

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELÉTRICA
JACKSON LUIZ VENANCIO DE SOUZA

ESTUDO QUANTO AO COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Varginha

2019

JACKSON LUIZ VENANCIO DE SOUZA

**ESTUDO QUANTO AO COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Professor Sílvio Guimarães Bottrel e Orientador Fagnielly Chagas de Oliveira.

**Varginha
2019**

JACKSON LUIZ VENANCIO DE SOUZA

**ESTUDO QUANTO AO COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Professor Sílvio Guimarães Bottrel e Orientador Fagnielly Chagas de Oliveira.

Aprovado em / /

Engenheiro Orientador: Fagnielly Chagas Oliveira

Prof. Sílvio Guimarães Bottrel

Prof. Rafael Kerner Coelho dos Santos

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e sorte. À minha família, pelos bons exemplos, cuidado, apoio e constante motivação. Aos mestres, em especial ao meu orientador, pelo alicerce acadêmico.

"A combinação adequada de políticas e tecnologias pode provar que a interligação entre crescimento econômico, demanda de energia e emissões de CO₂, relacionadas com a energia, pode ser reduzida". (WEO 2013).

RESUMO

A Geração Distribuída, proveniente de fonte alternativa, tem se tornando evidente no cenário mundial. Um exemplo são os módulos fotovoltaicos instalados sobre telhados de residências; que geram energia de uma fonte inesgotável e a disponibilizam no local de consumo. Nesse contexto, e amparadas por decretos federais e incentivos, como a Resolução Normativa nº 482/2012, avançaram em pesquisas e aplicações as fontes alternativas para geração de energia, a citar os Sistemas Fotovoltaicos, que apresentam um dos maiores índices de crescimento de conexões nos Sistemas de Distribuição de energia elétrica, estabelecendo a chamada Geração Distribuída, que consiste na produção descentralizada de energia, isto é, próxima ao ponto de entrega ou no próprio local de consumo da mesma. A conexão de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica da concessionária agrega benefícios e pode provocar impactos, tanto ao sistema de distribuição, como à concessionária e ao consumidor. Tais impactos podem afetar alguns parâmetros definidos para garantir a eficiência e o pleno funcionamento de processos como esse, descritos no módulo 8 do PRODIST, como a injeção de harmônicos na rede elétrica, o baixo fator de potência, flutuação dos valores de tensão, o ilhamento de sistemas e a reversão do fluxo de potência, riscos à instalação elétrica local devido ao dimensionamento e instalação incorreta dos componentes e equipamentos. A proposta deste estudo é de analisar os impactos provocados pela presença de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica para buscar minimizá-los, comparando os possíveis problemas encontrados nas aplicações aos valores ideais estabelecidos em normas e ensaios, visando promover o desenvolvimento sustentável e a expansão dessa tecnologia aos demais consumidores dos sistemas de distribuição.

Palavras-chave: Micro usinas, geração distribuída, sistemas fotovoltaicos, micro geração.

ABSTRACT

The distributed generation, from an alternative source, is becoming evident in the world scenario. One example is the photovoltaic modules installed on residential roofs, which generate energy from an inexhaustible source and inject the power in the point of energy consumption. In this context, and supported by federal decrees and incentives, such as Normative Resolution No. 482/2012, alternative sources for power generation have been advanced in research and applications, to mention Photovoltaic Systems, which present one of the highest growth rates of connections in Distribution Systems, establishing the so-called Distributed Generation, which consists of the decentralized production of energy, that is, near the point of delivery or in the place of consumption thereof. The connection of a photovoltaic system to the utility grid adds benefits and can cause impacts to the distribution system, the utility and the consumer. These impacts may affect some parameters defined to guarantee the efficiency and the full functioning of processes such as these described in module 8 of PRODIST, such as the injection of harmonics in the power grid, low power factor, fluctuation of values voltage, the islanding of systems and the reversal of the power flow, risks to the local electrical installation due to the incorrect design and installation of the components and equipment. The purpose of this study is to analyze the impacts caused by presence of photovoltaic systems in the electric grid to seek to minimize them, comparing the possible problems encountered in the applications to the ideal values established in norms and tests, aiming to promote the sustainable development and expansion of this technology to other consumers of distribution systems.

Keywords: *micro power plant, distributed generation, photovoltaic power systems, grid-connected.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Energética do Brasil em 2017 (%)	20
Figura 2: Matriz Energética Atual	23
Figura 3: Radiação Solar Global no Plano Horizontal Média Anual – Brasil.....	25
Figura 4: Conversão de Energia Fotovoltaica ²⁶	26
Figura 5: Exemplo de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede	27
Figura 6: Rastreamento de Máxima Potência.....	35
Figura 7: Sistema Fotovoltaico Real – Arranjo dos Módulos Solares	37
Figura 8: Sistema Fotovoltaico Real – Inversor de Frequência.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Brasil (MW)	21
Tabela 2: Unidades Consumidoras com Geração Distribuída.....	22
Tabela 4: Limites das Distorções Harmônicas Totais (%)	33

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1:Potência Gerada em CC Pelos Painéis Solares	38
Gráfico 2: Potência em CA na Saída do Inversor de Frequência	38
Gráfico 3: Temperatura do Inversor de Frequência.....	41
Gráfico 4: Tensão da Rede em Conjunto Com o SFV	42
Gráfico 5: Frequência da Rede em Conjunto Com o SFV	43
Gráfico 6: Comportamento Temporal da Distorção Harmônica Total de Tensão	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA (AC) – Corrente Alternada

CC (DC) – Corrente Contínua

DPS – Dispositivo de Proteção Contra Surtos

FV – Fotovoltaico

kWp – kilowatt-pico

MPPT – Maximum Power Point Tracking (Seguidor do Ponto de Potência Máxima - SPPM)

NBR – Norma Brasileira

NOCT – Temperatura Nominal na Célula nas Condições de Operação

SFV – Sistema Fotovoltaico

Wp – Watt-pico

SFVCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

UC – Unidade Consumidora

TE – Tarifa de Energia

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética

CGH – Centrais Geradoras Hidrelétricas

RN 482 – Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012

RN 687 – Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015

Si – Silício

W/m² – Densidade de potência, irradiância

Wh/m² – Densidade de energia, radiação

THD – Distorção Harmônica Total

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Justificativa	14
1.2. Problema	15
1.3. Objetivo Geral	15
1.4. Objetivos Específicos	16
1.5. Estrutura do Trabalho	16
2. METODOLOGIA DA PESQUISA	17
3. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	18
3.1. Matriz Energética Brasileira	19
4. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE	24
4.1. Estrutura e Funcionalidade dos Sistemas Fotovoltaicos	26
5. PARÂMETROS E INDICADORES EXISTENTES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA- NORMATIVAS NACIONAIS	29
5.1. Tensão em Regime Permanente	29
5.2. Fator de Potência	31
5.3 Distorção Harmônica	32
5.4 Variações de Frequência	33
5.5 Situações Adicionais	34
6. RESULTADOS E ANÁLISES	36
6.1. Análise das Medições Reais	36
6.1.1 Potência Gerada	38
6.1.2 Temperatura de Operação	40
6.1.3. Paralelismo da Tensão da Rede Com o Sistema Fotovoltaico	41
6.1.4. Frequência da Rede em Conjunto com o Sistema Fotovoltaico	42
6.1.5. Distorção Harmônica Total	43
7. CONCLUSÃO	46
BIBLIOGRAFIA	48

1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico exponencial e o aumento da demanda da população por energia elétrica, combinados a condições climáticas adversas, à necessidade da redução dos índices de poluição, à escassez de recursos naturais, como potencial hídrico e combustíveis fósseis, provocaram a necessidade de mudança no perfil de geração e consumo de energia da população, favorecendo o estudo e consequente implementação de fontes alternativas de energia, com a finalidade de manter a qualidade do fornecimento, de tornar a matriz energética mais flexível, visto que, analisando o cenário no Brasil, temos a maior parte da matriz energética nacional proveniente de usinas hidrelétricas. O advento da geração distribuída, impulsionada principalmente pelas fontes de energias renováveis, proporciona uma maior gama na disponibilidade de energia elétrica. Propicia, também, a redução das perdas, visto que a micro e minigeração são instaladas no próprio local de consumo. Isso também significa uma melhora no cenário do complexo energético nacional, tornando o país menos dependente às clássicas fontes hidroelétrica e termoelétrica, tornando o sistema mais robusto e menos dependente dos referidos insumos.

Devido a isso, novas tecnologias para geração de energia elétrica ganharam espaço e importância no sistema elétrico brasileiro, como a energia eólica, a biomassa, a energia solar fotovoltaica, dentre outras, que são utilizadas atualmente nos mais variados projetos e em diversas escalas, desde pequenas residências a grandes usinas. Esse novo cenário observado, denominado Geração Distribuída (GD), consiste na produção de energia elétrica a partir de fontes descentralizadas, isto é, em locais próximos ao ponto de entrega e utilização da mesma ou no próprio local de consumo.

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCCR) correspondem a uma das fontes alternativas aplicadas à GD com elevados índices de crescimento em aplicações, como residências, condomínios, escolas. Seu destaque recente no cenário energético foi possível e potencializado graças a investimentos Federais destinados a promover a regulamentação, a praticidade e a acessibilidade dessa tecnologia, como decretos, resoluções e incentivos fiscais, por exemplo, a Resolução Normativa (ANEEL, 2012) e sua atualização, a Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015. Esses fatores contribuíram para popularizar os sistemas fotovoltaicos (SFV), aumentando sua oferta e procura no mercado brasileiro, provocando uma redução nos custos de implementação dos projetos e ampliando o número de fabricantes e modelos de

equipamentos disponíveis no mercado nacional, bem como da entrada de novos dispositivos e tecnologias no mercado brasileiro.

O uso da tecnologia fotovoltaica traz consigo benefícios, como os baixos índices de poluição, visto que seu recurso energético é a luz solar, a proposta de descentralização da matriz energética convencional, tornando-a mais flexível, propiciando suprimento local para a demanda de energia, graças ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica, um sistema de créditos promulgado pela ANEEL através da Resolução Normativa nº 517/2012, estabelecendo que a energia ativa gerada em determinada unidade consumidora é injetada na rede e cedida à concessionária, sendo compensada através de créditos revertidos em consumo de energia ativa da concessionária a uma unidade consumidora de mesma titularidade da que cedeu energia (ANEEL, 2012).

Em contrapartida, a inserção dos SFV na rede elétrica pode provocar impactos de diversas naturezas e que podem, além de comprometer as condições da instalação, trazer prejuízos à concessionária, ao sistema de distribuição e ao próprio consumidor. Cita-se como exemplo, fatores de projeto e execução, como o dimensionamento incorreto de equipamentos, de condutores, a instalação dos painéis solares e demais dispositivos em locais impróprios, sem as devidas orientações e proteções necessárias; e fatores de natureza técnica, como as distorções harmônicas geradas na conversão de energia e a injeção dessas componentes na rede, o baixo fator de potência (FP) da planta, o ilhamento do sistema e a eventual reversão do fluxo de potência. Tais impactos podem afetar parâmetros regulatórios definidos para garantir a eficiência e o pleno funcionamento de processos como esse, descritos no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), e que podem trazer encargos ao consumidor e à concessionária, desde multas a riscos operacionais.

1.1. Justificativa

O aumento do uso da tecnologia fotovoltaica para geração distribuída de energia demanda análises e precauções a serem tomadas de modo que os impactos causados durante os processos de injeção e solicitação de potência da rede por esses sistemas sejam minimizados, de modo que sejam obtidos os valores aceitáveis dentro dos limites estabelecidos. Isso acarreta responsabilidades por parte dos agentes de distribuição, dos fabricantes de equipamentos e dos

próprios consumidores, em atender às diretrizes e exigências normativas, dos parâmetros técnicos e funcionais. A Resolução Normativa nº 482/2012, sua atualização, a RN 687, de 2015, estabelecem as condições gerais para acesso de micro e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. O PRODIST, especificamente o módulo nº 8, abrange os procedimentos e técnicas utilizadas para padronizar as atividades relacionadas à qualidade da energia elétrica e o correto funcionamento dos sistemas de distribuição. (ANEEL, 2012).

1.2. Problema

Os problemas apontados para os sistemas fotovoltaicos, decorrentes do mau dimensionamento e operação, a citar as distorções harmônicas, as variações na tensão e na frequência, a redução do fator de potência, podem afetar diretamente o funcionamento dos equipamentos e dispositivos e sistemas eletroeletrônicos mencionados, levando ao seu mau funcionamento e podendo até causar avarias e danos irreversíveis.

Em geral, seja em residências, empresas, hospitais, área rural, existem e aumentam rapidamente o número de equipamentos e sistemas automatizados, com componentes eletrônicos sensíveis à excitação de sinais elétricos, ao passo que cada vez mais nos vemos dependentes desses sistemas, como os equipamentos para exames de imagem em hospitais, os servidores e bancos de dados das empresas, os equipamentos eletroeletrônicos de uma residência, como computadores, televisores, sistemas de monitoramento e alarme, os sistemas de refrigeração de supermercados. A inserção de uma planta para microgeração distribuída no sistema elétrico de distribuição provoca impactos técnicos, os quais afetam a qualidade do fornecimento de energia e o próprio consumidor.

1.3. Objetivo Geral

Isso posto, tem-se como principal objetivo analisar os desdobramentos e impactos causados pela presença de sistemas solares fotovoltaicos no sistema elétrico de distribuição, ao avaliar indicadores, tais como: temperatura de operação, comportamento da tensão da rede, frequência, distorção harmônica, buscando mitigar tais impactos para promover o desenvolvimento sustentável e a expansão da tecnologia fotovoltaica no cenário nacional.

1.4. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, pretende-se:

- Apresentar os conceitos e definições relacionados à geração distribuída de energia elétrica em uma planta fotovoltaica através de parâmetros, normas, diretrizes, bem como seus benefícios, desdobramentos, cenário atual e perspectiva futura.
- Discutir a análise de resultados, os efeitos e consequências encontrados na instalação de plantas fotovoltaicas para microgeração distribuída, como regulações de tensão, gerenciamento e manutenção do fluxo de potência entre fonte e carga, perdas elétricas na geração, que dependem da correta instalação dos componentes do SFCR,ilhamento de plantas fotovoltaicas;
- Estudar as condições apresentadas a partir do referencial teórico com o uso de gráficos e tabelas obtidos através de ensaios, simulações e monitoramento de dados em uma aplicação real de um SFCR;
- Analisar os resultados obtidos na coleta de dados e apresentar soluções possíveis para solucionar os possíveis problemas, caso sejam encontrados.

1.5. Estrutura do Trabalho

O presente estudo está estruturado em quatro capítulos subdivididos em itens, além de ilustrações ao longo do corpo do trabalho que propiciem maior entendimento do tema proposto.

- Capítulo 1 – Contextualiza o leitor e é apresentado o objeto em estudo.
- Capítulo 2 – Alude à revisão da literatura com apontamento dos conceitos relevantes para o entendimento dos assuntos que são discutidos.
- Capítulo 3 – Menciona os procedimentos metodológicos utilizados para a construção deste trabalho.
- Capítulo 4 – Compreende a análise dos resultados, seguido das considerações finais do estudo.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

As atividades pertinentes ao desenvolvimento teórico do trabalho foram realizadas a partir da revisão das obras citadas no referencial bibliográfico do trabalho e de análise documentais, com buscas em livros físicos, livros eletrônicos, artigos científicos, material disponível nos sites de órgãos e empresas relevantes à área de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias em recursos renováveis, catálogos, folhas de dados (datasheets), normas e resoluções.

O método de pesquisa utilizado para realização do trabalho é de natureza exploratória, a partir de embasamento teórico sobre geração distribuída de energia elétrica e os impactos e adversidades observados de sua utilização em sistemas elétricos de distribuição, para identificação de possíveis problemas e proposta de redução, eliminação das condições indesejadas. As demais ações de análise e levantamento de dados e resultados são obtidas por meio de uma abordagem quantitativa, a partir de dados coletados em normas, estudos e em uma aplicação real; e de uma abordagem qualitativa, para analisar os dados obtidos e propor soluções para mitigar os possíveis impactos dos sistemas fotovoltaicos.

Por ser uma tecnologia recente no Brasil, é comum ocorrerem dúvidas em relação ao funcionamento geral de um sistema fotovoltaico, esta dúvida é recorrente e faz-se necessária esclarecer suas singularidades e diferenças básicas. Este capítulo contemplará conceitos, conteúdos, cálculos, simulações e análises que foram previamente estudados e pesquisados, desenvolvidos por profissionais das mais variadas áreas das ciências exatas, que foram pertinentes e contribuíram na construção do texto.

3. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Geração Distribuída é um termo utilizado para expressar o processo de geração de energia elétrica que é realizada de forma descentralizada, ou seja, próximo ou no próprio ponto de entrega da potência ao consumidor final. Um dos aspectos interessantes da conexão de plantas e equipamentos para GD nos sistemas elétricos de distribuição é que os mesmos apresentam potências cada vez menores, contribuindo para a diversificação dos geradores de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) e viabilizando o desenvolvimento deste trabalho. Os limites estabelecidos por norma para que uma planta seja considerada como integrante do sistema de GD é de potência instalada inferior a 75 kW para micro geração e entre 75 kW e 5 MW para a mini geração distribuída, exceção feita às PCH's (pequenas centrais hidrelétricas), cujo limite superior deve ser inferior a 3 MW, ao invés dos 5 MW para as demais alternativas para mini geração.

De acordo com registros históricos, dados do Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE) e da própria ANEEL, o cenário passou a ser favorável à implementação dos sistemas de geração distribuída de energia a partir da década de 1960, onde ocorreram as primeiras crises no preço do barril do petróleo, que fizeram surgir em meio à população a necessidade de mudança nos padrões de vida para um modelo de desenvolvimento sustentável, que aliasse o aproveitamento inteligente dos recursos naturais ao progresso social, econômico e tecnológico.

Tal necessidade direcionou os estudos e investimentos para as áreas tecnológicas que buscaram explorar e aprimorar os conhecimentos nas formas variadas de geração de energia. Os avanços ocorridos posteriormente nas áreas de tecnologia, engenharia, ciências, pesquisa e desenvolvimento, entre outras, contribuiriam para a afirmação desse processo de evolução, com o aperfeiçoamento de áreas como a eletrônica de potência, a eficiência energética e reaproveitamento de recursos, incorporados aos currículos das escolas de engenharia, visando formar profissionais capacitados a dar continuidade ao processo.

As recentes mudanças ocorridas no setor elétrico brasileiro, tanto no perfil de geração, como na ampliação de concorrência com a operação de novos fabricantes no mercado, a redução dos custos de instalação, operação e manutenção, dentre outros, ajudaram a popularizar essa modalidade de geração de energia no país. Antes disso, era usualmente empregada apenas em aplicações mais restritas e em menor escala, voltada à pesquisa. O panorama atual e a perspectiva futura dessa tecnologia destacam a ampliação e o aprimoramento do aparato

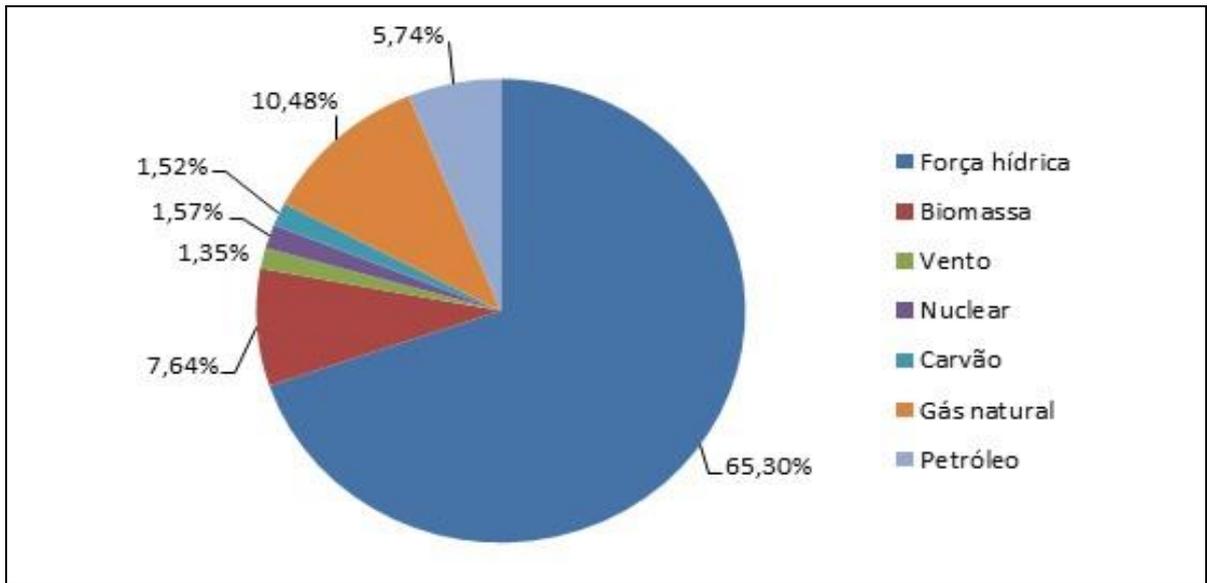
tecnológico que compõe os sistemas descentralizados para geração de energia elétrica, favorecendo a melhoria dos processos de conversão de energia e, por consequência, da eficiência energética e do controle isolado das plantas e equipamentos, desde o ganho em energia gerada bem como os seus processos de monitoramento e supervisão e controle.

3.1. Matriz Energética Brasileira

Vários são os exemplos de sistemas para geração distribuída presentes na matriz energética brasileira, a citar os co-geradores de energia, a biomassa, obtida através do reaproveitamento de resíduos combustíveis; os aerogeradores, os geradores de emergência, como em hospitais; os sistemas para operação em horário de ponta, utilizados para chaveamento e operação nos horários de ponta das tarifas de energia, frequentes em redes de supermercados, para alívio do valor final das tarifas e da demanda contratada junto à concessionária; as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), semelhantes às grandes usinas na constituição, como Itaipu, Belo Monte, entretanto com limites de operação e capacidade de geração inferiores, o que as beneficia devido à maior facilidade de implementação em áreas reduzidas; os Sistemas Fotovoltaicos e suas inúmeras aplicações.

Conforme observado na Figura (1), o perfil do sistema elétrico de distribuição no Brasil era de um sistema centralizado, onde a principal fonte de energia elétrica era aquela gerada pelas grandes usinas que usavam principalmente do recurso hídrico. O que tivemos de mudança neste panorama nos últimos anos e que é esperado para os seguintes é que o sistema se torne cada vez mais descentralizado e a matriz energética, cada vez mais flexível, onde várias plantas de escalas menores, que exigem custo de implementação, operação e manutenção relativamente menores, contribuirão para o fornecimento e suprimento da demanda de energia da população.

Figura 1: Matriz Energética do Brasil em 2017 (%)



Fonte: Absolar (2017)

A Tabela (1) apresenta um resumo do panorama nacional quanto à geração de energia elétrica. Nela são apresentados os dados registrados ao longo dos últimos anos, de 2011 a 2015, onde é possível observar o crescimento da capacidade instalada de geração elétrica das fontes constituintes da matriz nacional. Um dado interessante a se destacar é o crescimento percentual ($\Delta\%$) elevado apresentado pelas fontes alternativas e descentralizadas de geração de energia, a citar as usinas eólicas, as centrais geradoras hidrelétricas (CGH) e as usinas solares.

Tabela 1: Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Brasil (MW)

	2011	2012	2013	2014	2015	▲ % (2015/2014)	Part. % (2015)
Total	117.136	120.974	126.743	133.913	140.272	4,7	100
Usinas	78.347	79.956	81.132	84.095	86.002	2,3	61,3
Hidrelétricas							
Usinas	31.243	32.778	36.528	37.827	39.393	4,1	28,1
Termelétricas							
PCH	3.896	4.101	4.620	4.790	4.840	1,0	3,5
CGH	216	236	266	308	395	28,3	0,3
Usinas	2.007	2.007	1.990	1.990	1.990	0,0	1,4
Nucleares							
Usinas	1.426	1.894	2.202	4.888	7.630	56,1	5,4
Eólicas							
Solar	1	2	5	15	21	40,0	0,0

Fonte: Adaptado de Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2011)

Constata-se, a partir da análise do gráfico e da Tabela (1), que o Brasil se encontra em situação de progresso na utilização de tecnologias alternativas para geração de energia, visto que a matriz energética já apresenta percentual, mesmo que pequeno, da presença desses sistemas, além de oferecer um cenário de otimismo, devido ao crescimento percentual observado para as fontes renováveis. Entretanto, há de se considerar uma demanda também crescente de estudos e aprimoramentos para tratar os casos, desde concepção, projeto, e possíveis falhas. A Resolução 482/2012 permitiu diversos benefícios aos proprietários de sistemas de geração de energia elétrica renovável, dentre as quais podemos destacar a geração eólica e a solar fotovoltaica. Com a aplicação de políticas públicas adequadas e incentivos, a geração distribuída tende a se elevar exponencialmente até 2024. A Tabela (2) e a figura (2) apresentam dados fornecidos pela ANEEL relativos ao número de unidades consumidoras que possuem sistemas de geração distribuída de energia elétrica e sobre a matriz energética nacional

como um todo, com capacidade instalada e percentual de contribuição com o total.

Tabela 2: Unidades Consumidoras com Geração Distribuída

UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA			
Tipo	Quantidade	Quantidade UCs que recebem os créditos	Potência instalada (KW)
CGH	61	7.422	55.719,00
EOL	57	100	10.314,40
UFV	45.810	55.878	463.734,88
UTE	122	513	35.300,12
Total de usinas: 46,050. Total de UCs que recebem os créditos: 63.913 unidades. Potência total: 565.068,48 KW			

Fonte: Adaptado de (Aneel 2018).

Figura 2: Matriz Energética Atual

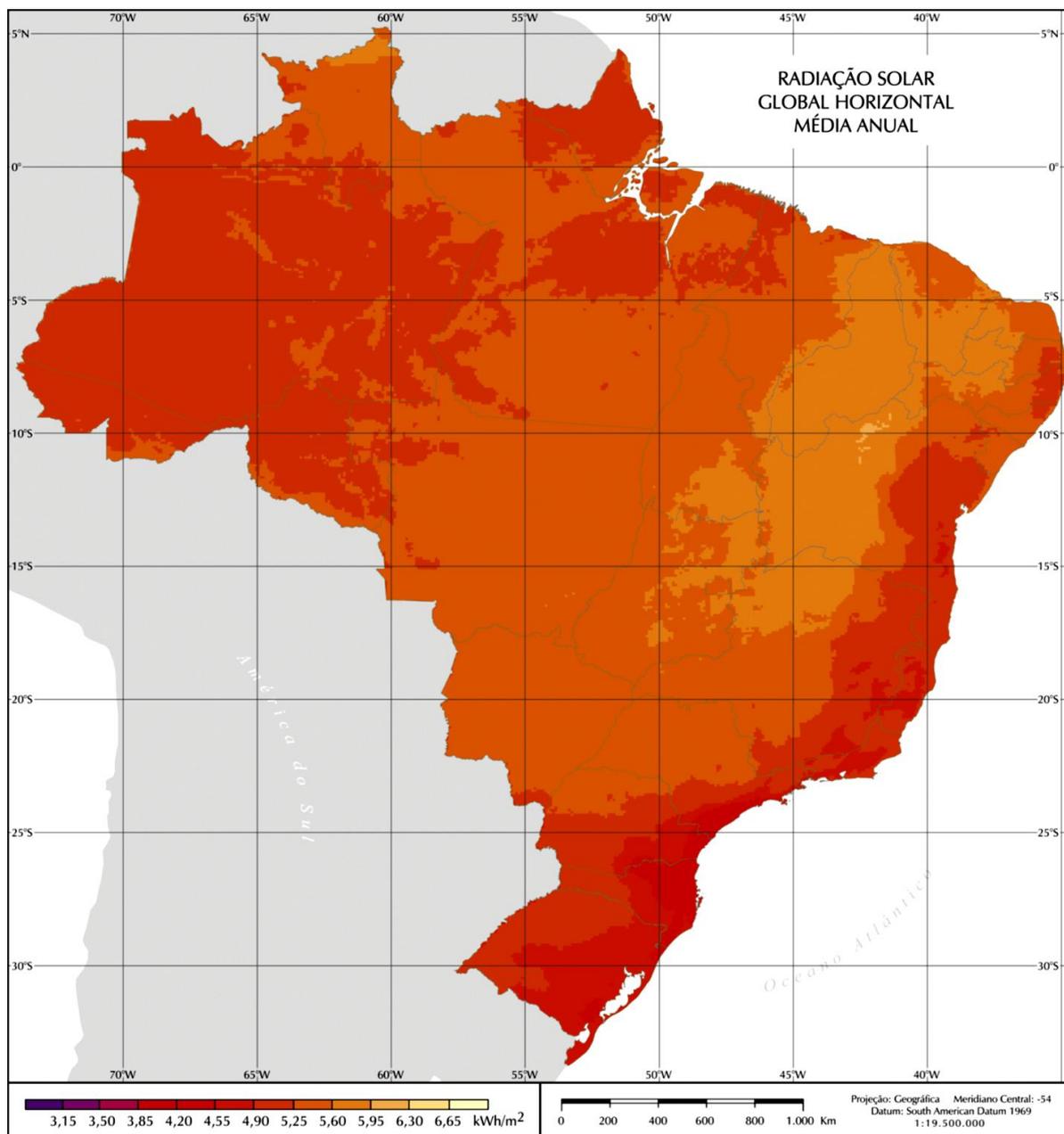
Fonte			Capacidade Instalada			Total		
Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de Usinas	(KW)	%	Nº de Usinas	(KW)	%
Biomassa	Agroindustriais	Bagaçõ de Cana de Açúcar	404	11.314.672	6,6899	421	11.399.656	6,7401
		Biogás-AGR	3	7.951	0,0047			
		Capim Elefante	2	31.700	0,0187			
		Casca de Arroz	12	45.333	0,0268			
	Biocombustíveis Líquidos	Etanol	1	320	0,0002	3	4.670	0,0028
		Óleos vegetais	2	4.350	0,0026			
		Carvão Vegetal	8	43.197	0,0255			
	Floresta	Gás de Alto Forno - Biomassa	12	127.705	0,0758	99	3.177.430	1,8787
		Lenha	5	36.015	0,0213			
		Licor Negro	18	2.542.616	1,5033			
		Resíduos Florestais	56	427.897	0,2530			
		Biogás - RA	14	4.481	0,0026			
	Resíduos sólidos urbanos	Biogás - RU	20	133.129	0,0787	22	138.379	0,0818
Carvão - RU		2	5.250	0,0031				
Eólica	Cinética do vento	Cinética do vento	557	13.733.643	8,1201	557	13.733.643	8,1201
Fóssil	Carvão mineral	Calor de Processo - CM	2	28.400	0,0168	22	3.251.830	1,9227
		Carvão Mineral	12	2.857.740	1,6897			
		Gás de Alto Forno - CM	8	365.690	0,2162			
	Gás natural	Calor de Processo - GN	1	40.000	0,0237	167	12.889.489	7,6210
		Gás Natural	166	12.849.489	7,5973			
	Outros Fósseis	Calor de Processo - OF	1	147.300	0,0871	1	147.300	0,0871
		Petróleo	Gás de Alto Forno - PE	1	1.200			
	Gás de Refinaria		6	319.530	0,1889			
	Óleo Combustível		76	3.584.903	2,1196			
	Óleo Diesel		2142	4.139.193	2,4473			
Outros Energéticos de Petróleo	18		1.028.328	0,6080				
Hídrica	Potencial hidráulico	Potencial hidráulico	1338	103.538.956	61,2179	1338	103.538.956	61,2179
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,1766	2	1.990.000	1,1766
Solar	Radiação solar	Radiação solar	2265	1.612.778	0,9536	2265	1.612.778	0,9536
Undi-Elétrica	Cinética da água	Cinética da água	1	50	0,0000	1	50	0,0000
Importação	Paraguai			5.650.000	3,3405			4,8305
	Argentina			2.250.000	1,3303			
	Venezuela			200.000	0,1182			
	Uruguai			70.000	0,0413			
Total			7155	169.131.816	100	7155	169.131.816	100

Fonte: Aneel (2018).

4. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Os sistemas fotovoltaicos têm se mostrado uma alternativa interessante para produção descentralizada de energia elétrica no Brasil. O país se encontra em uma região do continente que apresenta elevados índices médios anuais de irradiação solar em boa parte de seu território. O clima predominantemente tropical e a proximidade com a linha do Equador contribuem para que esses níveis de irradiação permaneçam em patamares aceitáveis e úteis a essa proposta de utilização desse recurso energético. Apesar do Brasil possuir uma extensa área geográfica e com grandes variações climáticas, a média de radiação solar anual apresenta uma uniformidade e pode também ser considerada alta. A média de irradiação anual no Brasil fica compreendida entre 1500 e 2500 kWh/m². Para se ter uma ideia, em países da Europa, como na Alemanha, a radiação solar incidente fica entre 900 e 1250 kWh/m²/ano (Atlas Brasileiro de Energia Solar). No Brasil, a menor média de irradiação solar fica no litoral do estado de Santa Catarina, devido à uniformidade de chuvas na região e fica em torno de 4,25 kWh/m²/dia. Ainda fazendo a comparação com os países europeus, a menor média anual brasileira apresentada, ainda é superior à de países como a França (900-1650) kWh/m² e Espanha (1200-1850) kWh/m². O maior valor médio anual no Brasil está situado no norte do estado da Bahia, apresentando 6,5 kWh/m²/dia, como mostrado na Figura (3).

Figura 3: Radiação Solar Global no Plano Horizontal Média Anual – Brasil



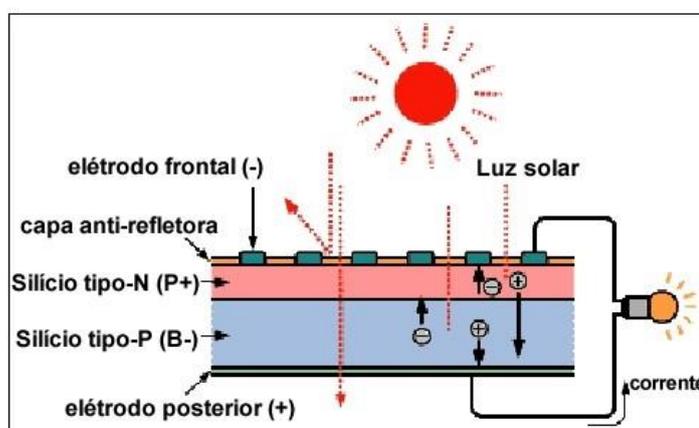
Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2016).

Historicamente, os SFV tiveram suas primeiras plantas interligadas ao SIN na década de 1990, com pequenas aplicações, dedicadas à realização de testes e estudos operacionais, para análises de viabilidade, pesquisa e adaptações para padronização de sua interligação ao sistema elétrico. Receberam de fato maior destaque no cenário energético brasileiro a partir dos anos 2000, com maior concentração em 2012, ano em que a ANEEL regulamentou as atividades e diretrizes relacionadas à micro e minigeração distribuída, através da Resolução Normativa nº 482/2012, que posteriormente em 2015, a RN 482 passou por revisões e atualizações, aumentando o leque de opções para uso dessa modalidade.

4.1. Estrutura e Funcionalidade dos Sistemas Fotovoltaicos

Em linhas gerais, os SFV são subdivididos em on grid (conectados à rede elétrica) e off grid (isolados), e utilizam da energia proveniente da irradiância solar, isto é, dos fótons emitidos pelo sol em direção à superfície do planeta para executar o processo de geração de energia, através da conversão da energia proveniente emitida pelo sol em energia elétrica. Os dispositivos utilizados nesse processo de captação e conversão da energia são os chamados módulos solares, placas compostas por elementos semicondutores, geralmente o Silício (Si), dispostos de tal forma que os cristais formados possuam valores de eficiência diferentes, conforme sua orientação, como as placas coletoras com cristas de silício monocristalino, policristalino, dentre outros. A partir da densidade de potência, a irradiância (W/m^2), e da densidade de energia, a radiação (Wh/m^2), emitidas pelo sol, os painéis solares captam os fluxos de energia e realizam o processo de conversão. A Figura (4) apresenta a estrutura simplificada da conversão da energia realizada nas células de um painel solar fotovoltaico.

Figura 4: Conversão de Energia Fotovoltaica



Fonte: Solar Energy International (2004).

Há ainda, como componentes de um sistema deste tipo, equipamentos e dispositivos utilizados para o acionamento e controle da operação do sistema, das cargas e dos processos. A energia gerada em corrente contínua (CC) segue através de cabos conectados das placas até um inversor de frequência, equipamento utilizado para converter a forma de onda contínua gerada nos painéis em corrente alternada (CA). Com o intuito de garantir a segurança na operação do sistema, proteções elétricas são instaladas, feitas através do uso de DPS, para atuarem tanto no lado em CC quanto em CA da planta em caso de ocorrência de algum surto de corrente.

Após o processo de conversão CC-CA, a energia é direcionada ao quadro de cargas, onde é distribuída, para suprir a demanda de potência dos equipamentos existentes na instalação, os quais são alimentados tanto pela rede elétrica como pelo SFV. Em uma residência, por exemplo, encontramos televisores, geladeiras, computadores, ventiladores, máquinas de lavar, entre outros. O excedente de energia gerado, isto é, que não foi consumido pelas cargas, é por fim direcionado ao medidor de energia do local para injeção na rede elétrica da concessionária. O sistema de medição de energia elétrica para essas aplicações é comumente conhecido como “medidor de energia bidirecional”, e cuja descrição técnica é net-metering, na qual é medida para fins de faturamento a diferença entre a geração e o consumo da energia elétrica. Uma das diretrizes propostas pela ANEEL na RN 482 foi justamente o estabelecimento de um sistema de compensação por créditos para o micro e mini produtor de energia elétrica a partir da diferença geração-consumo calculada, onde são contabilizados créditos se a geração de energia for maior que o consumo, e onde paga-se a diferença correspondente se a geração for menor que o consumo de energia à época do faturamento. Os equipamentos que fazem parte de um sistema conectado à rede elétrica, está meramente ilustrado na Figura (5).

Figura 5: Exemplo de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede



Fonte: Amvolt (2018).

Um dos principais componentes dos SFV é o inversor de frequência. Além de responsável por realizar a conversão CC-CA do processo de geração, é através dele que o fluxo de potência gerado é injetado na rede elétrica, tornando-o peça chave desde o processo de dimensionamento do sistema, até a inserção da planta na rede elétrica através do próprio

inversor, considerada ainda a possibilidade de ampliação de carga e do potencial de geração do sistema. Os inversores atualmente são projetados para operarem com sistemas anti-ilhamento, isto é, cuja rotina de programação permite que se desconectem da rede elétrica caso haja alguma anomalia no sistema, como uma falta no suprimento de energia ou algum surto que possa comprometer o funcionamento ou causar avarias aos equipamentos do sistema fotovoltaico.

Essa medida de segurança aplicada aos inversores também viabiliza maior segurança para profissionais que trabalham com manutenção na rede elétrica de distribuição, evitando que o sistema fotovoltaico se conecte e injete potência na rede elétrica de distribuição durante uma eventual rotina de manutenção preventiva da referida rede. Além das atividades relacionadas à conversão de energia e de proteção do sistema, os inversores de frequência também possuem, em sua maioria, sistemas supervisórios interativos para monitoramento das condições do equipamento, tanto de seus parâmetros operacionais, bem como da geração de energia, para gerenciamento do desempenho do processo.

5. PARÂMETROS E INDICADORES EXISTENTES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA- NORMATIVAS NACIONAIS

Em um sistema de geração fotovoltaica existem vários parâmetros e indicadores que são utilizados para apontar o grau de confiabilidade, segurança e de constância na geração e no fornecimento da energia aos grupos consumidores, visando garantir as condições de operação tanto dos sistemas como das cargas. Tomando por base a rede de distribuição, esses indicadores caracterizam o quão estável é o sistema nas ações de fornecimento de energia independente do perfil das cargas presentes na rede e dos níveis de potência que solicitam. O significado destes indicadores e suas aplicações tomam sentido completo quando são analisados os parâmetros que o norteiam. De acordo com o módulo 8 do PRODIST, esse padrão estabelecido faz com que os sistemas, equipamentos, concessionárias e consumidores se enquadrem em limites para utilização segura e eficiente da energia elétrica proveniente desta fonte alternativa. O documento abrange em suas seções os procedimentos pertinentes à qualidade do produto e do serviço que faz menção ao fornecimento da energia elétrica, com enfoque na avaliação das eventuais falhas e no atendimento às ocorrências, considerando a satisfação do cliente final do processo. (Aneel, 2012).

Na seção que corresponde aos procedimentos que abrangem a satisfação do produto, a ANEEL define os conteúdos técnicos principais para a análise desses indicadores de um sistema GD, onde são caracterizados os fenômenos, as grandezas integrantes do processo, as suas características funcionais, abordando tais fenômenos considerando os regimes transitório e permanente de operação, estabelecendo seus limites e valores base para o devido levantamento dos dados e padronização das medições da energia gerada. Os indicadores pertinentes às aplicações para análise de impactos em sistemas fotovoltaicos on grid serão apresentados e caracterizados a seguir, de modo a estabelecer e identificar os seus limites, para direcionar as análises para viabilizar a correção das condições adversas observadas.

5.1. Tensão em Regime Permanente

A tensão em regime permanente é obtida a partir da comparação entre os valores obtidos de medições apropriadas e os valores de referência, estabelecidos como sendo os valores nominais para a tensão naquele ponto de conexão ou a tensão contratada para a unidade

consumidora. Esse indicador se relaciona à geração fotovoltaica de energia de modo que valores obtidos para tensão em regime permanente classificados como precários ou críticos podem prejudicar o processo de geração de energia, uma vez que a tensão elétrica nos pontos de conexão pode apresentar diferença considerável em relação à tensão de saída do sistema fotovoltaico. Tensões elevadas em relação à nominal para a UC também podem afetar o desempenho do SFV, visto que, nos pontos onde temos picos de produção de energia, geralmente no período do meio do dia, encontramos os valores mais elevados para a tensão CC gerada nos módulos FV, além de eventuais elevações de temperatura, devido a fatores externos e pelas próprias condições de operação do sistema. Isso, somado à elevada tensão no ponto de conexão, pode comprometer os sistemas de proteção da planta FV e da própria instalação, que serão acionados um número maior de vezes, atuando contra as sobretensões e elevações abruptas de temperatura percebidos. A tabela (3) a seguir estabelece os limites definidos em norma para as tensões em regime permanente para o tipo de instalação descrita.

Tabela 3: Tensão Nominal em Pontos de Conexão Menor ou Igual a 1KV (380/220).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 231 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: Adaptado de (Aneel 2012).

5.2. Fator de Potência

O fator de potência (FP) de uma instalação equivale a uma medida da parcela de energia ativa, ou de potência ativa, presente em determinado sistema, em relação à energia total ou potência aparente presente neste mesmo sistema. É utilizado para denotar a presença de energia disponível com potencial para realizar trabalho no circuito, isto é, a energia disponível para acionar motores, equipamentos, dispositivos, e demais componentes do circuito. O FP estabelece uma relação direta entre a potência ativa e a potência reativa presentes no dado sistema, sendo, portanto, um importante indicador da eficiência do processo de geração de energia.

Os limites estabelecidos pela ANEEL no PRODIST (2018) para as UC's, para esta razão entre as potências ativas e reativas indicam também a natureza predominante dos componentes da instalação, pois o FP deve ser mantido entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou entre 1,00 e 0,92 capacitivo. Fatores de potência que se encontrem fora desses limites podem contaminar os equipamentos existentes na instalação com excessos de componentes reativos bem como a própria rede elétrica, provocando mau funcionamento, baixo desempenho e perda na eficiência do processo de geração fotovoltaica. Além dos impactos técnicos e funcionais, ainda apresentam medidas administrativas, relativas ao não cumprimento do padrão estabelecido. A equação (1) é usada para calcular e corrigir o fator de potência:

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Onde:

$\cos \theta$: Ângulo de Fase

P: Potência Ativa

S: Potência Aparente

5.3 Distorção Harmônica

A distorção harmônica total ou Total Harmonic Distortion (THD) é um parâmetro observado majoritariamente nos equipamentos eletrônicos, que aborda e quantifica o limite de harmônicos de diferentes ordens injetados na rede, presente por exemplo nos inversores de frequência das micro usinas FV, e que pode provocar distorções na forma de onda da corrente elétrica e da tensão. A forma de onda de um sinal senoidal, seja de tensão ou corrente, possui uma frequência de propagação, a qual no sistema elétrico brasileiro equivale a 60 Hz, e é chamada frequência fundamental. A presença de cargas não lineares nos sistemas elétricos, como os próprios inversores, fontes chaveadas, lâmpadas fluorescentes, etc., fazem com que surja nos espectros de corrente, novas ondas somadas à fundamental, cujas frequências são somadas à frequência fundamental da onda e cujo resultado são sinais distorcidos por essas componentes e que, dentre outros, impactam diretamente os sistemas fotovoltaicos devido ao grande número de componentes e circuitos eletrônicos presentes nos equipamentos, causando problemas como sobreaquecimento, dificuldades no funcionamento de sistemas de proteção, distorção da tensão em pontos de conexão de outras cargas, redução do FP da planta.

A Equação (2) é usada para calcular a distorção harmônica total:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{50} U_n^2\right)}}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

THD: Distorção Harmônica Total;

U1: Componente fundamental;

Un: Componentes harmônicas de corrente ou tensão;

n: Ordem da componente harmônica.

No módulo 8 do PRODIST são definidos os parâmetros desejados para as diversas componentes dos principais harmônicos de tensão, parâmetros tais estabelecidos para que os sistemas operem com condições favoráveis e que não comprometam as instalações e poluam a rede elétrica, podendo levar aos problemas descritos. A Tabela (4) a seguir apresenta os limites de THD.

Tabela 3: Limites das Distorções Harmônicas Totais (%)

Tensão Nominal			
Indicador	$V_n \leq 1,0 \text{ KV}$	$1,0 \text{ KV} < V_n < 69 \text{ KV}$	$69 \text{ KV} \leq V_n < 230 \text{ KV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTTp95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTTI95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT395%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Adaptado de (Aneel 2018).

Onde, conforme legenda do próprio documento, o indicador “95%” corresponde ao percentual de acertos onde foram obtidos os valores definidos, de modo que em somente 5% dos levantamentos esses valores não foram obtidos. Os demais significados de cada indicador são:

DTT%: Distorção harmônica total de tensão;

DTTP%: Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3;

DTTI%: Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3;

DTT3%: Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.

5.4 Variações de Frequência

A frequência elétrica de operação dos sistemas fotovoltaicos deve se manter muito próxima ou igual à frequência nominal da rede elétrica, equivalente a 60 Hz no sistema elétrico brasileiro. A norma define uma faixa estreita de valores para a frequência elétrica de operação

para o sistema de distribuição e aos demais conectados a este, situada entre 59,9 Hz e 60,1 Hz, de modo a minimizar o número e a intensidade das oscilações da frequência nos sistemas, uma vez que alterações abruptas nesta podem comprometer o funcionamento de equipamentos e até causar danos irreversíveis. (Aneel, 2018).

O maior impacto de variações na frequência é percebido nos SFV pelo equipamento inversor, que é o responsável pela conversão da energia CC em CA e pela conexão do sistema com a rede elétrica. Seu funcionamento é prejudicado, visto que ele é configurado e fabricado para operar sob as condições nominais da rede elétrica, injetando na rede potência CA com frequência configurada para o intervalo estabelecido em norma.

5.5 Situações Adicionais

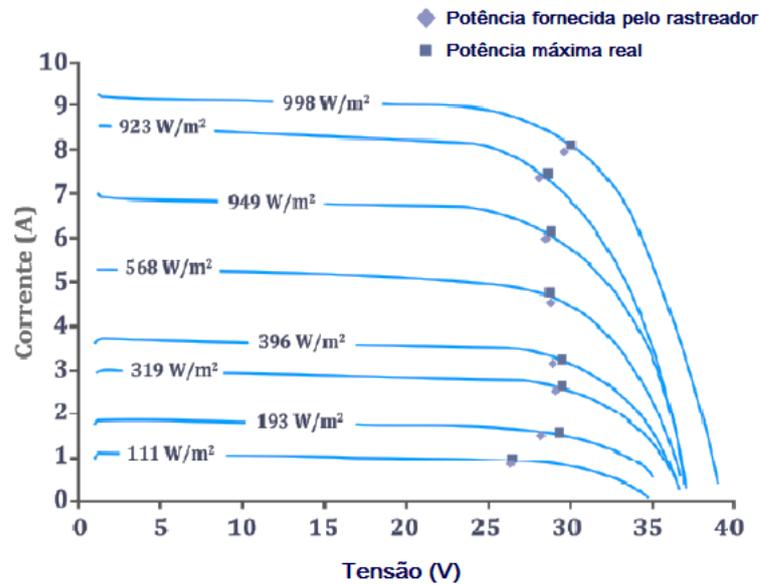
Os sistemas fotovoltaicos são caracterizados por serem predominantemente intermitentes, isto é, o fornecimento e a conversão da energia são irregulares, pois dependem das condições do tempo e clima, (Castro, 2008). Tal irregularidade pode afetar o perfil de tensão na unidade consumidora, com números significativos de chaveamentos ao longo do dia, na passagem de uma nuvem, na presença de poeira nos módulos, etc. A intermitência dessa fonte pode impactar no perfil de tensão do consumidor, provocando flutuações nos níveis de tensão, onde o maior índice de ocorrência desse fenômeno se dá nos pontos com curtos-circuitos de menor magnitude e em locais distantes das subestações.

Quando ocorrem variações na tensão do SFV, devido à intermitência dos níveis de insolação descritos, às elevações abruptas da tensão nos picos de produção de energia, os inversores de frequência atuam de forma a regular a tensão do sistema para que sejam maximizadas e mantidas as condições para conversão da energia e a eficiência, tanto do equipamento, garantida pelo fabricante, como da dimensionada para a planta. Os inversores solares fazem isso através de uma configuração chamada rastreador de ponto de máxima potência ou Maximum Power Point Tracking (MPPT), onde deslocam suas curvas de operação, variando os patamares de tensão e corrente em busca do ponto ótimo de potência, conforme as condições disponíveis, (ABB String Inverters, 2017).

Como a tensão de geração dos SFV oscila, o MPPT dos inversores é bastante exigido, ocasionando desgaste acelerado no caso de um incorreto dimensionamento e aumentando os custos de implantação e manutenção do sistema. A Figura (6) a seguir ilustra as curvas de

operação distintas de um equipamento inversor, conforme as condições de ambiente às quais ele está submetido, para o rastreamento do ponto de máxima potência de operação.

Figura 6: Rastreamento de Máxima Potência



Fonte: Adaptado de ONUDI (2016)

Durante a operação dos equipamentos, porventura podem ocorrer irregularidades na rede elétrica ou na própria fonte descentralizada, podendo ocasionar as chamadas reversões no fluxo de potência do sistema, com fluxo de energia entre as partes sem que uma das duas pontas esteja apta a receber a energia, como no caso de desligamentos da rede para manutenção. As reversões no fluxo de potência durante o período de geração podem causar danos à instalação e aos seus equipamentos, caso os mesmos não estejam corretamente parametrizados. Com o objetivo de evitar esse empecilho, os inversores de frequência são equipados com um sistema de proteção anti-ilhamento, para evitar que a rede elétrica permaneça energizada pelo SFV em caso de desligamento e, também para que o oposto não ocorra, de a planta FV ser energizada pela rede sem que exista uma conexão segura entre as partes.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Após concluídas as etapas de levantamento e coleta de dados, da aplicação dos conceitos elencados e dos procedimentos necessários, são apresentados nos itens seguintes os resultados do trabalho desenvolvido. A empresa Amvolt Sistemas Elétricos e Energia Solar, voltada para atuação com sistemas de geração de energia fotovoltaica, com aplicações conectadas à rede elétrica (on grid), contribuiu com o fornecimento de dados e acesso aos seus sistemas que se encontram em operação, o que viabilizou a coleta de dados reais da geração distribuída de energia elétrica. Os parâmetros e dados indicados a seguir são oriundos da aplicação que se encontra na cidade de Santana da Vargem-MG.

6.1. Análise das Medições Reais

Através da interface de monitoramento, os dados de geração fotovoltaica foram coletados para analisar possíveis impactos relacionados ao comportamento do sistema conectado com a rede elétrica de distribuição. Os dados foram obtidos através das constantes aferições realizadas pelo próprio inversor em pleno funcionamento. Nos itens seguintes serão apresentados e analisados os gráficos descritos conforme cada grandeza existentes elaborados através de dados coletados e tratados em software de planilhas eletrônicas contendo informações pertinentes à geração de energia solar do sistema, de modo a identificar a presença de algum impacto que possa prejudicar a fonte alternativa, ou o comportamento da própria rede de distribuição.

O presente SFV em estudo foi dimensionado para uma potência instalada de 6,615 kWp, contendo como principais componentes 21 módulos solares de potência equivalente a 315 Wp, marca Canadian Solar, e um inversor de frequência monofásico marca ABB, modelo PVI6000, de potência equivalente a 6 kWp. O sistema foi dimensionado para operar nessas condições, devido à tensão nominal de alimentação da região, de 380 V fase-fase e 220 V fase-neutro. O equipamento inversor foi adequado à tensão e ao formato aplicado, pois de acordo com o manual do fabricante, o inversor possui uma tensão nominal VCA de saída equivalente a 230 V, além de uma faixa de operação para esta tensão que varia de 180 V a 264 V. Os dados apresentados neste estudo são relativos às medições realizadas e armazenadas do dia 01 de maio de 2018, justamente por apresentar comportamento e características importantes e

complementares para o desenvolvimento desta análise. A figura (7) e (8) mostram o sistema fotovoltaico real em estudo.

Figura 7: Arranjo dos Módulos Solares



Fonte: O Autor

Figura 8: Inversor de Frequência

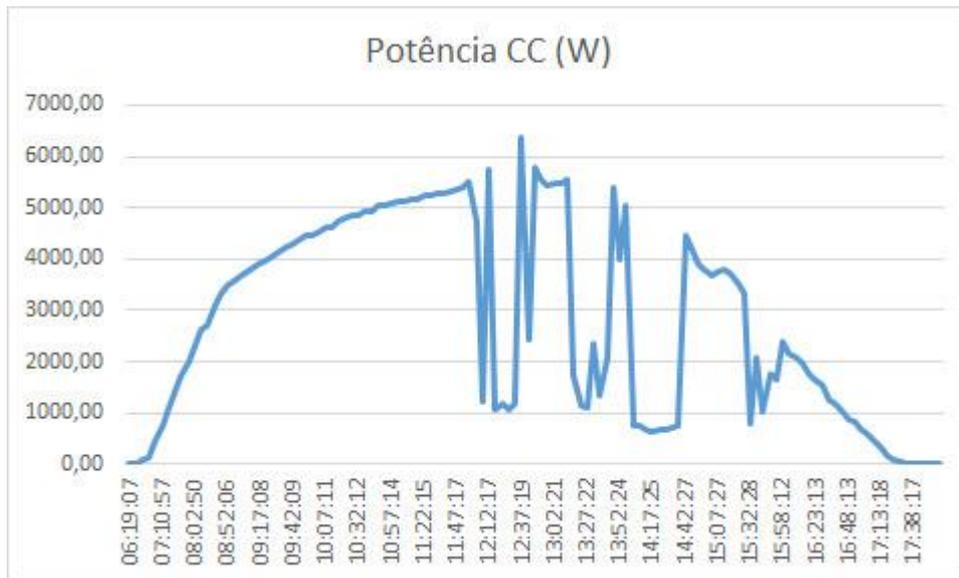


Fonte: O Autor

6.1.1 Potência Gerada

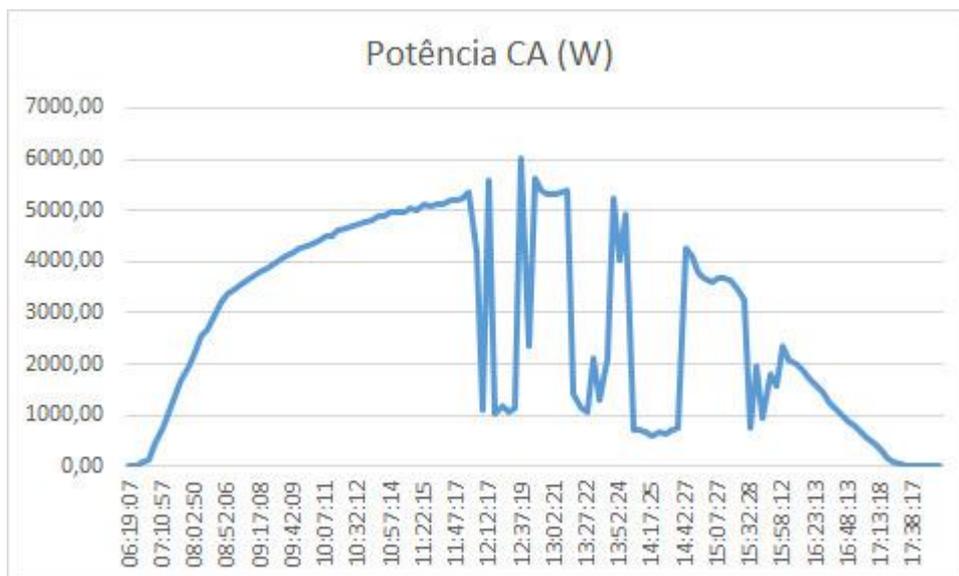
Serão analisados os gráficos (1) e (2), respectivamente, que correspondem à potência gerada em corrente contínua, pelos painéis solares, e a potência em corrente alternada, na saída do inversor para as cargas e para a rede elétrica.

Gráfico 1: Potência Gerada em CC Pelos Painéis Solares



Fonte: O Autor

Gráfico 2: Potência em CA na Saída do Inversor



Fonte: O Autor

Percebemos, a partir dos gráficos de geração de energia, que a diferença é mínima entre as duas curvas. Analisando as perdas elétricas ocorridas no processo de conversão da energia, nota-se que há apenas uma redução com relação à energia gerada no ponto máximo da curva, obtido por volta de 12h37min, que corresponde a 6366,00 W gerados em CC, e a 6032,00 W gerados em CA. Considerando as medições realizadas nos terminais de entrada e saída do inversor, isto é, lado CC e lado CA, respectivamente, temos a eficiência de operação de 94,75% na conversão da energia. Dados de catálogo para esse modelo de equipamento indicam que seu rendimento máximo é aproximadamente 97,0%, sendo que os 3% restantes de perdas elétricas presentes neste processo são atribuídos a características construtivas e operacionais, sendo esta principalmente a condições do ambiente às quais o sistema está submetido, como a temperatura, umidade, partículas de poeira presentes no ar.

Em nossa análise, se considerarmos outros pontos da curva que não seja seu ponto máximo, essa eficiência de 97% será alcançada, no entanto percebe-se que a diferença entre os dois pontos máximos das curvas do lado CC e do lado CA do inversor não atendeu a eficiência dada pelo catálogo do equipamento. De acordo com a descrição do sistema fotovoltaico, nota-se que a planta está ligeiramente superdimensionada contendo uma potência instalada de módulos solares maior que a potência nominal do inversor, isto faz com que a geração em plena carga produzida em um determinado período do dia pelos módulos ultrapasse a potência nominal de operação. O inversor por características de funcionalidade visando sua faixa de operação e conversão limita a potência de saída o mais próximo de sua condição nominal. O ligeiro superdimensionamento neste caso estudado, tem como objetivo aproveitar melhor a energia gerada nas bordas do gráfico aumentando a área de produção, com o intuito de ao mesmo tempo compensar a energia perdida limitada pelo inversor no ponto máximo de potência em um instante ou período do dia que alcance sua condição nominal. Os inversores são configurados para suportar uma leve porcentagem de sobre carga em um determinado período do dia, mais o superdimensionamento demais de um sistema pode ocasionar danos ao inversor de frequência fazendo com que trabalhe no seu limite proporcionando problemas de funcionalidade e reduzindo sua vida útil.

As medições acima se relacionam aos problemas ocasionados pelo perfil intermitente da energia gerada pelo SFV, pois mesmo o inversor sendo dotado de rastreadores de ponto de máxima potência, não é possível garantir um perfil contínuo de potência injetada nas cargas. As falhas observadas nos gráficos são oriundas principalmente de condições externas, visto que a produção de energia é inerente à irradiância. As irregularidades na potência gerada provocam

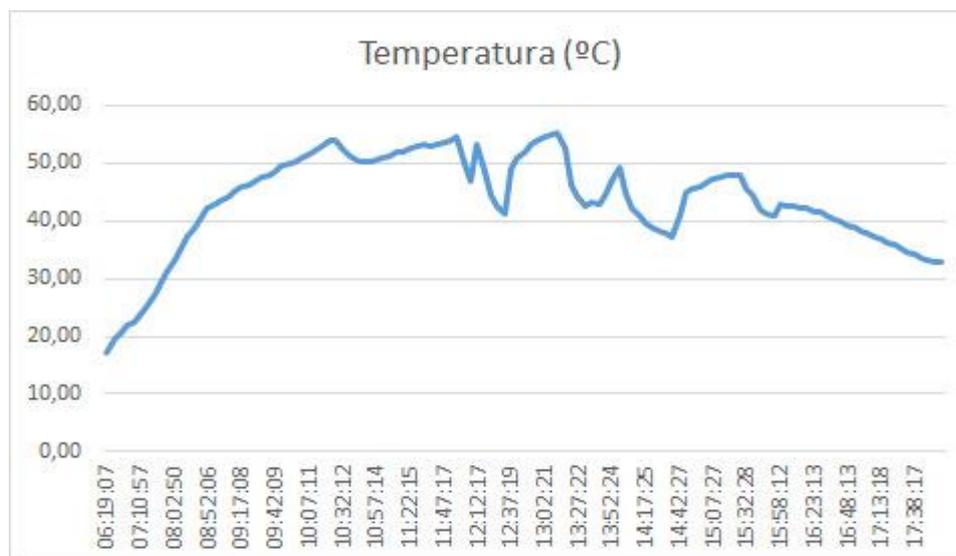
um desgaste acelerado do inversor. Um número maior de chaveamentos e rastreamento de potência foram necessários para equilibrar e garantir a eficiência do processo. Esse esforço maior foi percebido quando se observou o perfil de temperatura e da energia gerada ao longo do dia de medição, apresentados no item 6.1.2.

Como as principais condições responsáveis por afetar o perfil de potência da instalação são provenientes do ambiente, e que pouco se pode fazer contra essas adversidades, sugere-se que as condições técnicas sejam devidamente atendidas, como dimensionamento de condutores, verificações e manutenção preventiva dos equipamentos, limpeza dos módulos fotovoltaicos para evitar acúmulo de sujeira, comissionamento do inversor, para verificação dos parâmetros e de suas variações, afim de que se perceba e antecipe eventuais falhas apresentadas, tanto no equipamento como ao longo do sistema, como sobreaquecimento de condutores. Sobre o ambiente, é necessário um estudo aprofundado de viabilidade para utilização de plataformas automatizadas que tornam o arranjo fotovoltaico móvel, para que se acompanhe a posição do sol, sempre proporcionando inclinação do arranjo tal que se obtenha o máximo nível de insolação possível, para maior aproveitamento dos índices de irradiância locais e para minimizar as irregularidades na curva de potência gerada.

6.1.2 Temperatura de Operação

O gráfico (3) apresentado é relativo às aferições da temperatura do inversor, durante seu pleno funcionamento.

Gráfico 3: Temperatura do Inversor de Frequência



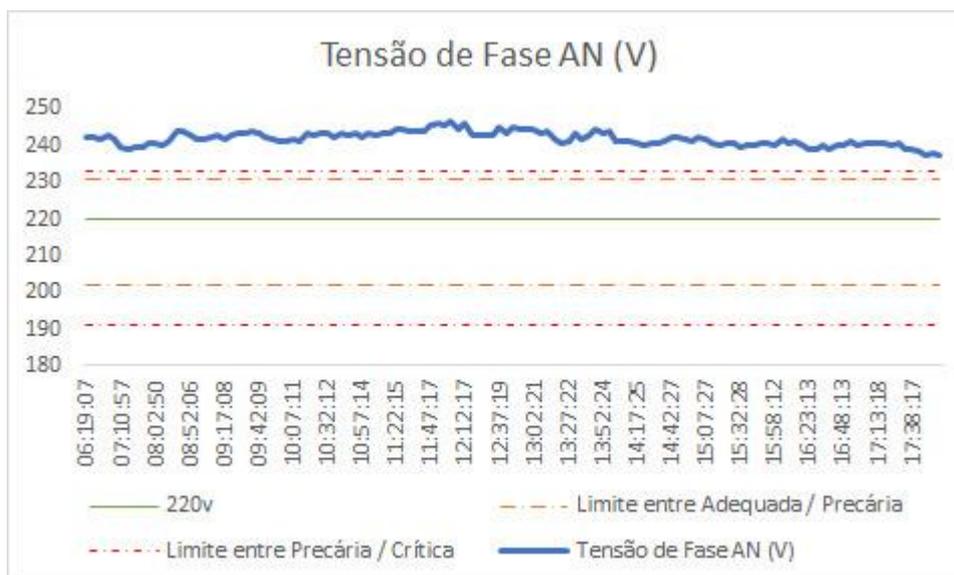
Fonte: O Autor

Conforme apresentado, a temperatura do equipamento durante o seu funcionamento atingiu um máximo de 55,30 °C por volta das 13h. A oscilação constante dessa grandeza medida ao longo do dia comprova de maneira experimental como são exigidos os inversores de frequência. Esse desgaste acelerado pode ocasionar danos ao equipamento. É necessário considerar para a análise deste parâmetro que ele é influenciado diretamente pelo perfil de potência e pela tensão de geração do arranjo FV, além de a própria temperatura ambiente contribuir para o processo. Como temperaturas elevadas são prejudiciais a sistemas elétricos e eletrônicos, é necessário que esta seja controlada, inicialmente com o monitoramento de seus valores e da temperatura no local onde se encontra, assim como um controle refinado da tensão nos terminais do equipamento inversor, para manter a temperatura de operação com uma característica linear e facilitar seu controle.

6.1.3. Paralelismo da Tensão da Rede Com o Sistema Fotovoltaico

A tensão da rede, assim como os demais parâmetros analisados, se relaciona diretamente aos problemas ocasionados neste tipo de fonte, o gráfico (4) aponta a tensão CA da rede de distribuição de energia, medida pelo equipamento inversor, ao longo de todo o dia de operação.

Gráfico 4: Tensão da Rede em Conjunto com o Sistema Fotovoltaico



Fonte: O Autor

A tensão na saída do SFV deve ser controlada para que sejam garantidas as condições nominais de operação, além da necessidade de equiparar a tensão do inversor com a tensão no ponto de conexão com a rede elétrica. Nota-se que além do valor de pico da tensão de 246,70 V, uma grande oscilação nos valores obtidos, também característica marcante do perfil intermitente dessa fonte. Esse número elevado de operações para controle dos níveis de tensão impacta no aumento da temperatura do inversor e na conseqüente redução da eficiência da planta, fato que exige atenção, pois equipamentos e dispositivos mais sensíveis à variação dos sinais elétricos podem ter seu funcionamento comprometido. Conforme a tabela (3) apresentada na seção 5.1 dos limites definidos em norma para as tensões em regime permanente para esse tipo de instalação descrita, aponta que a tensão da rede em conexão com o sistema estava em valores acima dos permitidos pelo PRODIST.

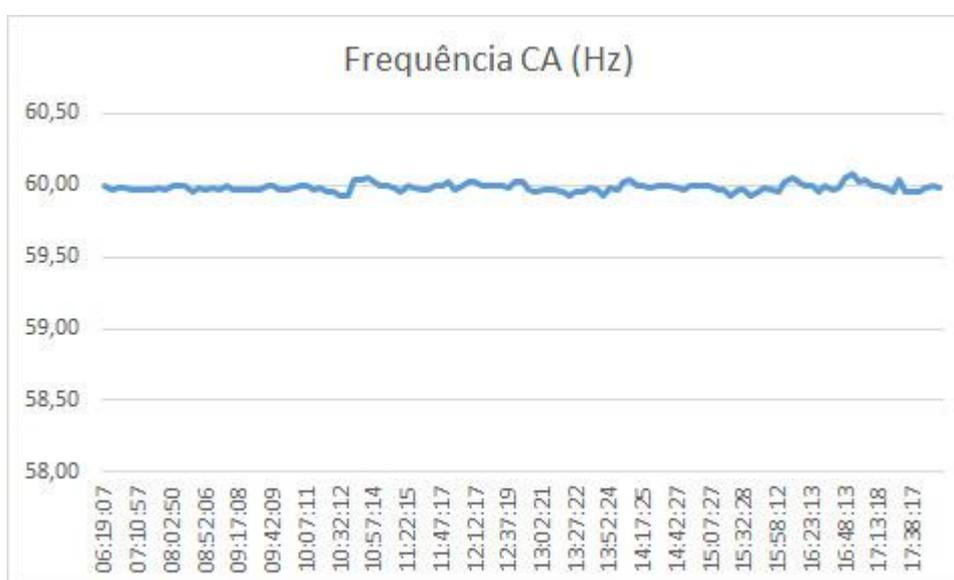
O sistema inversor possui configurações de fábrica que permitem ajustar os parâmetros de tensão CA na sua entrada, ou seja, caso a tensão da rede exceda os limites configurados, o equipamento realiza a desconexão e reconexão automaticamente, além de proteções contra ilhamento e limitadores de potência. Essas características contribuem para atenuar as irregularidades percebidas, sejam elas na planta fotovoltaica ou na própria rede de distribuição de energia elétrica.

6.1.4. Frequência da Rede em Conjunto com o Sistema Fotovoltaico

Aspecto importante para analisar a qualidade da energia gerada em uma fonte descentralizada, a frequência elétrica da tensão deve se aproximar do valor da frequência da

rede. A concessionária tem a responsabilidade de manter a frequência estável e dentro dos limites estabelecidos em todos os pontos de conexão da instalação. O papel do SFV nesse processo é de que a energia injetada no sistema de distribuição não afete esse valor. Os limites para a frequência medida na instalação devem atender às definições de norma da ANEEL, assim como estabelecido no PRODIST, para uma faixa de frequências elétricas compreendida entre 59,9 Hz e 60,1 Hz, para o regime permanente de operação. Conforme mostrado no gráfico (5) a seguir, o dimensionamento do SFV atendeu às exigências impostas pela ANEEL, mantendo a frequência no local entre 59,93 Hz e 60,08 Hz.

Gráfico 5: Frequência da Rede em Conjunto com o Sistema Fotovoltaico



Fonte: O Autor

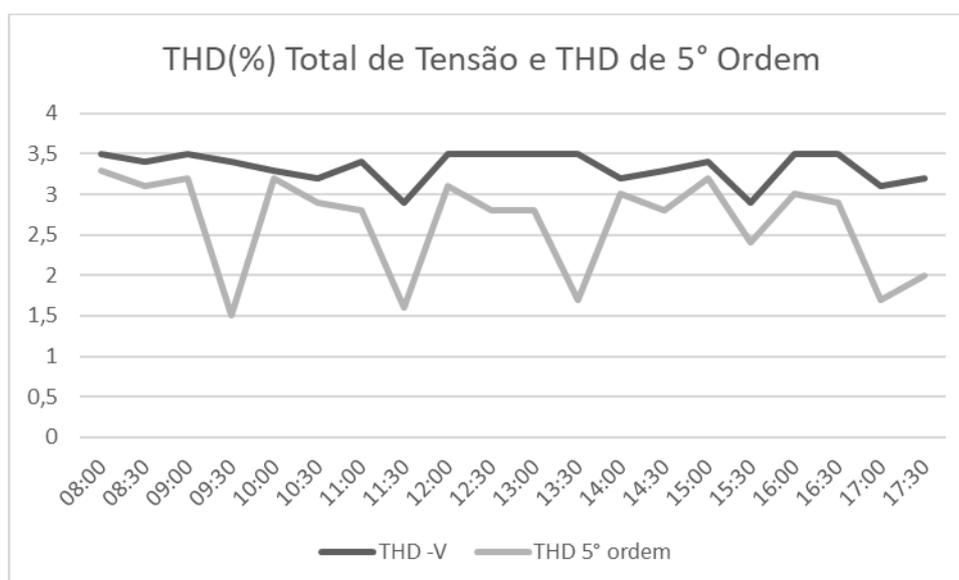
6.1.5. Distorção Harmônica Total

O fator de distorção harmônica total (THD) de uma instalação elétrica indica qual é o comportamento das correntes e tensões atuantes naquele circuito. Inicialmente, só era possível medir o THD de uma corrente a partir de osciloscópios e aparelhos de custo elevado para se analisar o espectro de corrente e tensão elétrica do local e identificar a presença de componentes harmônicas. O avanço das tecnologias para medição, análise e monitoramento de grandezas elétricas propiciou o surgimento de dispositivos aptos a realizar tais medições e mais acessíveis para o corpo técnico de empresas, como multímetros digitais, para medição de tensão, de continuidade em circuitos com diodos, e até para medição de componentes harmônicas em

sinais senoidais. Além do aparato técnico, que é utilizado para medição, a presença de harmônicas nos circuitos de uma instalação pode ser percebida pois sua atuação pode provocar ressonância mecânica de barramentos e condutores em painéis e quadros elétricos, produzindo vibrações nesses componentes e emitindo ruídos perceptíveis ao ouvido humano.

Para medição e controle desse indicador na planta em estudo, foram coletados dados através de equipamentos disponibilizados pela empresa AMVOLT autora do projeto fotovoltaico, atendendo os valores de referência do módulo 8 do PRODIST. É importante ressaltar que os equipamentos utilizados também são adequados aos parâmetros exigidos pelo módulo 8 do PRODIST, enquadrando limites para a classe de exatidão, taxa amostral por ciclo e conversor analógico digital. Feitas as análises os estudos se concentraram no perfil de distorção harmônica total da tensão fundamental, com o intuito de verificar os índices e limites estabelecidos por norma conforme a tabela (4) da seção 5.3. O gráfico (6) a seguir foi elaborado por meio dos dados apurados e tratados em software de planilhas eletrônicas e aponta o comportamento de harmônicos da tensão da fase AN em 220V monofásico por característica europeia do inversor de frequência que avalia a diferença de potencial da rede de distribuição em 220V.

Gráfico 6: Comportamento Temporal da Distorção Harmônica Total (%) de Tensão e a Distorção Harmônica de 5° Ordem.



Fonte: O Autor

Como observado, o gráfico (6) evidencia o atendimento do índice de THD de tensão

fundamental conforme a tabela 4 da seção 5.3. Através do resultado alcançado pelas medições podemos notar que o sistema apresenta distorções harmônicas de 5º ordem, e o índice de distorção harmônica de tensão é menor que 3,5%, o que comprova que o inversor de frequência não ofereceu neste caso danos à rede de distribuição em conexão. Além das medições realizadas o equipamento inversor possui um sistema na saída CA para controle do THD na potência nominal, que conforme manual do equipamento, corresponde a um valor de distorção harmônica total inferior a 3,5%. A partir da análise das condições locais existentes foi possível constatar a inexistência dos fenômenos físicos associados à presença de componentes de natureza harmônica, pois não foram detectadas vibrações ou ruídos nos quadros elétricos. Ainda, através do espectro de frequência gerado e apresentado no gráfico (5), pode-se afirmar que, do ponto de vista normativo, os resultados de controle do THD realizados pelo inversor na saída CA são satisfatórios.

7. CONCLUSÃO

Os sistemas fotovoltaicos apresentaram crescimento nítido nos últimos anos, situação satisfatória que motivou novos concorrentes nos mercados de energia solar a atuarem no país. Tal fato viabilizou aplicações diversas e maior facilidade de acesso à tecnologia, graças à redução do preço e do tempo de retorno do investimento. Os resultados do estudo apresentado foram comprovados através das análises de campo elaboradas no âmbito da geração de energia medida pelo próprio sistema de monitoramento do inversor e tratadas através de software em planilhas eletrônicas gerando gráficos que facilitaram o entendimento da pesquisa em relação ao comportamento das grandezas existentes no processo de geração fotovoltaica conectado a rede, denominando assim se tais comportamentos podem ocasionar impactos na rede de distribuição de energia.

Através das análises, observou-se que o inversor de frequência limitou a potência de entrada em situações em que a potência gerada pelos painéis fotovoltaico ultrapassaram a máxima potência nominal do equipamento, evidenciando que tal comportamento é comum para que o inversor não seja submetido a um estresse maior que ele possa suportar, o que ocasionariam danos aos seus componentes reduzindo sua vida útil. Os problemas percebidos durante o levantamento dos dados são voltados principalmente a oscilações e elevação de tensão da rede e, conseqüentemente da temperatura no inversor. Caso os limites de tensão continuem a se elevar, o próprio inversor realiza a desconexão automática (ilhamento) para autopreservação e para a segurança de profissionais que poderiam eventualmente realizar algum trabalho de manutenção na rede elétrica, a reconexão só ocorre quando a tensão da rede estiver dentro dos parâmetros pré-configurados.

Há ainda o fato de que o dimensionamento do SFV atendeu às exigências impostas pela ANEEL, mantendo a frequência dentro dos limites de operação para que não haja problemas durante o paralelismo com a rede elétrica. E quanto aos resultados do controle de THD, estes são satisfatórios conforme a análise do espectro do gráfico relacionado a tensão fundamental que apresentou um valor inferior a 3,5%, se adequando aos limites estabelecidos em norma, e comprovando a configuração do inversor capaz de controlar os harmônicos injetados na rede por sua própria energia gerada.

É indicado que sejam medidas periodicamente as distorções harmônicas, assim como a parametrização do inversor, pois o excesso de oscilações no espectro de frequência, tensão e

corrente correspondem a uns dos indicadores de elevada distorção harmônica no sinal. Caso sejam detectadas componentes harmônicas ou algum dos fenômenos físicos relacionados a THD, adequações são demandadas para reduzir ou eliminar esses impactos. É necessário atentar para a geração de energia sem agressão aos equipamentos do ponto de vista técnico, com operação muito próximo do seu limite de escala, buscando evitar seu desgaste acelerado e desnecessário, evitando impactos negativos tanto na eficiência de geração como na injeção da energia excedente ao sistema elétrico de distribuição, prolongando, assim, sua vida útil.

Em relação a qualidade de energia elétrica produzida por esses sistemas faz se necessário reforçar os estudos dos inversores de frequência para essas micro usinas fotovoltaicas considerando seus desenvolvimentos tecnológicos, e especialmente as características de qualidade de energia que são afetadas quando as formas de onda senoidais das correntes injetadas, e das tensões em relação a onda senoidal da frequência fundamental apresentam deformações, o que caracteriza a associação do fenômeno de distorções harmônicas. O aprimoramento e aprofundamento das medições e verificações dos dados são extremamente importantes por parte da concessionaria e do usuário, em conformidade com os limites estabelecidos por norma, (IEE-519) em relação as correntes, a tensão, a frequência e os harmônicos de acordo com o módulo 8 do PRODIST, direcionado ao ponto de conexão com a rede avaliando a qualidade de energia entregue. Uma proposta de estudo futura seria uma análise do ponto de vista macro, avaliando o comportamento e os impactos que várias usinas fotovoltaicas conectadas a rede podem causar, não só em relação a eficiência e a qualidade de energia gerada e injetada, mais também até que ponto esses sistemas podem contribuir e ou prejudicar a rede de distribuição em sua capacidade de hospedagem.

BIBLIOGRAFIA

Alonso, M.C., García, F.S. e Silva, J.P. (2013). ONUDI. **Programa de capacitação em Energias renováveis - Energia Solar Fotovoltaica**. Realizado em agosto de 2016.

AMVOLT. **Arquivo de fotos e projetos. Amvolt Sistemas Elétricos e Energia Solar Ltda**, 2015 a 2018. Disponível em: <<http://www.amvolt.com.br>>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

ANEEL. **Banco de informações de Geração. ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica**, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>.

ANEEL. **Procedimentos de distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Módulo 3. Revisão 6 de 01/03/2016.

Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio Brito. Cresesb. **Potencial solar SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em novembro de 2018.

Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig. **Requisitos para a conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição Cemig – Conexão em Baixa Tensão**. Belo Horizonte: Diretoria de Distribuição e Comercialização, 2012. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/Normas%20T%C3%A9cnicas/ND.5.30.pdf>>. Acesso em novembro de 2018.

Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 80 p. ISBN: 978-85-87929-50-1. 2012.

Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig. **MINI E MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA - SISTEMA DE COMPENSAÇÃO**. Belo Horizonte: CEMIG Distribuição SA, 2016. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/corporativo/Paginas/micro_minigeracao.aspx>. Acesso em novembro de 2018.

ENEA. **Progettare e installare un impianto Fotovoltaico**. Roma, 80 p. ISBN: 88-8286-159-7. 2008.

F. Spertino. *Conversione Fotovoltaica dell'energia*. Torino, Italia. Dispense, 2012.

Gestore Servizi Elettrici. **Le guide Blu**. N. 15. Edizione TNE. Italia.

Green Pro. **ENERGIA FOTOVOLTAICA – Manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. Alemanha: Comissão Europeia, 2004.

NBR. ABNT NBR16274. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho**. 06/04/2014.

The Nebraska Astronomy Applet Project. **Sun Motions Simulator**, Disponível em: <

<http://astro.unl.edu/naap/>>. Acesso em 30 de novembro de 2018.

Tritec Energy. **Suportes de fixação e conectores**. Disponível em < <http://www.tritec-energy.com/en/accessories/multi-contact-mc3-and-mc4-connector-systems-c-114/>>. Acesso em novembro de 2018.

TIEPOLO, Gerson; Urbanetz, J.; Canciglieri. **INSERÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DO PARANÁ: ANÁLISE DO POTENCIAL PRODUTIVO**. Revista Sodebras, Vol. 8. Artigos publicados. Março, 2013.

RÜTHER, Ricardo; MONTENEGRO, Alexandre; ZOMER, Clarissa D.; RANCO, Danilo A.; SANTOS, Isis P.; URBANETZ JUNIOR, Jair; NASCIMENTO, Lucas R. do; PEREIRA JUNIOR, Luiz C.; PFISCHER, Paulo H.; BRAUN, Priscila; VIANA, Trajano de S.; GIRARDI, Fernando C. **Desempenho Energético de Três Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados a Edificações Urbanas e Conectados à Rede Elétrica**. 2007.

CASTRO, Rui M. G.; Introdução à Energia Fotovoltaica. Universidade de Lisboa, 2008.

ALMEIDA, Marcelo P. Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede. Dissertação de Mestrado em Energia, Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, SP.2012.

WENHAM, S. R. et al. **Applied photovoltaics**. 2ed. Australia: Centre for Photovoltaic Engineering of UNSW, 2009.

SOLAR ENERGY INTERNATIONAL. **Photovoltaics Design and Installation Manual**. Canadá: New Society Publishers, 2004.

CEMIG. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais – Volume II**. Belo Horizonte, 2016.

Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/pt>.

[br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/atlas_solarimetrico.pdf](http://www.cemig.com.br/pt/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/atlas_solarimetrico.pdf)> Acesso em: novembro de 2018.

FALCÃO, Djalma M. Espaço IEEE. **Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica**. Setembro 2013. Disponível em:

<http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/EspacoIEEE_set2013.pdf> Acesso em: novembro de 2018.

SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica. RIBEIRO, Paulo; FERREIRA, Flávia; MEDEIROS, Fábio. **Geração Distribuída e impacto na qualidade de energia**. Pará, Agosto 2005. Disponível em:<<http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/04/GERAC%CC%A7A%CC%83O-DISTRIBUI%CC%81DA-EIMPACTO-NA-QUALIDADE-DE-ENERGIA.pdf>> Acesso em: dezembro de 2018.

ABB. **Product manual PVI-5000/6000-TL-OUTD (5.0 to 6.0 kW)**. Disponível em:

<[https://library.e.abb.com/public/80fcc007c062421a84fc0891e1b4df83/PVI5000_6000-TL-OUTD-Product%20manual%20EN-RevC\(M000022CG\).pdf](https://library.e.abb.com/public/80fcc007c062421a84fc0891e1b4df83/PVI5000_6000-TL-OUTD-Product%20manual%20EN-RevC(M000022CG).pdf)> Acesso em: dezembro de 2018.