituras válidas. A Figura 19 representa os valores de FD95% observados diariamente, mantendo nesse patamar de variação, exceto durante todo o período da falta de energia registrada, ilustrado pela Figura 20. O eixo Y de todos os gráficos estão em unidade de porcentagem.

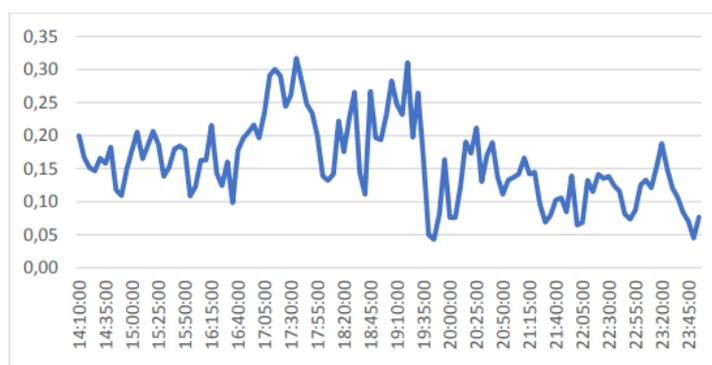


Figura 19 – FD95% para dia 31/05.

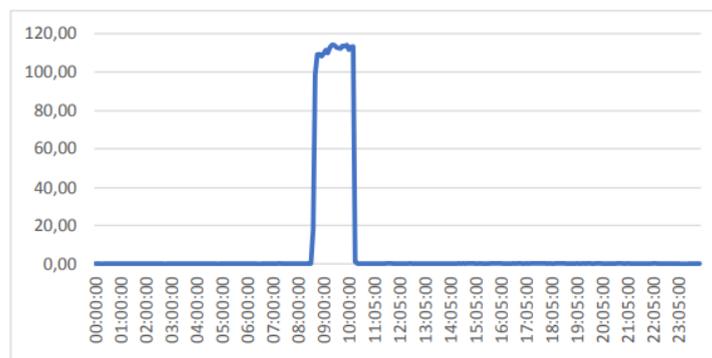


Figura 20 – FD95% para dia 30/05.

A partir da análise dos gráficos, pode-se concluir que apenas no dia 30/05 o nível de FD95% extrapolou o limite regulamentado pela norma, alcançando o patamar de aproximadamente 120%. Vale ressaltar que esta data é a mesma em que ocorreu a falta de energia, exposta na Figura 20. O período em que este indicador atingiu valores muito acima do permitido, coincide com o período em que foram registrados os distúrbios de afundamento de tensão, expostos na Figura 47. Portanto, o efeito dos afundamentos de tensão e falta de energia

4.6 Considerações Parciais

Ao demonstrar vantagens e desvantagens do SFCR, pontos críticos de controle devem ser observados, afim de verificar o real impacto da conexão ao sistema. Desta forma, se torna possível realizar a análise fidedigna e dedicada ao sistema em questão, avaliando os critérios de funcionamento conforme a legislação. Assim, a necessidade de um estudo de qualidade de energia elétrica é capaz de caracterizar o estado de funcionamento da unidade consumidora, a confiabilidade da operação e possíveis parâmetros que necessitam ser corrigidos. Logo, a partir deste capítulo, foi possível observar o comportamento do sistema elétrico da usina após a instalação do sistema de SFCR, detalhando ocorrências e avaliando impactos.

5 Considerações Finais

O pensamento que as fontes de energias renováveis devem ter seu uso priorizado e intensificado na participação da matriz elétrica, tanto por motivos econômicos, devido à redução no preço das faturas, quanto por questões ambientais, por serem fontes inesgotáveis, com baixo impacto ambiental, maior facilidade e rapidez de instalação, uma vez que, em grande maioria, são incorporadas à estruturas já existentes, tem se tornado comum no cenário energético brasileiro como mostram os constantes aumentos em tal matriz nos últimos anos no Brasil

Em consonância com o crescimento deste seguimento de fonte de energia está a manutenção da qualidade da energia elétrica. O tema tem se tornado fonte de ampla discussão, uma vez que a disseminação das fontes renováveis, em especial a fotovoltaica, está se expandindo juntamente com a geração distribuída, fato que faz com que seja dada atenção à todas barreiras técnicas já mapeadas, afim de contornar os efeitos negativos o uso de SFCR. Nesta perspectiva, o presente trabalho realiza um estudo de QEE referente aos dados coletados a partir das medições no sistema elétrico de uma usina fotovoltaica em Viçosa, MG.

O cenário de aumento de tensão no sistema devido à conexão do SFCR é nítido a partir da análise do perfil de tensão com os gráficos temporais, e registros pontuais de tensão ligeiramente acima do limite proposto. Porém, pela análise dos histogramas de tensão, esses registros ocorrem com baixa frequência, possuindo registros somente em zona crítica baixa, extrapolando o limite inferior proposto. Os distúrbios de afundamento estão ligados com a falta de energia registrada, inerente às variações da rede de distribuição, caracterizando registros momentâneos e temporários. Apesar do aumento da tensão, maior parte dos dados estão dentro dos limites de operação, exceto durante as ocorrências de afundamento, em consequência da falta de energia.

A ocorrência de harmônicos de tensão no sistema é inferior à 5% das amostras, caracterizando conformidade dos registros em detrimento com o que é exposto pela norma. Com a elaboração da nova curva de carga, foi possível identificar a existência de fluxo reverso na rede durante horários de pico da geração, comprovando a efetividade do sistema na compensação de potência ativa injetada no sistema. Também pode-se notar que a operação do inversor distante de sua potência nominal, ocasiona distorções no perfil da corrente de saída do inversor. Tais distorções ocasionam aumento no nível de harmônicos de corrente.

Já em relação ao fator de desequilíbrio, os registros estão todos abaixo de 1%, exceto no dia e período de registro da falta de energia, em que o patamar de desequilíbrio

atingiu aproximadamente 120%.

Por fim, é notório que os benefícios que justificam o uso e investimento desta tecnologia superam os pontos negativos que podem trazer ao sistema elétrico. Portanto, considerando que as análises foram feitas em um SFCR em operação, sujeito a intempéries e flutuações variáveis, a operação deste sistema em potência nominal não prejudica a QEE da instalação, fornecendo energia elétrica dentro dos padrões de qualidade que regem as normas.

O presente trabalho direcionou esforços para alguns parâmetros específicos de QEE. Recomenda-se trabalhos futuros que utilizem o mesmo método de medição no mesmo sistema, afim de analisar os demais parâmetros expostos pelo Módulo 8 – PRODIST. Afim de acompanhar a evolução na instalação da potência total do SFCR da usina e o impacto na QEE do sistema, pode-se realizar trabalhos que levam em consideração os mesmos parâmetros de QEE abordados neste trabalho, porém com maior potência instalada. Devido ao grande impacto que o sombreamento causa no perfil da corrente, cabe a análise qualitativa destas variações, considerando os impactos na estabilidade do sistema da instalação.

Bibliografia

- [1] HINRICHS, R. A., KLEINBACH, M. (2012). Energia e Meio ambiente (4^a ed.). (L. B. Reis, Trad.) São Paulo: CENGAGE Learning.
- [2] Economia da China – Santander Trade Portal.
- [3] SAUAIA, L. R. Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios. ABSOLAR. 11/06/2018.
- [4] ANEEL. Novas regras para geração distribuída entram em vigor.
- [5] PAULILO, G. Conceitos Gerais Sobre Qualidade da Energia. Cap. 1: Qualidade de Energia. O Setor Elétrico. Ed 84: p 28 – 35, 2013.
- [6] INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS. IFG terá sistema de geração de energia solar fotovoltaica em nove câmpus, 2017.
- [7] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012.
- [8] EPE, Empresa de Pesquisa Energética. NOTA TÉCNICA DEA 001/17 - Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026). Rio de Janeiro, 2017.
- [9] PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R. “Atlas Brasileiro de Energia Solar (Brazilian Atlas of Solar Energy)”. Projeto Swera. 1 Ed. São José dos Campos, 2016.
- [10] TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. (Coord.). EPE: Rio de Janeiro, 2016.
- [11] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Plano Nacional de Energia 2030. Geração de Energia Elétrica a partir de Outras Fontes.
- [12] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Energia Solar no Brasil e Mundo.
- [13] BOLLEN, M. H. J., RIBEIRO, P. F., GU, I. Y. H., et al. “Trends, challenges and opportunities in power quality research”, EUROPEAN, Transactions on Electrical Power, v. 20, pp. 3–18, 2009.
- [14] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). Std 1159-2009: Recommended practice for monitoring electric power quality, 2009.
- [15] ROCHA, J.E. Qualidade da Energia Elétrica. Departamento de Eletrotécnica. UTFPR. Curitiba, 2016. [16] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

(ANEEL). IEC 61000 4-15.

[17] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S. *Electrical Power Systems Quality*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002

[18] BOLLEN, M.; HASSAN, F. *Integration of Distributed Generation in the Power System*. New York: Wiley-Blackwell, 2011.

[19] SHAYANI, R. A., Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição. 2010. 161 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de tecnologia, Universidade de Brasília – UNB, 2010.

[20] LIMA, Rogério Lúcio; MOTTER, Daniel; VIEIRA JÚNIOR, José Carlos de Melo; MONARO, Renato Machado. Análise de estratégias aplicadas ao ilhamento intencional de geradores síncronos distribuídos. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*. Belo Horizonte/MG, 2014.

[21] FORTES, Rarison Roberto Acácio. Propagação de harmônicas produzidas por inversores fotovoltaicos e transformadores assimetricamente magnetizados na geração distribuída. UNESP, Ilha Solteira, 2018, 203 p.

[22] J. T. Pinho, M. A. Galdino, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro, março de 2014.

[23] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. BIG – Banco de Informações de Geração – Capacidade de Geração do Brasil.

[24] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. NOTA TÉCNICA N° 0043/2010-SRD/ANEEL: Proposta de abertura de Consulta Pública para o recebimento de contribuições visando reduzir as barreiras para a instalação de geração distribuída de pequeno porte, a partir de fontes renováveis, conectada em tensão de distribuição. 1 ed. Aneel, 2010. 20 p.

[25] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 687: Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. 1 ed. Aneel, 2015. 25 p.

[26] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 724: Aprova revisões dos Módulos 3 e 5 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST e altera as Resoluções Normativas n° 395/2009, n° 414/2010 e n° 506/2012. 1 ed. Aneel, 2016. 33 p.

[27] ENEL. Conexão de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema Elétrico da Enel Distribuição Ceará / Enel Distribuição Goiás/ Enel Distribuição Rio. 2. ed. Enel, 2018. 42 p.

[28] CELG D. NTC 05: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de

Distribuição. 2 ed. Celg D, 2012. 144 p.

[29] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. MÓDULO 3 – ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. 7 ed. Brasil, 2017. 74 p.

[30] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. MÓDULO 5 – SISTEMAS DE MEDIÇÃO: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. 5 ed. Brasil, 2017. 31 p.

[31] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. MÓDULO 8 – QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. 10 ed. Brasil, 2018. 88 p.

[32] GOMES, Rodolfo Dourado Maia; VARELLA, Fabiana K. de O. M.. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação. Campinas: IEI - International Energy Initiative, 2009. 53 p.

[33] IMS POWER QUALITY. Analisador da Qualidade da Energia Elétrica POWERNET PQ-700 G4: Manual de Instalação e Operação. Brasil, 2016.

[34] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Geração Distribuída.

[35] FORTES, Rarison Roberto Acácio. Distorções Harmônicas Produzidas por Inversores de Geração Distribuída Fotovoltaica em Condição de Ressonância Paralela. UNESP, Ilha Solteira, 2016, 124 p.

[36] CHICCO, Gianfranco; SCHLABBACH, Jurgen; SPERDINO, Fillipo. Characterisation and assessment of the harmonic emission of grid-connected photovoltaic systems. Power Tech, Petersburg, p. 1-7, jun 2005.

[37] (Keshav and Rosenberg 2011) Keshav, S. and Rosenberg, C. (2011). How internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid. ACM SIGCOMM Computer Communication Review.

[38] World Energy Outlook 2017 – IEA.

[39] IMAPS SOLARGIS.

[40] PINTO NETO, Aime Fleury de Carvalho. Avaliação dos impactos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão. 2016. 109 f. Tese - Curso de Programa de Pós-graduação em Energia, USP, São Paulo, 2016.

[41] Operador Nacional do Sistema (ONS) – Mapa dinâmico do SIN.

[42] CASA CIVIL. DECRETO Nº 5.163 DE 30 DE JULHO DE 2004: Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. . 1 ed. Casa Civil, 2004.