

Thiago Mendes Ávila

**Análise da Qualidade de Energia de Sistemas
Fotovoltaicos: Estudo de casos em Viçosa e
Cajuri - MG**

Viçosa - MG, Brasil

2023

THIAGO MENDES DE ÁVILA

Análise da Qualidade de Energia de Sistemas Fotovoltaicos: Estudo de casos em Viçosa e Cajuri - 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 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 23 de junho de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

MAURO DE OLIVEIRA PRATES

Data: 26/06/2023 13:33:35-0300

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

Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador

Universidade Federal de Viçosa



Documento assinado digitalmente

RODOLPHO VILELA ALVES NEVES

Data: 23/06/2023 15:20:09-0300

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

Prof. Dr. Rodolpho Vilela Alves Neves - Membro

Universidade Federal de Viçosa

João Victor Guimarães Franca

Eng. João Victor Guimarães Franca - Membro

Universidade Federal de Viçosa

Thiago Mendes Ávila

**Análise da Qualidade de Energia de Sistemas
Fotovoltaicos: Estudo de casos em Viçosa e Cajuri - 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.

Orientador: Mauro de Oliveira Prates

Viçosa - MG, Brasil

2023

Dedico este trabalho aos meus pais, Edson e Rosangela, ao meu irmão, Lucas, minha esposa Michelle e a turma da Engenharia Elétrica 2017.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter tornado meu sonho possível. Aos meus pais, Edson e Rosangela, por todo incentivo e compreensão. A minha esposa, Michelle, por sempre estar ao meu lado, e me ajudar nos momentos mais importantes dessa caminhada. A toda minha família. Aos grupos Adolescentes e Jovens Seguidores de Cristo por terem mudado minha vida, pelos ensinamentos e alegria. A todos amigos do curso de Engenharia Elétrica, principalmente do ano de 2017, porque sem eles seria muito mais difícil o caminho. Ao Departamento de Engenharia Elétrica por ceder os equipamentos necessários para realização do projeto. Ao professor e orientador Mauro Prates, por todo e apoio e disponibilidade. A empresa Grupo T3 engenharia, pela oportunidade de aprendizado e disponibilidade de dados para a realização da pesquisa. E aos membros da minha banca examinadora que aceitaram participar deste momento comigo. Muito obrigado por fazerem parte da minha história.

Muito obrigado,
Thiago Ávila

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos .”*

Provérbios 16:3

Resumo

A participação da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, embora pequena, vem crescendo exponencialmente nos últimos anos. Com isso, houve um crescente aumento dos tipos de equipamentos fornecidos para a implementação desse tipo de sistema, aumentando também a necessidade de melhor regulamentar esse tipo de geração de energia, uma vez que, a energia elétrica de má qualidade ocasiona distúrbios que afetam, sobretudo, equipamentos eletrônicos e causam, em casos mais graves, a falha total destes. Partindo desse cenário, o presente trabalho analisa, a partir de dados medidos, a qualidade da energia elétrica entregue por dois Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) em duas unidades prosumidoras residenciais, uma localizada em Viçosa, e a outra localizada em Cajuri, MG. Para as medições foi utilizado um analisador de rede que coletou dados de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente, componentes harmônicas e fator de potência em um intervalo de 10 minutos em diferentes dias típicos. Utilizando os dados coletados foi possível analisar estes parâmetros, e o consumo das cargas conectadas em uma das residências. Considerando que as análises foram realizadas em sistemas fotovoltaicos (FV) em operação, sujeitos a diversas intempéries e com flutuação de variáveis, ambos os SFCR fornecem energia elétrica de qualidade dentro do que regem as normas. Quanto ao consumo de energia elétrica pelas cargas, foi verificado que o sistema FV não exerce influência direta, não sendo possível avaliar quando as cargas estão consumindo da rede ou do sistema de geração.

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

Abstract

The participation of photovoltaic solar energy in the Brazilian energy matrix, although small, has been growing exponentially in recent years. With this, there has been a growing increase in the types of equipment supplied for the implementation of this type of system, also increasing the need to better regulate this type of power generation, since poor quality electrical power causes disturbances that affect, above all, electronic equipment and cause, in more serious cases, their total failure. Based on this scenario, the present work analyzes, based on measured data, the quality of the electric energy delivered by two Photovoltaic Systems Connected to the Grid (SFCR) in residential prosumer units located in Viçosa and Cajuri, MG. For the measurements, a network analyzer was used, which collected data on voltage, current, active power, reactive power and apparent power, harmonic components and power factor in an interval of 5 minutes on different typical days. Using the data collected, it was possible to analyze parameters of THD_v, THD_i, IHD_i, PF, active, reactive and apparent power, as well as the consumption of loads connected in one of the residences. Considering that the analyzes were carried out on photovoltaic (PV) systems in operation, subject to different weather conditions and with variable fluctuations, both SFCR provide quality electrical energy within the rules. As for the consumption of electricity by the loads, it was verified that the PV system does not have a direct influence, and it is not possible to assess when the loads are consuming from the grid or from the generation system.

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

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxo de energia elétrica (ENERGÉTICA et al., 2022).	16
Figura 2 – Crescimento de sistemas de geração distribuídas instalados no Brasil (ENERGÉTICA et al., 2022).	16
Figura 3 – Sistema de compensação de energia elétrica (VIEIRA; CASTRO, 2016).	19
Figura 4 – Diagrama esquemático funcional de um inversor fotovoltaico conectado à rede (PERIN, 2016)	21
Figura 5 – Triângulo de potências (SMA).	24
Figura 6 – Curva do FP em função da potência ativa de saída do inversor (SOUZA, 2014).	25
Figura 7 – Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência acima de 6 kW (SOUZA, 2014).	25
Figura 8 – Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação.	28
Figura 9 – Diagrama unifilar do Projeto Casa da lavoura.	29
Figura 10 – Diagrama unifilar do projeto Sitio Santa Tereza.	30
Figura 11 – a) Montagem realizada no Sítio Santa Tereza; b) e c) Montagem realizada na Casa da Lavoura.	31
Figura 12 – Histórico da tensão AN instantânea no decorrer do tempo.	32
Figura 13 – Histórico da tensão AB instantânea no decorrer do tempo.	33
Figura 14 – Histórico da tensão A instantânea no decorrer do tempo.	33
Figura 15 – Histórico da tensão AB instantânea no decorrer do tempo.	34
Figura 16 – IHDi em função do carregamento do inversor para o sistema FV do Sítio Santa Tereza.	36
Figura 17 – IHDi em função do carregamento do inversor para o sistema FV da Casa da Lavoura.	36
Figura 18 – THDv em função do tempo do sistema FV de Santa Tereza, durante uma semana.	37
Figura 19 – THDv em função do tempo do sistema FV da casa da Lavoura.	37
Figura 20 – THDi em função do tempo do sistema FV do Sitio Santa Tereza.	38
Figura 21 – THDi em função do tempo do sistema FV da Casa da Lavoura.	38
Figura 22 – THDi em função da potência relativa do sistema FV de Santa Tereza.	39
Figura 23 – THDi em função da potência relativa do sistema FV da Casa da Lavoura.	39
Figura 24 – THDi em função da potência relativa ao longo dos dias (a) 04/07/2021 (ensolarado) e (b)05/07/2021 (nublado) para o sistema fotovoltaico de Santa Tereza.	39

Figura 25 – THDi em função da potência relativa ao longo dos dias (a) 04/07/2021 (nublado) e (b) 05/07/2021 (ensolarado) para o sistema fotovoltaico da Casa da Lavoura.	40
Figura 26 – Linha de tendência da THDi em função da potência relativa para o sistema FV do Sítio.	40
Figura 27 – Linha de tendência da THDi em função da potência relativa para o sistema FV da Casa da Lavoura.	40
Figura 28 – Potências ativa, reativa e aparente em função do tempo para o Sítio.	42
Figura 29 – Potências ativa, reativa e aparente em função do tempo para Casa da Lavoura.	42
Figura 30 – Potência reativa em função do tempo para a Casa da Lavoura.	43
Figura 31 – Potência reativa em função do tempo para o Sítio Santa Tereza.	43
Figura 32 – Perfil de consumo das cargas para o dia 29/06/2021.	44
Figura 33 – Perfil de consumo das cargas para o dia 30/06/2021.	44
Figura 34 – Potência ativa consumida no dia 29/06/2021.	45
Figura 35 – Potência ativa consumida no dia 30/06/2021.	45

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Limite de Distorção de Harmônica de Corrente	23
Tabela 2 – Terminologia	27
Tabela 3 – Limites para flutuação de tensão.	27
Tabela 4 – Valores de Tensão de Referência	32
Tabela 5 – Indicadores de variação de tensão no tempo da casa da lavoura	33
Tabela 6 – Indicadores de variação de tensão no tempo do sitio Santa Tereza	34
Tabela 7 – THD _v e THD _i do SFCR	36
Tabela 8 – Ajuste da curva de THD _i dos sistemas FV	41

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

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	Sistemas fotovoltaicos de geração distribuída	18
2.2	Qualidade de energia elétrica	20
2.2.1	Inversor	20
2.2.2	Tensão em regime permanente	21
2.2.3	Harmônicas	22
2.2.4	Fator de potência	23
2.2.5	Desequilíbrio de Tensão	26
2.2.6	Flutuação de tensão	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Sistemas fotovoltaicos de referência	29
3.1.1	SFCR - Casa da Lavoura	29
3.1.2	SFCR - Sitio Santa Tereza	29
3.2	Coleta de dados	30
3.3	Análise de dados	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	Tensão em regime permanente	32
4.2	Fator de Potência	34
4.3	Componentes Harmônicas	35
4.4	Distorções harmônicas	36
4.5	Potência injetada na rede	41
4.6	Perfil de consumo	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	BIBLIOGRAFIA	48

1 Introdução

A geração de energia solar é uma alternativa economicamente viável para diversificar a matriz elétrica e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O Brasil, localizado em sua maior parte na região intertropical, possui grande potencial para o aproveitamento da energia solar. O valor máximo de irradiação solar global em média diária anual ocorre no norte da Bahia, enquanto que o valor mínimo ocorre no litoral norte de Santa Catarina, porém, todos os valores de irradiação solar global no Brasil são considerados apropriados para o aproveitamento desse recurso (PEREIRA, 2006).

Embora a participação da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira ainda seja pequena, ela vem crescendo significativamente nos últimos anos. Em 2015, o terceiro leilão do Ministério de Minas e Energia contratou energia solar fotovoltaica no ambiente de contratação regulada, com um número maior de projetos habilitados do que nos leilões anteriores (ALENCAR; JUNIO, 2016). Em 2012, a ANEEL publicou a primeira Resolução Normativa regulamentando a Geração Distribuída (GD) no Brasil, permitindo a geração de energia elétrica por unidades consumidoras e a contabilização de créditos por parte das concessionárias. Em 2015, a resolução foi atualizada para a n° 687, que está em vigor atualmente (NETO; COSTA; VASCONCELOS, 2014) (NETO; MADRUGA; GEREMIAS, 2016) (SOUZA et al., 2016).

O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022, mostra que no ano de 2021, a participação de renováveis na matriz energética representou 44,7% da oferta interna de energia, marcada pela queda da participação de energia hidráulica, associada à escassez hídrica. Quando analisada a matriz elétrica, o setor residencial correspondeu a 10,9% do consumo de energia elétrica. Além do mais, a energia hídrica segue como a principal fonte energética brasileira, gerando um equivalente a 53,4% da matriz elétrica brasileira. A energia solar ainda se encontra em fase de desenvolvimento. Este panorama deverá ser alterado nos próximos anos a partir da inserção de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída e usinas fotovoltaicas de geração centralizada. A Figura 1 mostra o fluxo de energia elétrica brasileira em 2022 (ENERGÉTICA et al., 2022).

Segundo a Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD), o Brasil alcançou cerca de 19 gigawatt (GW) de capacidade de geração de energia elétrica. A geração própria de energia conta com 1,8 milhão de usinas de microgeração e minigeração distribuídas pelo País e 2,3 milhões de unidades consumidoras que utilizam a GD no país. Entre os consumidores beneficiados, cerca de 48,5% dos projetos são do grupo residencial, seguido pelo consumo comercial de 28,3%, rural de 14,9% e industrial de 7,1%. A Figura 2 mostra o crescimento de sistemas de geração distribuída instalados no Brasil desde 2015 até 2021.



Figura 1 – Fluxo de energia elétrica (ENERGÉTICA et al., 2022).

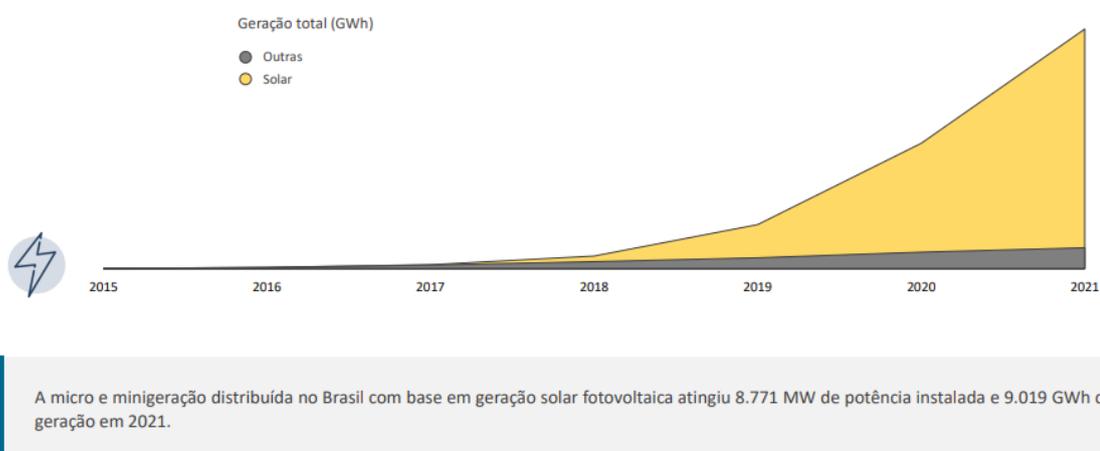


Figura 2 – Crescimento de sistemas de geração distribuídas instalados no Brasil (ENERGÉTICA et al., 2022).

O uso de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) no Brasil está aumentando, graças aos investimentos em pesquisas e tecnologia no setor. Em outros países, o governo utiliza programas para incentivar o uso de energias renováveis. No entanto, o aumento significativo de SFCR pode trazer desafios para as concessionárias, como a qualidade da energia entregue por esses sistemas e a interface com a rede. Além disso, a montagem das usinas de geração distribuída pode causar impactos técnicos, como flutuação de tensão e distorções harmônicas na rede. No entanto, existem regulamentações previstas pelo PRODIST para reduzir esses impactos.

Devido ao investimento necessário para a implementação dos sistemas fotovoltaicos, é importante garantir a performance das usinas, pois isso influencia diretamente no retorno sobre o investimento. Dentre os fatores que afetam a produção de energia, estão as perdas causadas pelo posicionamento dos módulos em diferentes orientações e dimensionamento dos componentes.

1.1 Objetivos

O objetivo principal é medir, monitorar e avaliar alguns dos parâmetros associados à qualidade da energia elétrica injetada à rede por SFCR, distorções harmônicas de tensão e de corrente, Fator de Potência (FP) e Potência Reativa (Q).

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Recolher informações relacionadas aos principais parâmetros de energia, através do analisador Primata P-55 e dos aplicativos de monitoramento fornecidos pela fabricante dos inversores, após a implementação do sistema fotovoltaico;
- Revisar a bibliografia existente acerca das normas nacionais para um fornecimento adequado de energia;
- Verificar a influência da interação entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica.
- Realizar uma comparação entre dois sistemas fotovoltaicos instalados.
- Analisar e propor alternativas para mitigar as perturbações encontradas para uma melhor qualidade de fornecimento de energia.

2 Revisão de Literatura

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais conteúdos abordados nesta monografia. Serão discutidos temas como sistemas fotovoltaicos, qualidade de energia elétrica e, também, subtemas como inversores, fator de potência, e perfil de consumo de energia.

2.1 Sistemas fotovoltaicos de geração distribuída

Geração distribuída é uma alternativa importante para diversificar e descarbonizar a matriz elétrica. Esses sistemas permitem a geração de energia elétrica próximo ao ponto de consumo, podendo ser de grande ou pequeno porte, e independem da fonte ou tecnologia (SOUZA, 2014) (SOUZA et al., 2016). No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou a geração distribuída através das resoluções normativas nº 482 e nº 687, que possibilitam a geração de energia elétrica em unidades consumidoras e a contabilização de créditos por parte das concessionárias. Os sistemas GD ou SFCR conectados à rede não utilizam armazenamento de energia elétrica em baterias, pois a rede elétrica de distribuição já possui a característica de acumuladora infinita, onde toda a energia elétrica produzida é entregue para a rede. (NASCIMENTO, 2013) (SOUZA et al., 2016).

O sistema de compensação de energia elétrica é fundamental para garantir a viabilidade econômica da geração distribuída, pois permite que os consumidores gerem a sua própria energia e possam utilizar essa energia excedente posteriormente para compensar a energia que consumiram da rede convencional. Isso faz com que os consumidores possam reduzir significativamente a sua conta de energia elétrica e também incentiva a adoção de fontes renováveis de energia (NASCIMENTO, 2013) (SOUZA et al., 2016).

É importante ressaltar que a implementação da geração distribuída e do sistema de compensação de energia elétrica varia de acordo com o país e com as regulamentações locais. No Brasil, por exemplo, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) é responsável por regulamentar a geração distribuída e estabelecer as regras para o sistema de compensação de energia elétrica. Outros países têm regulamentações diferentes e podem apresentar desafios distintos para a implementação da geração distribuída (VIEIRA; CASTRO, 2016) (GALDINO, 2014).

A complementação de energia elétrica acontece por meio de um sistema de compensação, onde, a UC (unidade consumidora) responsável pela geração, injeta na rede de distribuição a energia elétrica excedente, ou seja, há injeção de energia elétrica

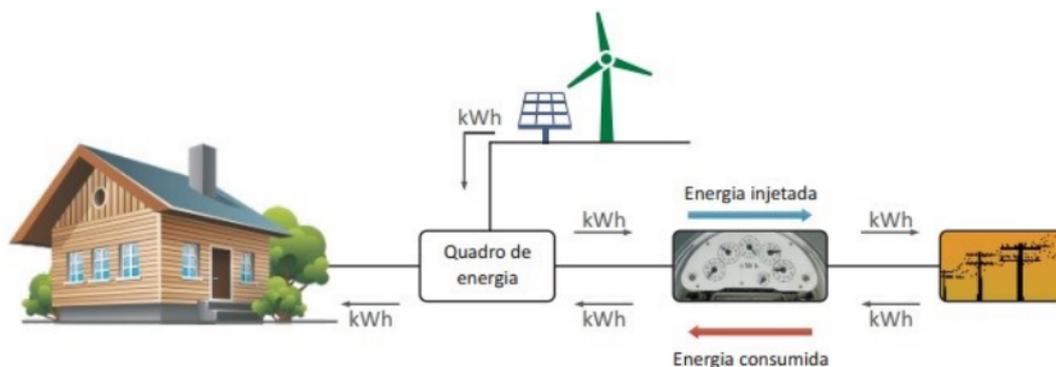


Figura 3 – Sistema de compensação de energia elétrica (VIEIRA; CASTRO, 2016).

quando a geração é superior ao consumo. A energia elétrica excedente é um empréstimo gratuito a distribuidora local, contabilizado em créditos. Quando o contrário ocorre e a UC apresenta consumo de energia elétrica maior que a energia gerada, existe a compensação por meio da distribuidora suprindo a diferença, onde os créditos serão utilizados, não haja créditos, o consumidor pagará a diferença (VIEIRA; CASTRO, 2016) REN 687, 2015; (SOUZA et al., 2016). Para que os créditos possam ser contabilizados de maneira correta, é responsabilidade da concessionária de energia elétrica a troca do medidor unidirecional pelo medidor bidirecional, que é capaz de aferir a energia elétrica consumida da rede e injetada pela UC, podendo então utilizar os créditos. A Figura 3 mostra um esquema do sistema de compensação de energia elétrica (VIEIRA; CASTRO, 2016) (GALDINO, 2014).

A GD possui diversas vantagens tanto para o consumidor como para o setor elétrico. Do lado da UC pode ser citado a qualidade da energia elétrica, visto que o sistema não pode tolerar variações de frequência, tensão e interrupção no abastecimento, também permite que a energia elétrica seja gerada com um custo mais baixo comparado com a taxa cobrada pela concessionária. Já do lado do setor elétrico, existe a redução nos custos com implantação de linhas de transmissão e distribuição, o risco associado ao planejamento também é reduzido e viabiliza a geração de energia elétrica em locais limitados por alguma questão política ou ambiental (RODRÍGUEZ; JANNUZZI, 2002).

Os SFCR são os mais utilizados na GD devido a simplicidade de instalação, a facilidade de expansão, o elevado grau de confiabilidade, mínima necessidade de manutenção, baixos níveis sonoros de operação e as mínimas emissões de poluentes, se encaixando nas fontes de energia renovável que utilizam o sol como força motriz (GALHARDO; PINHO, 2004). Os principais componentes dos SFCR são, o gerador fotovoltaico e o inversor.

No gerador ou módulo fotovoltaico é onde ocorre a conversão da energia solar em energia elétrica através de um fenômeno físico denominado efeito fotovoltaico. É nesse componente também que se encontram as células de um material semicondutor agrupadas eletricamente em diferentes combinações permitindo chegar a valor de tensão e corrente desejados (NASCIMENTO, 2013) (RODRÍGUEZ; JANNUZZI, 2002).

O inversor é um circuito eletrônico responsável por converter a energia elétrica gerada em corrente contínua nos módulos fotovoltaicos, para corrente alternada compatível com a rede elétrica. O inversor é de fundamental importância para os SFCR, pois além de fazer a transformação de c.c. em c.a., é ainda responsável por entregar uma energia elétrica de qualidade a rede de distribuição (RODRÍGUEZ; JANNUZZI, 2002).

2.2 Qualidade de energia elétrica

Nos últimos anos, o setor de energia elétrica passou por um significativo avanço tecnológico, resultando em mudanças no perfil de carga e nos hábitos dos consumidores. Como consequência, os sistemas elétricos evoluíram e se tornaram mais eficientes, permitindo a realização de tarefas que antes não eram possíveis. Isso foi apontado em estudos como (MARTINS; COUTO; AFONSO, 2003) e (SILVA, 2008).

Antes desse avanço na engenharia elétrica, a maioria dos equipamentos conectados à rede elétrica consistiam em cargas lineares, ou seja, as ondas de tensão e corrente eram ondas sinusoidais de mesma frequência, podendo estar defasadas entre si. No entanto, com a introdução de novos equipamentos, a rede elétrica passou a ser afetada por formas de onda diferentes das sinusoidais puras. (MARTINS; COUTO; AFONSO, 2003). Portanto, o termo Qualidade da Energia Elétrica está relacionado com qualquer desvio que possa ocorrer na amplitude, na forma de onda ou na frequência da tensão e/ou corrente elétrica. Esta designação também se aplica às interrupções de natureza permanente ou transitória que afetam o desempenho da transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica (SILVA, 2008).

Quando existem problemas com a qualidade da energia elétrica entregue, alguns distúrbios podem aparecer, como interrupção no fornecimento de energia elétrica, níveis de tensão fora do padrão, oscilações de tensões e frequência, distorções harmônicas de corrente e tensão, ruídos, transitórios entre outros problemas de ordem elétrica (MARTINS; COUTO; AFONSO, 2003). Sendo assim, conhecer a qualidade da energia elétrica que passa a ser injetada na rede se torna crucial e deve ser incorporada na fase de estudos durante o anteprojeto para garantir que todos os equipamentos irão operar de forma adequada e com o máximo desempenho (JUNIOR; RÜTHER, 2011)

2.2.1 Inversor

O inversor é necessário nos sistemas fotovoltaicos para alimentar consumidores em corrente alternada a partir da energia elétrica de corrente contínua produzida pelo painel fotovoltaico. O princípio de funcionamento do inversor é baseado no circuito eletrônico mostrado na Figura 4. Quatro transistores, são abertos ou fechados para transferir a tensão e a corrente elétricas da fonte de tensão contínua para os terminais de saída do inversor.

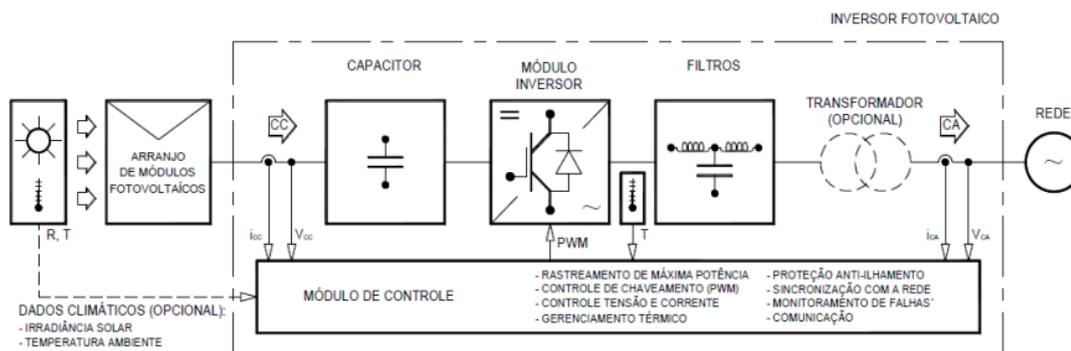


Figura 4 – Diagrama esquemático funcional de um inversor fotovoltaico conectado à rede (PERIN, 2016)

Os transistores, nesse contexto, são chaves eletrônicas que interrompem ou permitem a circulação da corrente elétrica de acordo com seu estado ligado ou desligado (JUNIOR; RÜTHER, 2011)

Para que possa ocorrer a injeção de energia elétrica, a saída do inversor de frequência deve ser conectada em paralelo com a rede de distribuição que, por sua vez, também está conectada à carga (PUFAL, 2012) (RODRÍGUEZ; JANNUZZI, 2002). Para que o paralelismo possa ocorrer, é necessário que as ondas de tensão e corrente do inversor de frequência estejam em fase com as da rede, para isso, o inversor utiliza a rede da concessionária como referência. Caso o inversor de frequência não consiga identificar essa referência ele automaticamente se desconecta utilizando o dispositivo de anti-ilhamento (PUFAL, 2012).

Existem dois principais grupos ou topologias quando se trata de SFCR, que são os com e sem isolamento galvânico (transformador). O isolamento galvânico era utilizado como proteção, entretanto a eficiência do sistema decaía devido as perdas nesses componentes extras. Com o tempo, os inversores sem isolamento galvânico foram se desenvolvendo, se tornando mais leves, menores e seguros, sendo que a eficiência cresceu entre 1 e 2% se comparado com os que possuem transformador (KEREKES et al., 2011); (JUNIOR; RÜTHER, 2011). Devido as características citadas anteriormente, os inversores sem transformador já são preferência tanto em grandes usinas como em SFCR. Atualmente são adotadas mais de 40 topologias em inversores comerciais. A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático funcional de um inversor fotovoltaico conectado à rede (RAMPINELLI; KREZINGER, 2011); (PERIN, 2016).

2.2.2 Tensão em regime permanente

Na tensão permanente existem limites estabelecidos que classificam em adequados, precários e críticos. Para isso há indicativos individuais e coletivos de conformidade, descrição de medição. É importante que a tensão permanente seja monitorada nos sistemas

de distribuição para que haja atuação preventiva a fim de manter a normalidade (NETO; MADRUGA; GEREMIAS, 2016). Além disso, quando se trata de conformidade de tensão elétrica é feito uma comparação do valor de tensão da medição e os níveis de tensão estabelecidos. Para isso devem ser considerados dois tipos de medição, como a eventual que é quando há reclamação ou determinação de fiscalização; a amostral que é quando é determinado por sorteio e ininterrupta devido a resolução normativa (NETO; MADRUGA; GEREMIAS, 2016). Considerando isso, a medição deve ser realizada em três locais específicos, sendo eles: conexão à Rede de Distribuição, conexão entre distribuidoras e na conexão com as unidades consumidoras. Além disso, devem ser captados os valores de tensão e comparados à tensão de referência, nominal ou a contratada, conforme valor. Quando se trata de valores nominais, estes devem ser fixados de acordo com os níveis de planejamento do sistema de distribuição. Já a contratada, os procedimentos devem obedecer às normas da Rede (NETO; MADRUGA; GEREMIAS, 2016).

2.2.3 Harmônicas

Harmônicas são componentes sinusoidais de uma tensão ou corrente alternada com frequência igual ou múltipla inteira da frequência do sistema, no caso brasileiro, 60 Hz, sendo que a ordem da harmônica é contabilizada pelo número de vezes que a frequência da mesma é múltipla da fundamental (PUFAL, 2012) (RAMPINELLI; KRENZINGER, 2011);(RAMPINELLI; DIAS; KRENZINGER, 2011). O aparecimento das harmônicas é avaliado pela THD (Distorção Harmônica Total, do inglês Total Harmonic Distortion), que surgiu devido a necessidade de quantificar as harmônicas presentes no sistema. A THD pode ser definida como o quociente entre o valor eficaz do conjunto das harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental. Entretanto, quando forem ondas sinusoidais puras, a THD é igual a zero. A THD de tensão (THD_v) pode ser representada pela Equação 1. O mesmo se repete para a THD de corrente (THD_i), Equação 2, onde V_{1ef} e I_{1ef} são, respectivamente, a tensão e a corrente eficaz na frequência fundamental, sendo que a variação do número representa a ordem da harmônica (NASCIMENTO, 2013) (RAMPINELLI; DIAS; KRENZINGER, 2011).

$$TDH_v = \frac{\sqrt{V_{2ef}^2 + V_{3ef}^2 + V_{4ef}^2 + \dots}}{V_{1ef}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$TDH_i = \frac{\sqrt{I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + I_{4ef}^2 + \dots}}{I_{1ef}} \times 100\% \quad (2.2)$$

A NBR 16149/2013 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e o Instituto de Eletrônica de Potência disponibilizam uma tabela com os limites máximos de distorção harmônica de corrente por componente IHD_i (Distorção Harmônica Individual, do inglês Individual Harmonic Distortion). A Tabela 1 mostra quais são os limites.

Tabela 1 – Limite de Distorção de Harmônica de Corrente

Harmônicas Ímpares	Limite de Distorção
3a9	< 4.0%
11a15	< 2.0%
17a21	< 1.5%
23a33	< 0.6%
< 35	< 0.3%
Harmônicas Pares	Limite de Distorção
2a8	< 1.0%
10a32	< 0.5%

Quando analisado o inversor, a soma de todas as componentes individuais de corrente (THDi) não devem ultrapassar 5%, e quando analisada a qualidade da energia elétrica da rede que atende determinada unidade prosumidora, a THDv deve ser no máximo de 5%, fornecendo um parâmetro adequado para garantir a eficiência do inversor. Além disso, a ABNT NBR 16150/2013 que especifica os procedimentos de ensaio dos equipamentos utilizados em SFCR, aponta que, para avaliar exclusivamente o comportamento da THDi produzida pelo inversor, a THDv da rede de distribuição deve ser menor que 2,5% garantindo que haja mínima ou nenhuma influência da THDv sobre a THDi. Existem três aspectos que são considerados gerais se tratando de harmônicas, são eles (SILVA, 2008):

- É um fenômeno de longa duração;
- Quanto maior a ordem da harmônica, menor sua intensidade;
- As harmônicas de ordem ímpar são mais frequentes, de maior intensidade, gerando mais problemas.

Pelo fato das componentes harmônicas de corrente de ordem ímpar serem mais comuns, principalmente em redes trifásicas, as concessionárias costumam supervisionar a 3^a, 5^a, 7^a, 9^a e 13^a, sendo que acima dessa componente, começam a se tornar desprezíveis (SILVA, 2008). Além do aspecto negativo que as componentes harmônicas causam na qualidade da energia elétrica, elas também podem reduzir a vida útil de transformadores e equipamentos elétricos, colaboram para o aumento da temperatura em máquinas rotativas e aumento no aquecimento de condutores, causam interferência eletromagnética em equipamentos de comunicação, entre outros malefícios (MARTINS; COUTO; AFONSO, 2003).

2.2.4 Fator de potência

A inserção de SFCR possibilita que uma determinada quantidade de energia reativa seja injetada na rede, entretanto, mesmo que a concessionária não seja autorizada a fazer

a cobrança dessa energia, existem limites que devem ser respeitados pelos fabricantes de inversores, garantindo uma energia elétrica de qualidade para o consumidor (RODRÍGUEZ; JANNUZZI, 2002).

De forma mais visual, as potências ativa, aparente e reativa podem ser representadas geometricamente através do triângulo de potências, como mostra a Figura 6. O ângulo formado entre a potência ativa e a aparente é chamado de ϕ (phi), e nada mais é que o ângulo de defasagem entre a onda de tensão e corrente para senoides puras. Logo, FP pode ser definido também como o cosseno da defasagem entre a tensão e a corrente, representado na Equação 4 (RAMPINELLI; DIAS; KRENZINGER, 2011).

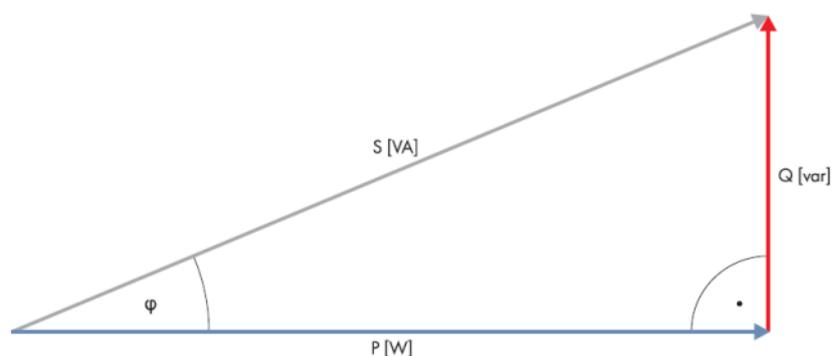


Figura 5 – Triângulo de potências (SMA).

$$FP = \cos\phi \quad (2.3)$$

A ABNT NBR 16149/2013, diz que quando for injetada potência ativa acima de 20% da capacidade nominal do inversor, esse deve ser capaz de ajustar o FP dentro de limites preestabelecidos, sendo que, em todos os casos o inversor deverá vir com FP igual a 1 direto de fábrica. Quando a potência do SFCR for igual ou menor que 3 kW, a faixa de tolerância é entre 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo, não possuindo faixa para ajuste. Se o sistema fotovoltaico apresentar potência entre 3 kW e 6 kW, o inversor deve possuir a mesma faixa de tolerância descrita anteriormente, porém, deve ser possível ajustá-lo, entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo, de acordo com a Figura 7, onde P representa a potência instantânea e Pnominal a potência nominal (SOUZA, 2014).

Ainda, de acordo com a ABNT NBR 16149/2013 e (SOUZA, 2014), SFCR acima de 6 kW deve operar com duas possibilidades:

1. FP igual a 1 ajustado de fábrica, podendo trabalhar na faixa de tolerância descrita no primeiro caso, visto que o inversor deve ter a opção de ajuste entre 0,90 indutivo e 0,90 capacitivo, levando em consideração a Figura 7; ou
2. Através do controle de potência reativa, conforme Figura 8.

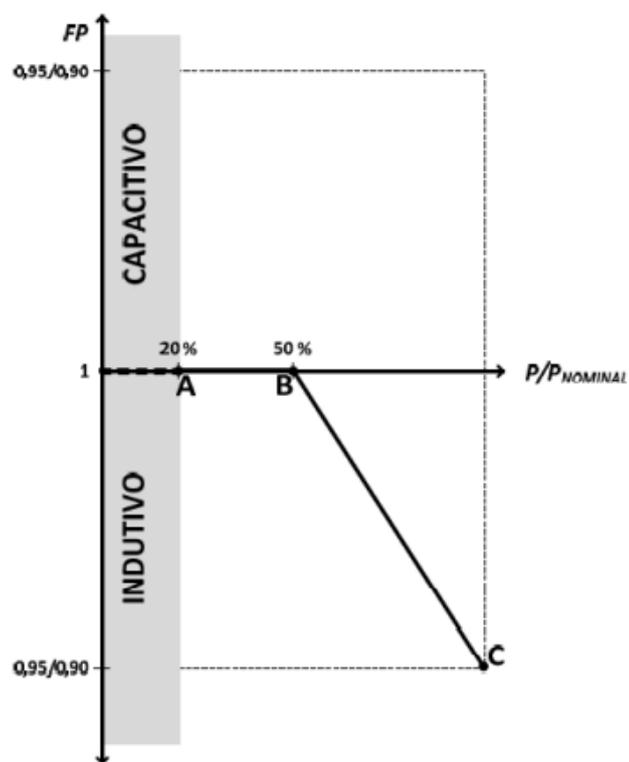


Figura 6 – Curva do FP em função da potência ativa de saída do inversor (SOUZA, 2014).

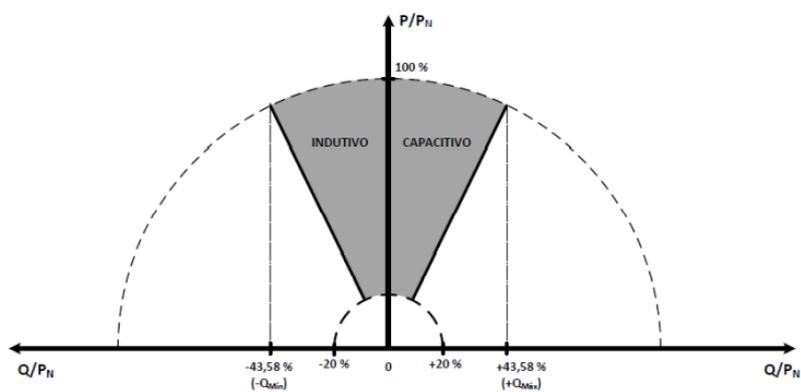


Figura 7 – Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência acima de 6 kW (SOUZA, 2014).

O baixo FP reflete na redução de potência ativa, aumentando a circulação de potência reativa na rede, causando perdas através dos condutores, interferência nas cargas, diminuição da eficiência, entre outros (SILVA, 2008). Entretanto, a potência reativa não apresenta só malefícios, ela é, na verdade, importante para manter a rede equilibrada. Ou seja, toda vez que um sistema fotovoltaico é conectado à rede elétrica de energia, ele provoca uma pequena elevação da tensão da mesma, portanto, se for levado em consideração os vários sistemas que se encontram nessa situação, a tendência é a tensão da rede extrapolar os limites máximos permitidos. Para isso, os inversores possuem um sistema de injeção de energia reativa na rede, composto por capacitores e/ou indutores que tem a função de reduzir a tensão, mantendo-a regulada dentro dos padrões

2.2.5 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. Podendo ter como causa: distribuição irregular por fase, transformadores trifásicos com diferenças magnéticas devido a construção e anomalias no sistema. Além disso, na parte industrial, uma das principais fontes de desequilíbrios é devido aos fornos elétricos trifásicos a arco, pois pode causar carregamentos entre as fases, tendo como consequência altas correntes desequilibradas (ROCHA, 2022).

2.2.6 Flutuação de tensão

Flutuação de tensão é um fenômeno de variação do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea, podendo ser a variação aleatória, repetitiva ou esporádica. A partir dessa afirmação conclui-se que cause uma oscilação variável na senóide de tensão, quando comparada com a forma de onda fundamental. No Brasil, esse parâmetro é normatizado pelo PRODIST módulo 8, o qual fornece a forma de medição da flutuação de tensão e também os parâmetros que devem ser medidos para realização do cálculo deste indicador. A principal causa das variações de tensão é a variação da corrente, causada por cargas pesadas e intermitentes, como exemplo um alto-forno.

Dentre os principais efeitos da flutuação de tensão, tem destaque a cintilação luminosa (Efeito Flicker), o qual caracteriza-se pela percepção pelo olho humano das variações do fluxo luminoso de uma lâmpada. Apesar de parecer um simples problema de conforto visual, porém já foi comprovado em pesquisas que o efeito pode atingir o sistema nervoso central do indivíduo afetado, causando disfunções neurológicas como cansaço visual, estresse mental, perda de concentração, incômodo visual, entre outros. Operacionalmente falando, o fenômeno pode dificultar a correta operação de contadores e relés, vindo prejudicar um processo industrial.

O ângulo da determinação da qualidade da tensão quanto à flutuação de tensão é a

avaliação do incômodo luminoso provocado no consumidor alimentado em baixa tensão. Para obtenção dos níveis de severidade de cintilação, associados à flutuação de tensão, o PRODIST módulo 8 adota os indicadores e procedimentos definidos pela IEC 61000 - 4 - 15 [16] -Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques –Flickermeter – Functional and design specifications provenientes da International Electrotechnical Commission (IEC). Estes indicadores são obtidos através da medição e processamento das tensões dos barramentos. A Tabela 8 sintetiza a terminologia aplicada à formulação de cálculo do Efeito Flicker.

Tabela 2 – Terminologia

Identificação da grandeza	Símbolo
Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração(período de 10min)	Pst
Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração(período contínuo de 2h)	Plt
Valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras	Pst95%

Segundo o PRODIST, a Pst representa o grau de severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão, observada em um período ininterrupto de 10 minutos. A edição 2017 do PRODIST mantém a definição de Plt, porém não estabelece valores/limites para tal. Paracálculo do Pst, segue equação 2.4.

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}}. \quad (2.4)$$

Onde: P_i ($i = 0.1; 1; 3; 10; 50$ corresponde ao nível de flutuação de tensão, ou sensação de cintilamento, que foi ultrapassado durante $i\%$ do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o estabelecido pela IEC 61000-4-15 [16], Flickmeter - Functional and Design Specifications. A função de distribuição está exposta na Figura 10.

O PRODIST – Módulo 8, é responsável por regulamentar os limites a serem utilizados para avaliação do desempenho do sistema de distribuição, quanto às flutuações de tensão. A tabela 3 ilustra esses limites.

Tabela 3 – Limites para flutuação de tensão.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1kV$	$1kV < V_n < 69kV$	$69kV < V_n < 230kV$
Pst95%	1,0pu	1,5pu	2,0pu

Existem medidas de engenharia capazes de atenuar os níveis de flutuação de tensão em uma instalação. Uma delas consiste no aumento da potência de curto-circuito do sistema, o qual é responsável por limitar as amplitudes das flutuações de tensão. Esse aumento é obtido através do aumento na potência do transformador que alimenta a carga flutuante. Outra solução possível para atenuar o problema é a redução nos índices de

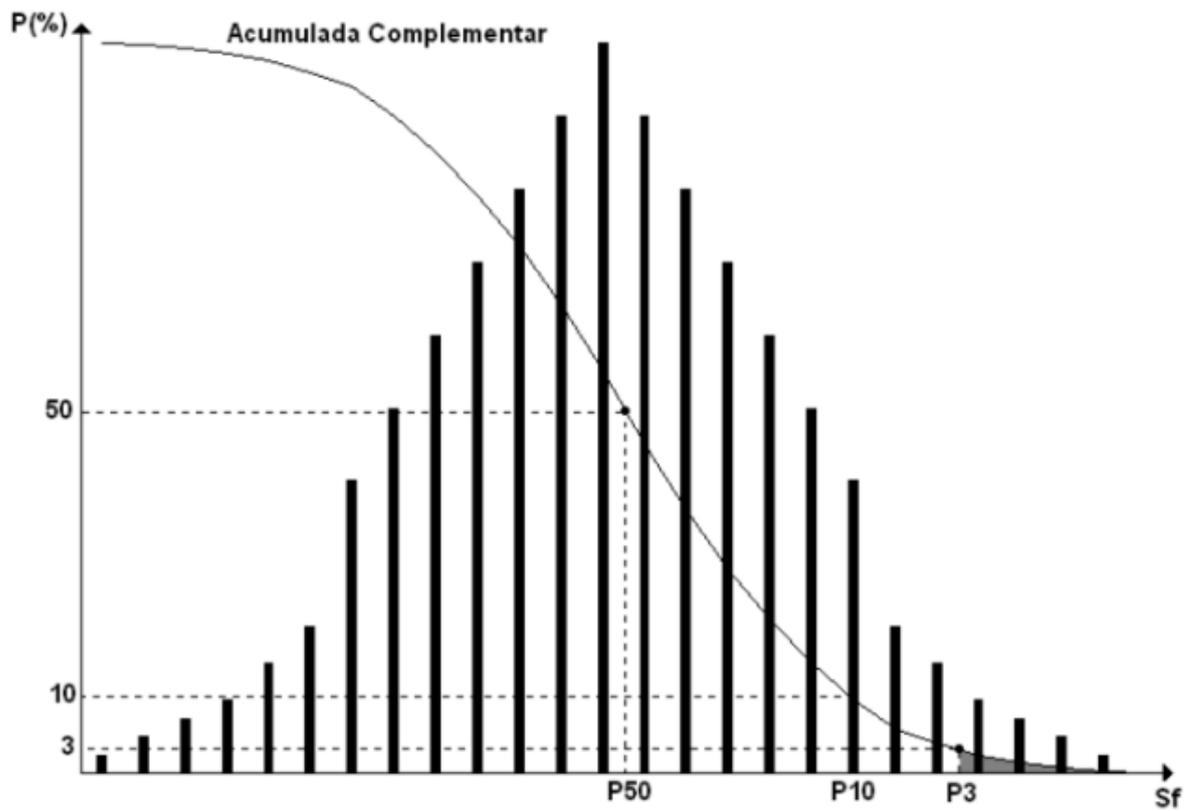


Figura 8 – Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação.

energia reativa no sistema de alimentação, o qual pode ser feito utilizando compensadores dinâmicos.

Como as análises serão feitas a partir das leituras coletadas pelo Analisador de Energia, dispensa-se o uso do equacionamento apresentado acima. Isso se dá pelo fato de o equipamento ser capaz de fornecer a leitura direta dos índices de P_{st} .

3 Materiais e Métodos

Neste trabalho foram analisados o desempenho de dois SFCR distintos, com potências e inversores e módulos de diferentes fabricantes. Os sistemas fotovoltaicos de geração distribuída estão instalados em unidades prosumidoras residenciais localizados em Viçosa e Cajuri. Portanto, para tornar mais claro o entendimento, os sistemas fotovoltaicos foram descritos separadamente.

3.1 Sistemas fotovoltaicos de referência

3.1.1 SFCR - Casa da Lavoura

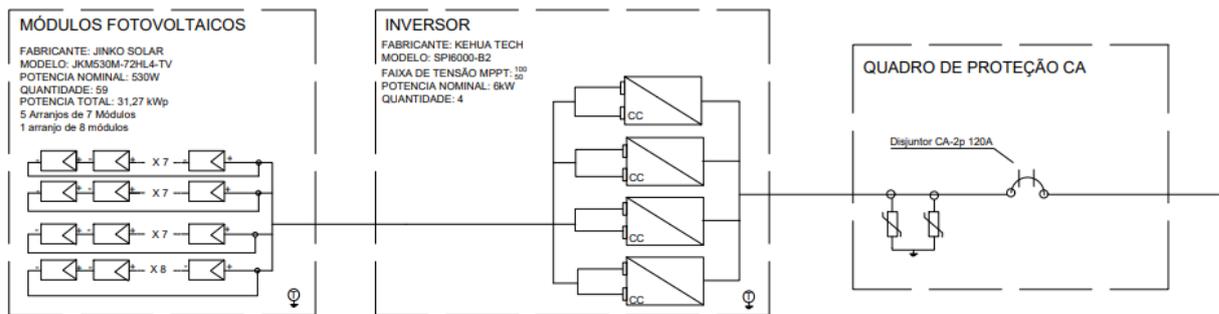


Figura 9 – Diagrama unifilar do Projeto Casa da lavoura.

A usina fotovoltaica localizada na cidade de Cajuri, mais precisamente na unidade consumidora pertencente a Comercio e Representações LTDA, conhecida na região como Casa da Lavoura, composta por 59 módulos fotovoltaicos da fabricante Jinko Solar de potencia de 530W cada, distribuídos em 4 inversores de 6kW, onde em 3 dos inversores foram instalados 2 strings, sendo uma com 7 módulos fotovoltaicos e a outra com 8 módulos e no quarto inversor foi instalado 2 strings de 7 módulos cada, sendo o inversor da fabricante Kehua Tech. As strings não foram conectadas em nenhuma stringbox, uma vez que, o inversor escolhido possui a proteção interna colocada pelo fabricante. O sistema fotovoltaico está conectado à rede da Energisa, e os dados foram coletados entre os dias 13 e 20 de maio de 2021.

3.1.2 SFCR - Sitio Santa Tereza

A usina fotovoltaica localizada na cidade de Viçosa, composta por 18 módulos fotovoltaicos da fabricante BYD de potencia de 400W cada, distribuídos em 1 inversor de

8kW, foram instalados 2 strings contendo 9 módulos fotovoltaicos cada, sendo o inversor da fabricante Saj. As strings foram conectadas em stringbox de duas entradas e duas saídas, uma vez que, o inversor escolhido não possui a proteção interna colocada pelo fabricante. O sistema fotovoltaico está conectado à rede da Cemig, e os dados foram coletados entre os dias 23 e 30 de maio de 2021. Conforme o esquemático da figura 10:

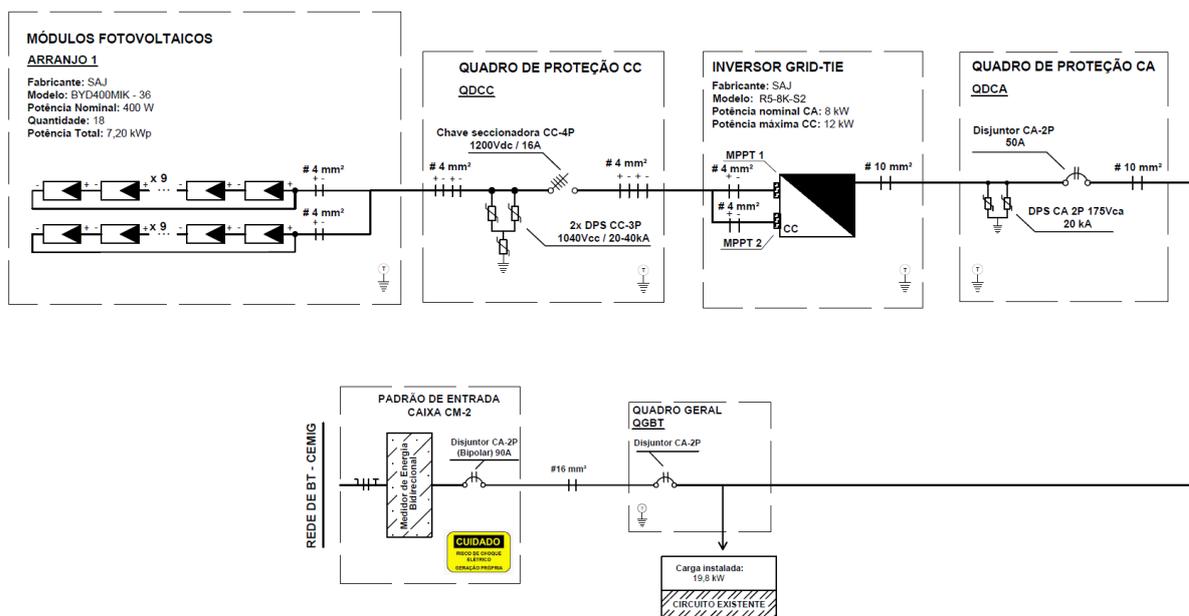


Figura 10 – Diagrama unifilar do projeto Sítio Santa Tereza.

3.2 Coleta de dados

Para realizar a coleta de dados foi utilizado o analisador de qualidade de energia elétrica do fabricante PRIMATA, modelo P-55, 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 5 minutos. A Figura 12 mostra a montagem realizada.

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 do sítio Santa Tereza foram iniciadas às 10h:05min:58s da manhã do dia 8 de junho e permaneceram até o dia 16 de junho para atender ao intervalo de 1008 leituras válidas exigidas. As medições da Casa da Lavoura foram iniciadas às 10h:05min:58s da manhã do dia 13 de maio e permaneceram até o dia 20 de maio para atender ao intervalo de 1008 leituras válidas exigidas.

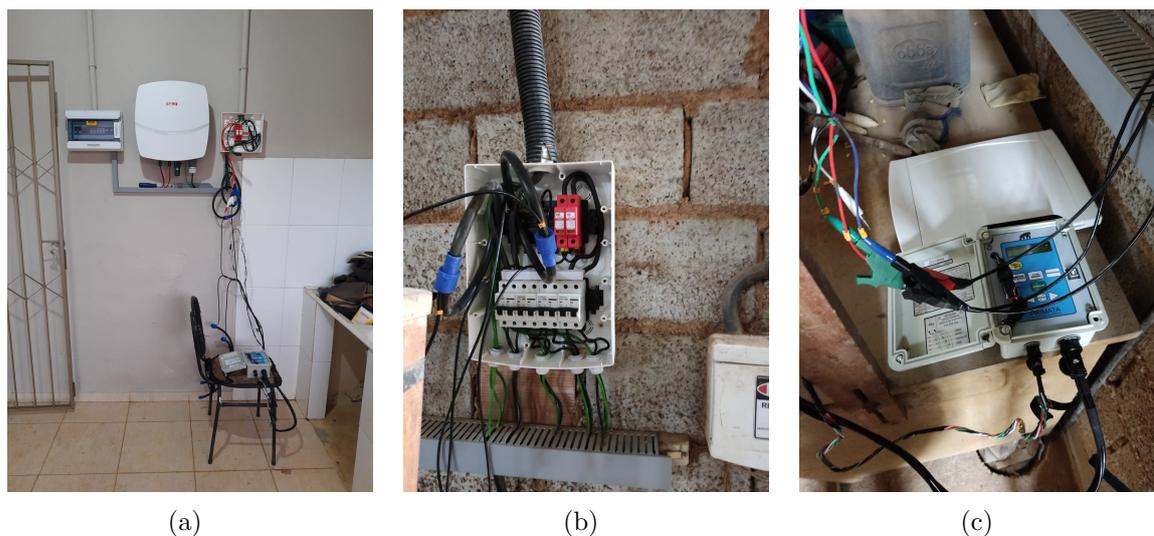


Figura 11 – a) Montagem realizada no Sítio Santa Tereza; b) e c) Montagem realizada na Casa da Lavoura.

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 com a utilização da linguagem de programação *Python*.

4 Resultados e Discussões

A seguir são apresentados os resultados das medições de diversos parâmetros de qualidade da energia elétrica realizadas nos sistemas fotovoltaicos de geração distribuída, juntamente com a análise e discussão dos mesmos.

4.1 Tensão em regime permanente

Para realizar as análises de tensão adequadas e suas variações ao longo do tempo, foi definido o valor de referência da tensão do sistema em ambas as instalações, como mostrado na Tabela 4. Para isso, foram utilizadas as normativas de cada concessionária para identificar qual é a tensão contratada pelo cliente, de acordo com as características da instalação, ou seja, qual a tensão que deveria ser fornecida pela concessionária e quais são suas possíveis variações. Em seguida, foram plotados gráficos de tensões instantâneas de fase AN e de linha AB para visualizar as variações medidas em cada um dos casos estudados, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13, que mostram as tensões medidas na Casa da Lavoura.

Tabela 4 – Valores de Tensão de Referência

Projeto	Sítio Santa Tereza	Casa da Lavoura
Tensão de Referência (V)	120/240	115/230

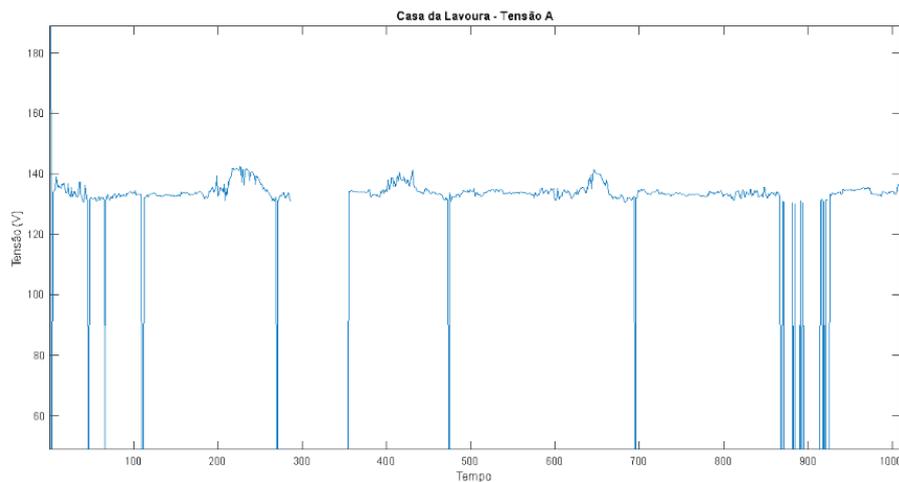


Figura 12 – Histórico da tensão AN instantânea no decorrer do tempo.

Analisando o gráfico da casa da lavoura é possível observar grandes variações na amplitude das tensões e pontos de queda de energia. Dessa forma foi possível calcular os indicadores individuais de tensão em regime permanente DRP (Duração Relativa da

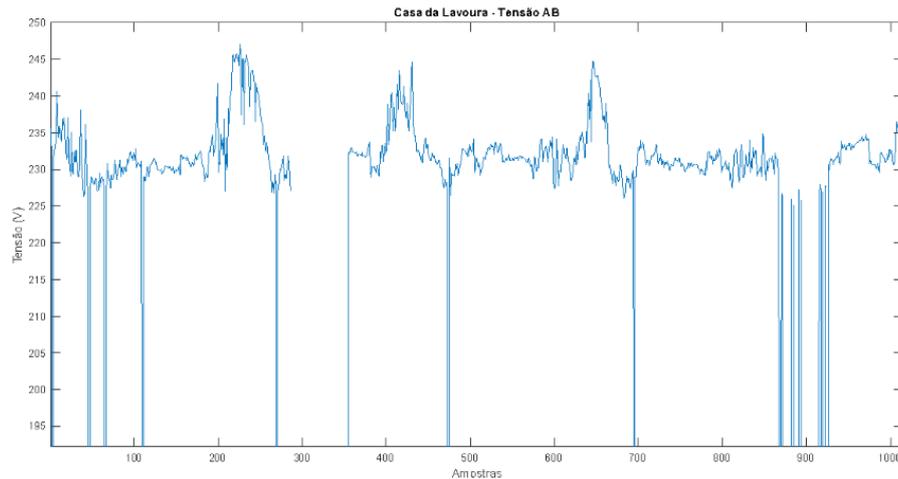


Figura 13 – Histórico da tensão AB instantânea no decorrer do tempo.

Transgressão de Tensão Precária) e a DRC (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica). Foram encontrados valores de indicadores para a Casa da Lavoura, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5 – Indicadores de variação de tensão no tempo da casa da lavoura

CASA DA LAVOURA		
	Tensão AN	Tensão AB
DRP	0%	1,5873%
DRC	100%	14,2857%

De forma semelhante foi feito com os dados do Sítio Santa Tereza, ou seja, primeiramente foram realizados plotagens dos gráficos de tensão e calculados os valores dos indicadores DRP e DRC, conforme ilustram as Figuras 15,16 e a Tabela 6.

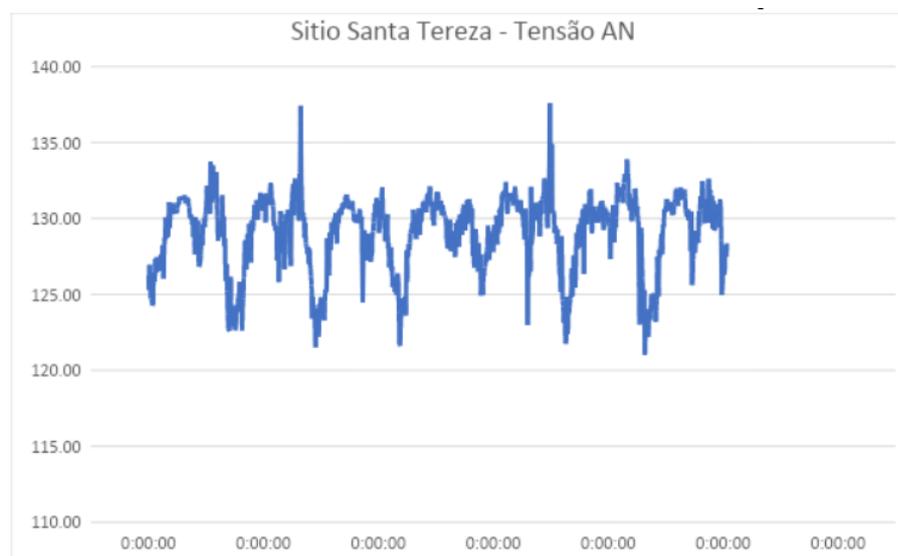


Figura 14 – Histórico da tensão A instantânea no decorrer do tempo.



Figura 15 – Histórico da tensão AB instantânea no decorrer do tempo.

Tabela 6 – Indicadores de variação de tensão no tempo do sitio Santa Tereza

Sítio Santa Tereza			
	Tensão A	Tensão B	Tensão C
DRP	5,56%	6,05%	24,50%
DRC	80,36%	78,96%	0%

Uma vez que, segundo o item 28 do Módulo 8 do Prodist, os valores ideais para DRP e DRC são de 3% e 0,5% respectivamente, é possível inferir que ambas as instalações não se encontram em conformidade com as da normativa. Isto posto, seria realizado o cálculo de compensação pela não disponibilidade adequada de energia por parte das concessionárias. Entretanto, foi identificadas irregularidades nas instalações estudadas. Ambas não possuíam o fio do neutro devidamente conectado e aterrado conforme as normativas estabelecidas pelas concessionárias. Dado que, uma conexão adequada do condutor de neutro, é de fundamental importância para uma maior estabilidade nas tensões, principalmente se tratando de tensões de linha, que é observado com maiores variações nos casos estudados. Foram realizadas adequações dos ramais de entrada em ambas as instalações, com isso é esperado uma melhora em termos de variação de tensão. Caso o problema persista, poderá ser realizados novos testes, e será de responsabilidade da concessionária ressarcir ao consumidor um valor proporcional aos indicadores de variação de tensão, pela não disponibilidade adequada de energia.

4.2 Fator de Potência

O fator de potência (FP) também é influenciado pela relação da potência utilizada com a potência nominal do inversor. Se a potência reativa é constante em determinado

período, a potência aparente vai variar proporcionalmente com a potência ativa do sistema.

A Casa da Lavoura possui um sistema FV com um inversor sobredimensionado, que alcança potências relativas máximas de até 50% durante a medição. Ajustes entre os pontos medidos e a curva teórica permitem estimar que o fator de potência é unitário para níveis de carregamento próximos da potência nominal.

O sistema FV de Santa Tereza opera em potências relativas máximas de até 75% durante o período de medição, apresentando um fator de potência próximo a 1 nestes níveis de carregamento.

4.3 Componentes Harmônicas

Para ambos os sistemas fotovoltaicos, a quinta harmônica tem a maior distorção harmônica de corrente (IHDi), seguida pela segunda e terceira harmônicas. Esse comportamento está diretamente relacionado à topologia dos inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Isso reforça a relação entre a IHDi e a THDi com a utilização do inversor - quanto mais próximo do seu valor nominal de operação, menor será a interferência das componentes harmônicas na energia elétrica injetada à rede pelo inversor de frequência.

Com base nos dados obtidos das medições, foi possível comparar o Índice de Distorção Harmônica individual (IHDi) com os limites máximos permitidos pela ABNT NBR 16149/2013. No sistema fotovoltaico da Lavoura, a maior potência foi registrada em 14/05/2021, às 11:25 horas, utilizando 55% da potência nominal do inversor. Já no sistema FV do Sítio Santa Tereza, a potência máxima foi alcançada em 20/05/2021, às 13:45 horas, com 74% da potência nominal do inversor. É importante ressaltar que as medições foram realizadas no mês de maio, quando os níveis de irradiância solar são menores na região. Os níveis de carregamento dependem não apenas da irradiância solar, mas também do fator de dimensionamento do inversor.

Conforme a relação entre a potência instantânea e a potência nominal do inversor muda, a contribuição individual de cada harmônica também se altera. As Figuras 17 e 18 apresentam essa análise para as componentes harmônicas de 2 a 9 de cada sistema FV em função do carregamento do inversor.

Independentemente da relação de carregamento do inversor, a quinta harmônica é a que apresenta a maior IHDi em ambos os sistemas fotovoltaicos, seguida pela segunda e terceira. Esse comportamento está diretamente relacionado à topologia dos inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Mais uma vez, fica evidente que o IHDi, assim como a THDi, está relacionado com a utilização do inversor. Quanto mais próximo do valor nominal de operação, menor será a interferência das componentes harmônicas na energia elétrica injetada na rede pelo inversor de frequência.

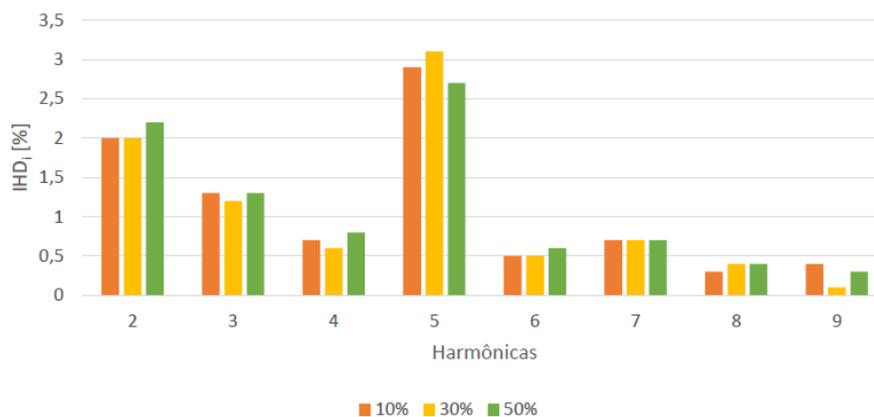


Figura 16 – IHDi em função do carregamento do inversor para o sistema FV do Sítio Santa Tereza.

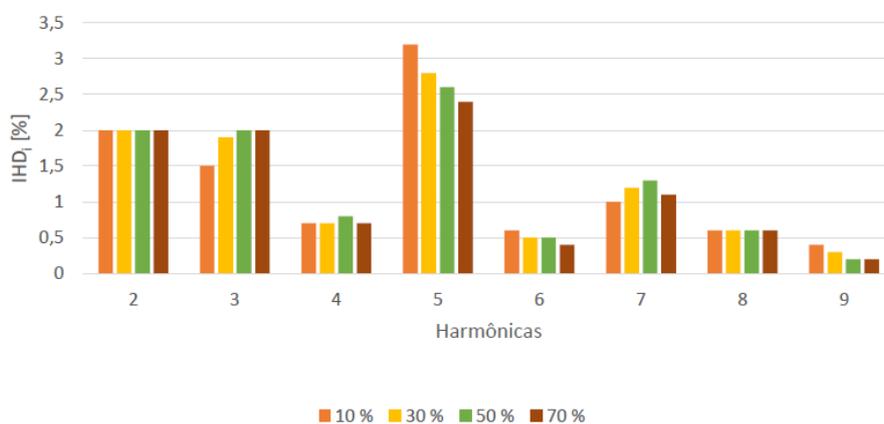


Figura 17 – IHDi em função do carregamento do inversor para o sistema FV da Casa da Lavoura.

4.4 Distorções harmônicas

Com base nos dados coletados, foi possível realizar diversas análises, incluindo a verificação do comportamento da THDv e THDi para ambos os sistemas fotovoltaicos. A Tabela 7 apresenta os valores médios de THDv e THDi para os sistemas fotovoltaicos da Casa da Lavoura e do Sítio Santa Tereza.

Tabela 7 – THDv e THDi do SFCR

	Casa da Lavoura	Desvio Padrão	Sítio Santa Tereza	Desvio Padrão
THDv [%]	5,5	0.8	5.7	0.75
THDi [%]	31,1	34.3	31.2	33.1

A THDv é uma característica que depende da soma e da influência das cargas elétricas conectadas à rede, enquanto a THDi da energia elétrica injetada pelo inversor na rede de distribuição e é dependente da THDv da rede e da carga ou potência relativa do inversor.

Os valores de THDv e THDi apresentados na Tabela 7 são médias aritméticas de todos os valores medidos pelo analisador de energia elétrica, levando em consideração diversas potências de carregamento do inversor em um período considerado.

O destaque principal da Tabela 7 é o desvio padrão correspondente à THDi, que pode chegar a cerca de 34,3% para a THDi da Casa da Lavoura e 33,1% para a THDi do Sítio de Santa tereza. Esse desvio acentuado acontece porque a THDi é um parâmetro percentual e, portanto, apresenta valores mais elevados em níveis de carregamento inferiores a 10-20%, podendo ultrapassar 50% em alguns pontos, uma vez que a corrente correspondente à frequência fundamental é baixa. A mesma analogia pode ser utilizada para a THDv, mas como esse parâmetro é influenciado pela rede de distribuição, tende a não apresentar muitas oscilações.

As Figuras 19, 20, 21 e 22 apresentam a THDv e THDi dos sistemas fotovoltaicos durante todo o período de geração analisado.

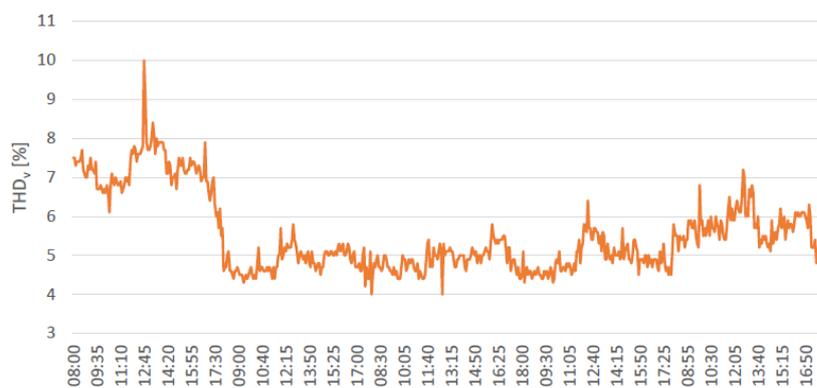


Figura 18 – THDv em função do tempo do sistema FV de Santa Tereza, durante uma semana.

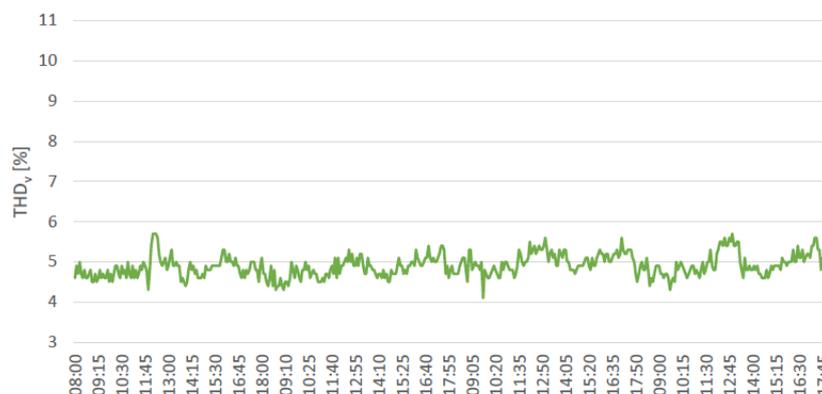


Figura 19 – THDv em função do tempo do sistema FV da casa da Lavoura.

É possível perceber que as Figuras de THDv segue à influência da rede de distribuição, que também mantém a tensão constante. Da mesma forma, as Figuras

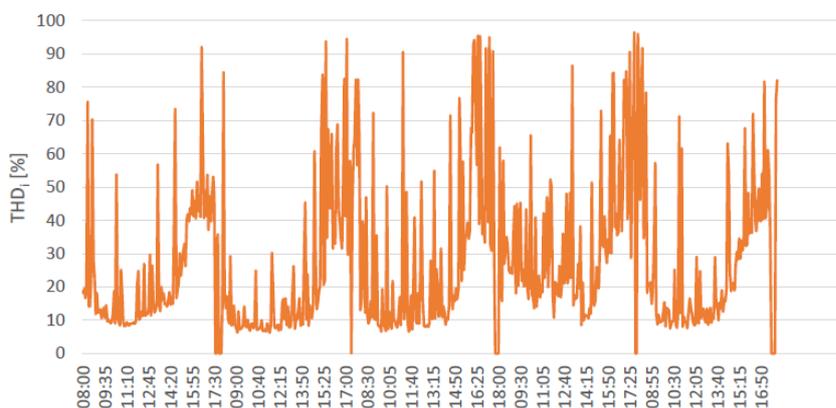


Figura 20 – THDi em função do tempo do sistema FV do Sítio Santa Tereza.

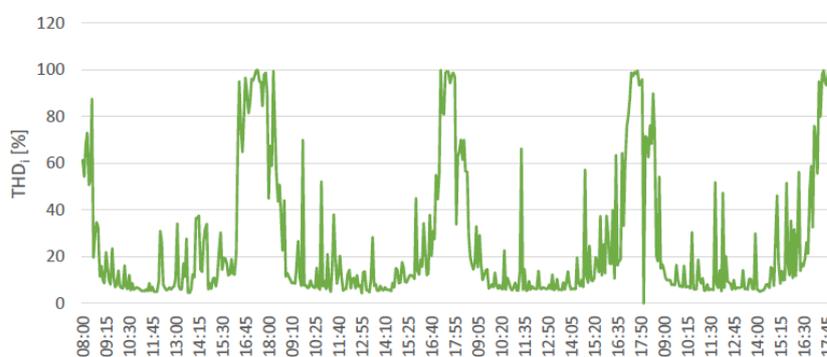


Figura 21 – THDi em função do tempo do sistema FV da Casa da Lavoura.

de THDi apresentam comportamentos semelhantes, com uma queda na porcentagem de THDi à medida que a potência ativa gerada se aproxima da potência nominal do inversor. Isso significa que, à medida que a geração FV diminui, a THDi tende a aumentar. Quando a THDi está elevada, a energia gerada é consumida pela unidade prosumidora, visto que o sistema FV primeiro supre a demanda da residência, injetando na rede apenas o excedente. Portanto, a energia elétrica que apresenta THDi acima de 10 - 15% não é injetada na rede.

As Figuras 23 e 24 apresentam a relação entre a THDi e a proximidade entre a potência ativa instantânea e a potência nominal do inversor, onde P_{rel} significa potência relativa. As medidas realizadas no sistema FV da Casa da Lavoura e no Sítio mostram que a THDi decresce proporcionalmente ao aumento da potência relativa. Em um sistema fotovoltaico, a corrente é diretamente proporcional à irradiância, e a potência do sistema FV aumenta proporcionalmente à corrente. Em potências relativas maiores, a distorção harmônica total de corrente tende a valores inferiores a 5%.

Outra forma de analisar a relação descrita anteriormente é verificar o comportamento da THDi em dias específicos. As Figuras 25 e 26 apresentam a variação da THDi em função da potência relativa ao longo do dia para os sistemas fotovoltaicos. Nessa análise, são considerados dois dias típicos: um dia predominantemente ensolarado e um dia parcialmente

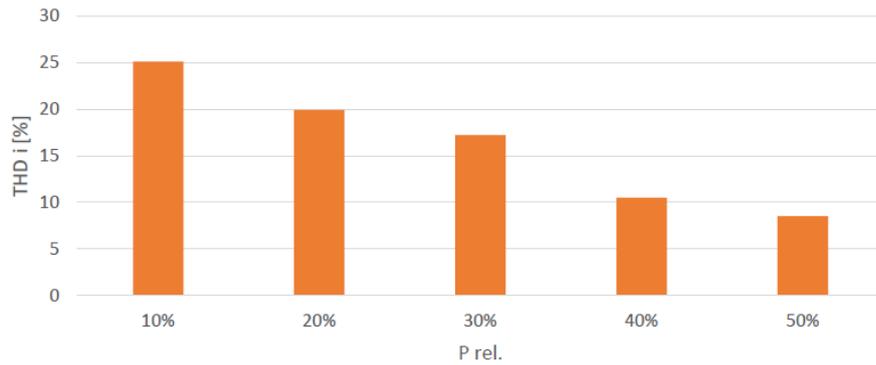


Figura 22 – THDi em função da potência relativa do sistema FV de Santa Tereza.

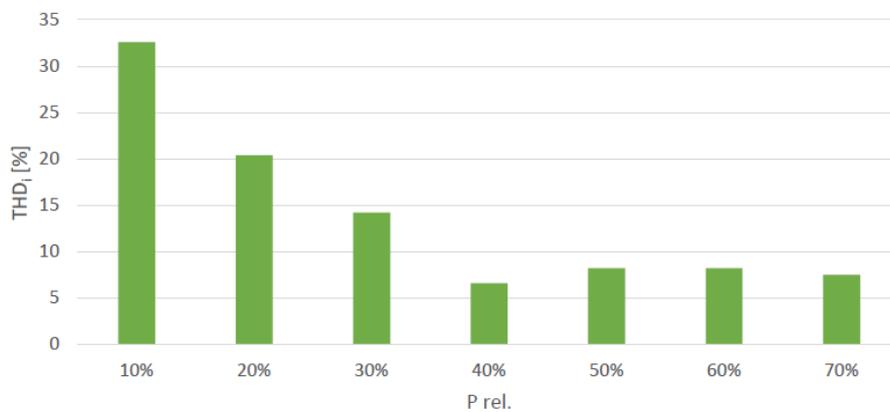


Figura 23 – THDi em função da potência relativa do sistema FV da Casa da Lavoura.

nublado.

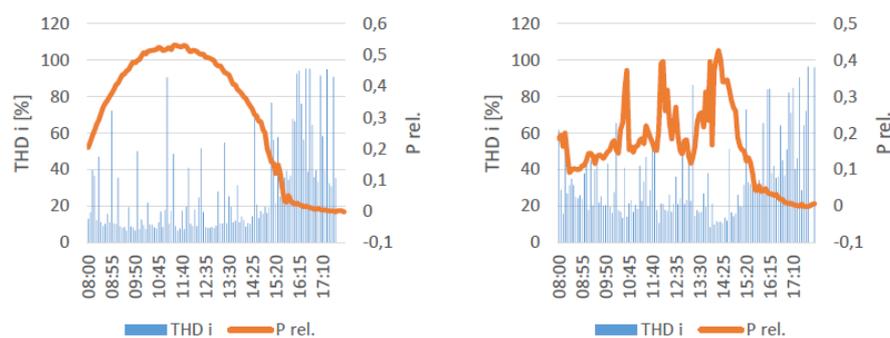


Figura 24 – THDi em função da potência relativa ao longo dos dias (a) 04/07/2021 (ensolarado) e (b) 05/07/2021 (nublado) para o sistema fotovoltaico de Santa Tereza.

Observa-se nos sistemas FV da Casa da Lavoura e do Sítio Santa Tereza que a THDi diminui à medida que a potência relativa aumenta, indicando uma forte relação entre a THDi e a irradiância solar e, conseqüentemente, com a potência instantânea do sistema FV.

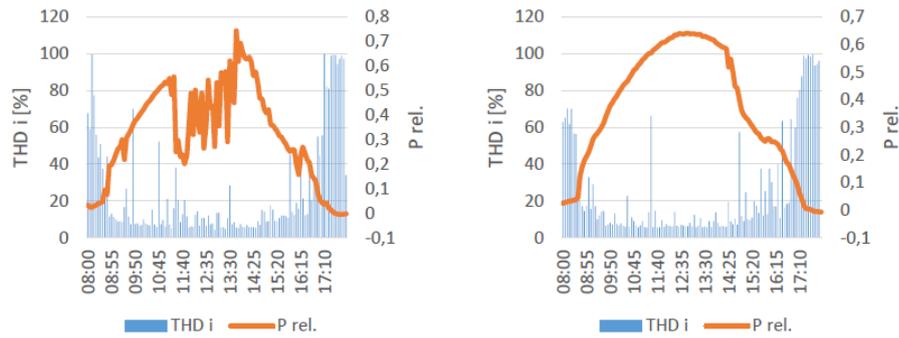


Figura 25 – THDi em função da potência relativa ao longo dos dias (a) 04/07/2021 (nublado) e (b) 05/07/2021 (ensolarado) para o sistema fotovoltaico da Casa da Lavoura.

Para extrapolar os valores da THDi para 100% de carregamento do inversor, foram traçadas curvas de ajuste às medidas. As Figuras 27 e 28 apresentam essas curvas, que permitem prever o valor da THDi caso a potência relativa atinja 1.

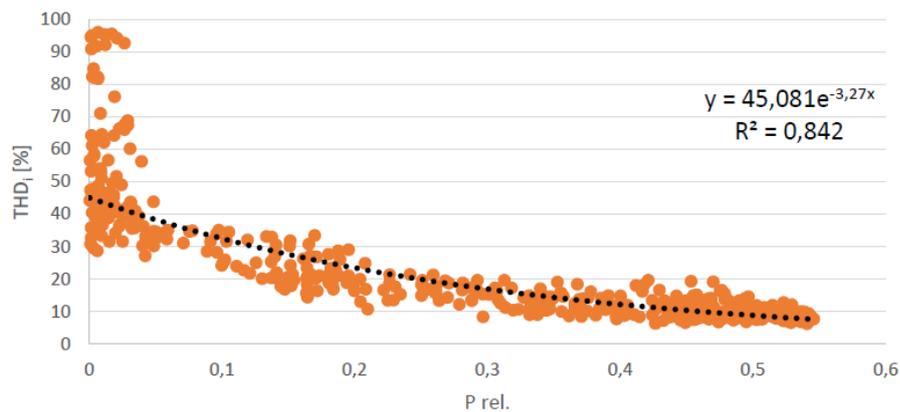


Figura 26 – Linha de tendência da THDi em função da potência relativa para o sistema FV do Sítio.

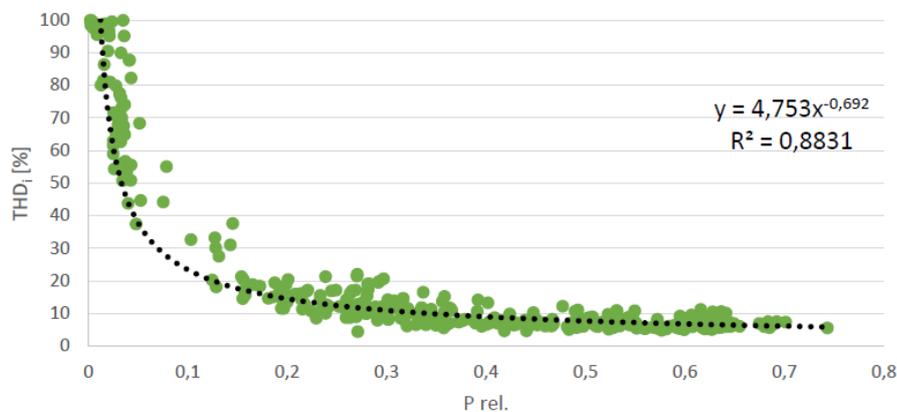


Figura 27 – Linha de tendência da THDi em função da potência relativa para o sistema FV da Casa da Lavoura.

Foram escolhidos dois modelos de curvas diferentes para otimizar o R^2 da função. A Tabela 8 apresenta alguns valores para ambos os modelos e sistemas FV. No sistema FV da Casa da Lavoura, a curva com exponencial de base resultou em uma THDi de 1,71%, enquanto para o sistema FV do Sítio Santa Tereza, a curva que obteve o melhor R^2 foi a com exponencial de base x, resultando em 4,75% de THDi.

Tabela 8 – Ajuste da curva de THDi dos sistemas FV

Casa da Lavoura	R^2	THDi [%]
Exponencial de base e	0.842	1.71
Exponencial de base x	0.775	8.61
Sítio Santa Tereza	R^2	THDv [%]
Exponencial de base e	0.758	1.24
Exponencial de base x	0.883	4.75

Seguindo as recomendações da ABNT NBR 16149/2013 e 16150/2013, a THDi deve apresentar valores abaixo de 5% para a medição realizada com 100% de carregamento do inversor. No entanto, a rede de distribuição que o inversor está conectado deve possuir THDv menor que 2,5% para que ocorra mínima ou nenhuma interferência desse parâmetro na análise da THDi. Isso não se aplica em ambos os sistemas FV conforme mostra a Tabela 7, mas como a THDi dessa extrapolação já se encontra abaixo do valor máximo permitido pela norma, caso a THDv diminua, a THDi também diminui, visto que são parâmetros dependentes.

Portanto, considerando que essas análises foram realizadas em sistemas FV em operação, sujeitos a diversos intempéries e com flutuação de variáveis, se ambos os SFCR estivessem operando em potência nominal, eles estariam fornecendo energia elétrica de qualidade dentro do que regem as normas.

4.5 Potência injetada na rede

Os dados de potência ativa, reativa e aparente injetados na rede pelos inversores foram medidos pelo analisador de energia elétrica ou de rede, possibilitando o acompanhamento do comportamento ao longo do tempo para os períodos considerados. As Figuras 29 e 30 mostram esses resultados para os sistemas fotovoltaicos da Casa da Lavoura e do Sítio Santa Tereza, respectivamente.

Ambos os gráficos apresentam curvas que crescem e depois decrescem ao longo do dia, com alguns pontos que apresentam altos e baixos em diversos horários do dia, caracterizando um dia de chuva ou muito nublado, onde a irradiância varia devido à presença das nuvens. Para o sistema fotovoltaico da Casa da Lavoura, o valor da potência reativa se mantém próximo a 250 Var capacitivo, enquanto para o sistema fotovoltaico do Sítio Santa Tereza, o valor é aproximadamente 150 Var indutivo.

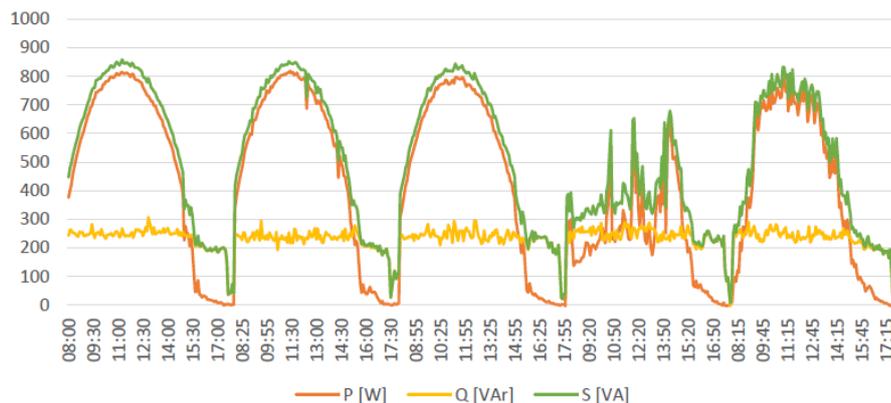


Figura 28 – Potências ativa, reativa e aparente em função do tempo para o Sítio.

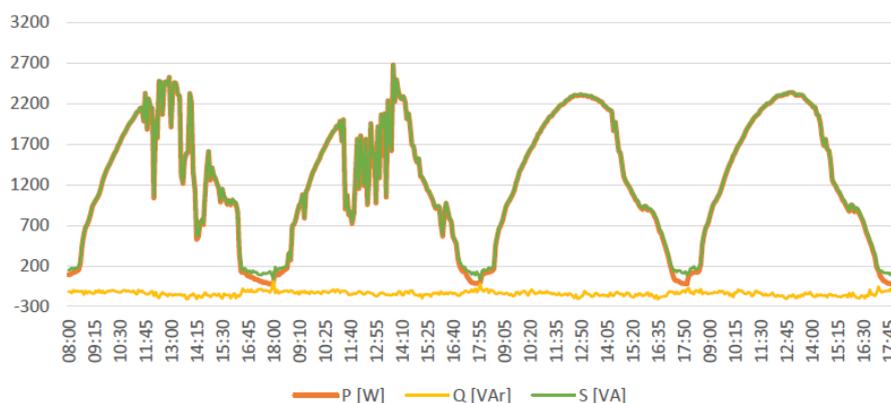


Figura 29 – Potências ativa, reativa e aparente em função do tempo para Casa da Lavoura.

Partindo dessa análise, várias discussões foram levantadas para entender principalmente o comportamento da potência reativa. Em ambos os casos, a função da potência reativa é nivelar a tensão da rede novamente para o padrão normal. A injeção de energia elétrica na rede a partir de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída contribui para aumentar os níveis de tensão da rede. Dessa forma, a injeção controlada de potência reativa contribui para reduzir os níveis de tensão da rede e estabilizá-la nos valores de referência.

Além disso, a injeção de potência reativa, indutiva ou capacitiva, é controlada a partir do fator de potência do inversor, que pode ser realizado através da parametrização do FP via software. Os valores de FP em função da potência relativa e da potência nominal são originalmente parametrizados pelo fabricante do inversor. A Figura 7 mostra como o FP do inversor pode se comportar em função do nível de carregamento, permitindo a injeção de potência reativa conforme a necessidade.

Espera-se que em um futuro próximo, as concessionárias possam controlar remotamente o valor e a natureza da potência reativa injetada na rede, fazendo os ajustes necessários para manter a estabilidade da rede em conformidade com os valores padrão e estabelecidos em normas técnicas.

O controle da potência reativa necessária para estabilizar a tensão da rede é realizado a partir de níveis de carregamento do inversor de 20%, através da parametrização do FP. Existem capacitores e/ou indutores dentro do sistema do inversor cuja função desses componentes é de operarem como filtros para as componentes harmônicas geradas pelo inversor. O que dita a potência reativa e ativa do sistema é o seu controle. Além disso, a SMA (A SMA Solar Technology AG é uma fornecedora alemã de equipamentos de energia solar) possui uma nota comentando sobre o fornecimento de potência reativa dos seus inversores durante a noite. Os inversores incluem capacitores e/ou indutores utilizados para fornecer essa demanda de reativo, inclusive durante a noite, não sendo mais necessário ter gastos adicionais com as plantas de compensação (SMA, 2013).

Procurando trazer essa informação para os sistemas analisados nesse TCC, gerou-se as Figuras 31 e 32, mostrando como se comporta apenas a potência reativa durante todo o período de coleta de dados e o que se pode observar é que, mesmo nas horas que não existe geração de energia elétrica pelos sistemas fotovoltaicos, existe fornecimento de potência reativa, onde inclusive o sistema FV do Sítio Santa Tereza torna-se capacitivo.

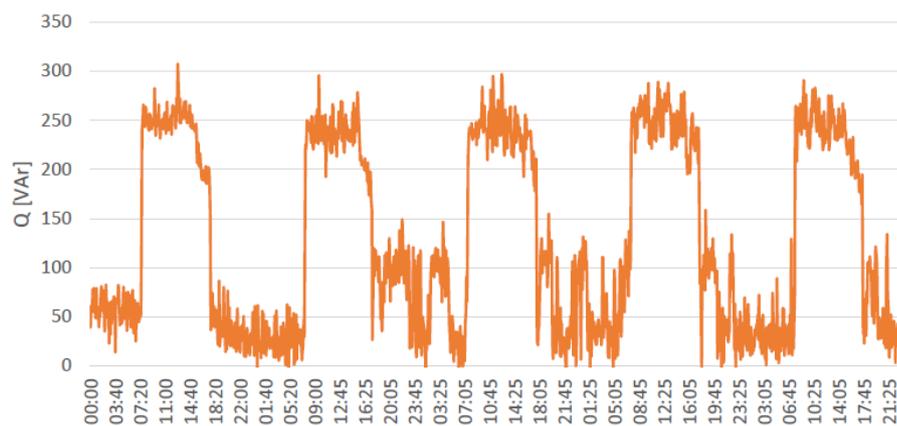


Figura 30 – Potência reativa em função do tempo para a Casa da Lavoura.

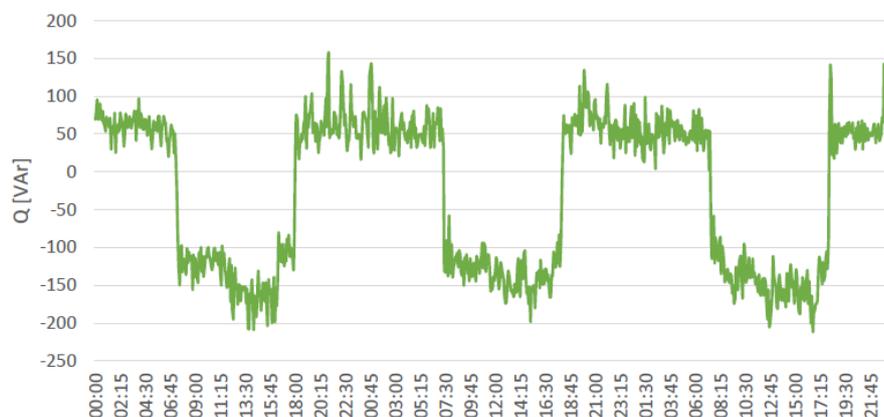


Figura 31 – Potência reativa em função do tempo para o Sítio Santa Tereza.

4.6 Perfil de consumo

O perfil de consumo das cargas foi analisado apenas para a unidade prossumidora residencial da Casa da Lavoura, buscando verificar o comportamento das potências ativa, reativa e aparente e também do FP. A Figura 32 mostra o comportamento dessas variáveis no dia 29/06/2021, um dia considerado normal e que o sistema FV estava em operação normal. Já a Figura 34 apresenta a disposição das variáveis no dia 30/06/2021 onde o sistema de geração de energia elétrica estava deliberadamente e intencionalmente desconectado da rede elétrica.

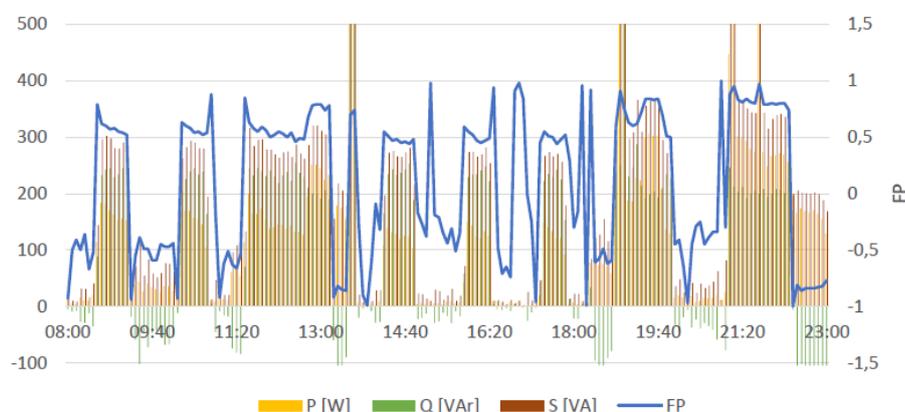


Figura 32 – Perfil de consumo das cargas para o dia 29/06/2021.

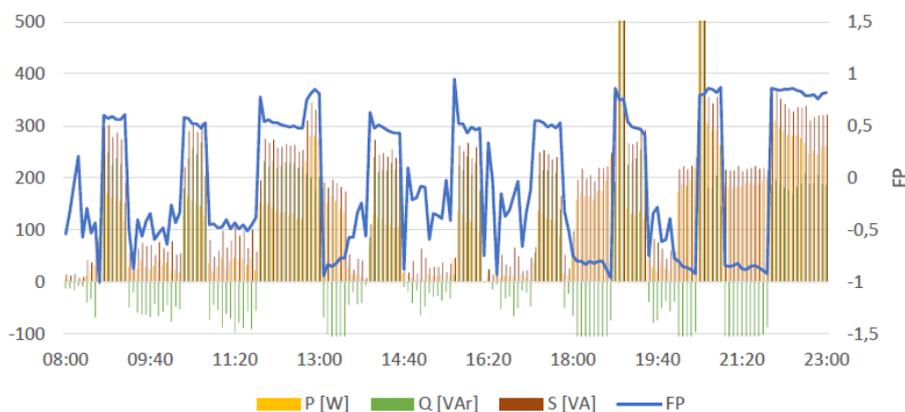


Figura 33 – Perfil de consumo das cargas para o dia 30/06/2021.

Os picos que os gráficos apresentam foram cortados para possibilitar uma melhor visualização das outras variáveis da Figura, entretanto, os valores se aproximavam de 5000 VA, devido a utilização do chuveiro. Já os picos regulares que variam entre 100 e 200 W caracteriza o ligar e desligar do compressor do refrigerador. E, como já era de se esperar, os valores se elevam no período noturno onde as residências apresentam maior demanda de energia elétrica. Comparando as Figuras com o intuito de analisar a influência do sistema de geração de energia nas cargas, não se obteve grande diferença, o que mostra que dessa

forma não é possível saber se a energia elétrica demandada pelas cargas foi consumida através do SFCR ou da rede de distribuição.

Como a potência ativa [W] é a principal unidade encontrada nos equipamentos das residências, as Figuras 35 e 36 mostram como ela varia ao longo dos dois dias analisados.

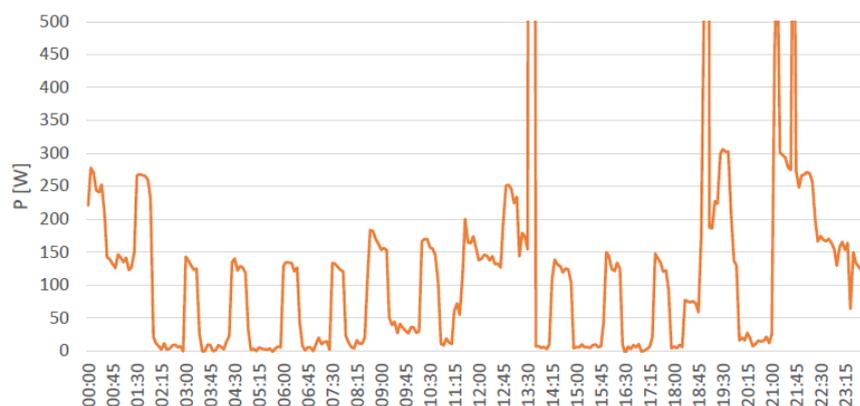


Figura 34 – Potência ativa consumida no dia 29/06/2021.

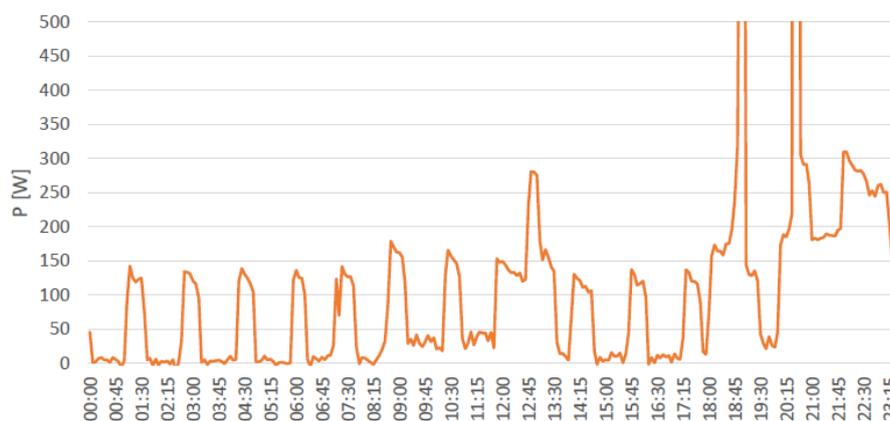


Figura 35 – Potência ativa consumida no dia 30/06/2021.

Através das Figuras é possível notar que a residência demanda uma quantidade de potência ativa que varia entre 100 e 400 W, exceto nos picos de utilização do chuveiro.

5 Considerações Finais

Este Trabalho de Conclusão de Curso analisou a qualidade da energia elétrica entregue por sistemas fotovoltaicos (SFCR) conectados à rede em duas unidades prossumidoras, sendo um deles na cidade de Cajuri e outro em Viçosa, MG. Para coletar dados, utilizou-se o analisador de qualidade da energia elétrica Primata modelo P-55, acoplado na saída do inversor. O analisador coletou dados de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente, componentes harmônicas e fator de potência em intervalos de 5 minutos.

Os resultados indicaram uma THDv de 5,5% com um desvio padrão menor que 1% para ambos os sistemas FV, demonstrando que as redes de distribuição não apresentam oscilações significativas. A THDi apresentou uma forte relação com a irradiância que incide sobre os módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, com o percentual de carregamento do inversor. A THDi cresceu em ambos os sistemas FV à medida que a potência relativa se afastava da potência nominal do inversor. Curvas de tendência foram ajustadas às medições para extrapolar os valores de THDi para o nível de 100% de carregamento do inversor, resultando em uma THDi menor que 5% nessa condição para os dois SFCR.

Em ambos os sistemas, a quinta harmônica apresentou índices mais elevados de IHDi, comportamento diretamente ligado à topologia do inversor. O fator de potência pode ser calculado pela razão entre potência aparente e potência ativa, de modo que qualquer variação em uma dessas variáveis influenciará o FP. Se houver variação na potência ativa, significa que o sistema FV está recebendo mais ou menos irradiação, e, portanto, a potência relativa também será alterada, de modo que o FP acompanha essas variações. À medida que a potência ativa se aproxima da potência nominal do inversor, o FP tende a permanecer mais próximo da unidade, comportamento comum para todas as topologias de inversores devido a essa relação de potências.

A variável que se destacou em todas as análises foi a potência reativa. Cada inversor tem sua particularidade, e somente com medições ou acesso ao software que realiza o controle do equipamento é possível saber ou modificar a natureza da potência reativa injetada na rede. Todos eles devem seguir e respeitar as normas técnicas para serem utilizados em SFCR. Além disso, há a necessidade de injeção de potência reativa na rede para controlar os níveis de tensão que variam devido à presença do sistema FV, e, para isso, os inversores possuem capacitores e/ou indutores que fornecem a quantidade de potência reativa que a rede de distribuição demanda, inclusive durante a noite, quando o sistema FV não está gerando energia elétrica, porém, se a potência reativa é constante naquele período, a potência aparente vai variar proporcionalmente com a potência ativa do sistema.

Em ambos os locais instalados é necessário a adequações dos ramais de entradas para coloca-los de acordo com as normativas das concessionarias, uma vez que, a conexão adequada do neutro e do aterramento impacta diretamente na qualidade da tensão entregue para o consumidor final.

Ambos os SFCR foram capazes de fornecer energia elétrica de qualidade, em conformidade com as normas, mesmo quando operando em sistemas FV sujeitos a diversas intempéries e flutuações de variáveis. Além disso, para avaliar a influência do SFCR nas cargas presentes apenas na Casa da Lavoura, foram realizadas medições de perfil de consumo. No entanto, os resultados indicaram que o sistema FV não exerceu influência sobre o consumo dessas cargas, já que o perfil permaneceu semelhante independentemente da geração de energia elétrica proveniente do sistema fotovoltaico. Não foi possível identificar se as cargas estavam consumindo energia elétrica da rede ou do sistema FV.

A utilização de SFCR tem crescido significativamente no Brasil, especialmente em unidades consumidoras residenciais, que adotam essa tecnologia para reduzir a fatura de energia elétrica ou para promover a sustentabilidade em suas residências. Nesse sentido, torna-se cada vez mais importante realizar estudos para entender o comportamento desses sistemas e seu impacto na rede de distribuição. Com o tempo, a presença de SFCR se tornará comum e as concessionárias de energia precisarão estar preparadas para lidar com essas mudanças.

Bibliografia

- ALENCAR, C. A. D.; JUNIO, J. Usinas solares fotovoltaicas no brasil: Panorama atual e perspectivas futuras. In: *12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Curitiba*. [S.l.: s.n.], 2016. 15
- ENERGÉTICA, E.-E. de P. et al. *Balanço Energético Nacional [Brazilian Energy Balance]*. 2022. 9, 15, 16
- GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia Sistemas Fotovoltaicos*. [S.l.]: livro, 2014. 18, 19
- GALHARDO, M. A. B.; PINHO, J. T. Avaliação da qualidade da energia fornecida por sistemas renováveis isolados de pequeno porte. *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, SciELO Brasil, 2004. 19
- JUNIOR, J. U.; RÜTHER, R. Qualidade de energia elétrica e o funcionamento de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2011. 20, 21
- KEREKES, T. et al. A new high-efficiency single-phase transformerless pv inverter topology. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 58, n. 1, p. 184–191, 2011. 21
- MARTINS, J. S.; COUTO, C.; AFONSO, J. L. Qualidade de energia eléctrica. 2003. 20, 23
- NASCIMENTO, M. A. P. d. *Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede eléctrica*. Tese (Doutorado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. 18, 19, 22
- NETO, G. Z.; COSTA, W. T. da; VASCONCELOS, V. B. A resolução normativa nº 482/2012 da aneel: Possibilidades e entraves para a microgeração distribuída. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2014. 15
- NETO, R. S.; MADRUGA, K. C. R.; GEREMIAS, R. A micro e minigeração de energia fotovoltaica distribuída como política pública para sustentabilidade. 2016. 15, 22
- PEREIRA, E. B. *Atlas brasileiro de energia solar*. [S.l.]: Inpe, 2006. 15
- PERIN, A. L. Análise da influência de diferentes estratégias de arrefecimento no desempenho e durabilidade de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2016. 9, 21
- PUFAL, R. A. Modelagem de cargas não lineares e rede de energia elétrica para simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2012. 21, 22
- RAMPINELLI, G. A.; DIAS, J. B.; KRENZINGER, A. Ensaio de inversores para conexão à rede: Fator de potência e distorção harmônica. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2011. 22, 24

- RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A. Estudo da qualidade da energia elétrica injetada à rede por inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos. *Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente*, v. 15, 2011. 21, 22
- ROCHA, M. A. Identificação e classificação de curto entre espiras e desbalanço de tensão em motores de indução trifásicos utilizando sensores de corrente, emissão acústica e vibração com emprego de transformada hilbert e transformada wavelet. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2022. 26
- RODRÍGUEZ, C. R. C.; JANNUZZI, G. Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. *Universidade Estadual de Campinas, Campinas*, v. 39, 2002. 19, 20, 21, 24
- SILVA, L. C. E. d. Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2008. 20, 23, 26
- SOUZA, A. C. d. et al. Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, 2016. 15, 18, 19
- SOUZA, M. E. M. de. Inserção de microgeração distribuída nas redes de baixa tensão: implantação de telhados solares-estudo de caso real. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 9, 18, 24, 25
- VIEIRA, D.; CASTRO, M. *Caderno Temático ANEEL-Micro e Mini Geração Distribuída*. [S.l.]: ANEEL, 2016. 9, 18, 19