

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
RODRIGO ALEXANDRE DE CASTRO

**EFEITOS GERADOS POR INVERSORES FOTOVOLTAICOS NA REDE
ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA**

CASCADEL
2018

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
RODRIGO ALEXANDRE DE CASTRO

**EFEITOS GERADOS POR INVERSORES FOTOVOLTAICOS NA REDE
ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA**

Trabalho apresentado a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Centro Universitário Assis Gurgacz, do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Nelson Chetevik de Oliveira.

CASCADEL
2018

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
RODRIGO ALEXANDRE DE CASTRO**

**EFEITOS GERADOS POR INVERSORES FOTOVOLTAICOS NA REDE
ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Elétrica, do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob a orientação do Professor Nelson Chetevik de Oliveira.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. Esp. Nelson Chetevik de Oliveira
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz



Prof. Esp. Mario Elias Carvalho do Nascimento
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz



Prof. Esp. Maycon Roberto Boeling
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz

Cascavel/PR, 27 de Junho 2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Valdeci e Neliva, por sempre estarem ao meu lado incentivando e motivando. Dedico também de forma especial à minha Esposa, Vidiane, por ter sido modelo de inspiração e dedicação que fez com que eu conseguisse alcançar este objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de realizar mais essa conquista.

Ao Professor Nelson Chetevik de Oliveira, o qual direcionou o desenvolvimento deste trabalho, pelos conselhos e orientações, sempre se mostrando interessado e apoiando as novas ideias.

Aos meus colegas, que me ajudaram no decorrer da faculdade.

Aos meus Pais e familiares, que sempre me apoiaram em minhas decisões fazendo com que meus objetivos fossem alcançados.

E em especial. à minha Esposa, Vidiane Forlin, que sempre acreditou em mim, não deixando eu desanimar nos momentos difíceis, sempre me apoiando para que todo esse objetivo fosse alcançado.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”
Albert Einstein

RESUMO

Os sistemas de geração de energia tradicionalmente são projetados de modo que ficam centralizados, porém, com a entrada dos sistemas de geração distribuída, esse cenário está mudando, proporcionando novos desafios para o setor se adequar à nova realidade e buscar a reestruturação. A geração distribuída foi introduzida pela resolução 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, resolução que forçou uma mudança no perfil de manutenção e controle de suas redes e ativos pelas concessionárias, principalmente devido ao fluxo bidirecional. Os impactos nas redes de distribuição devem ser previsto e analisados, por assim garantir os padrões mínimos da qualidade de energia elétrica. Dentre os equipamentos utilizados pela geração distribuída, destacam-se os inversores fotovoltaicos, equipamentos não lineares, conversores de CA-CC, que sob certas condições produzem conteúdo harmônico com nível acima do limite normatizado, deformação do sinal senoidal da componente fundamental da onda de tensão ou corrente. Este trabalho visa a apresentar um estudo de análise das distorções harmônicas de tensão e corrente de um sistema de geração fotovoltaico. Serão apresentados fundamentações teóricas e parâmetros a respeito das distorções harmônicas, métodos e instrumentos utilizados, para realização do estudo, além das normas e recomendações para se utilizar como base.

Palavras-chaves: Distorções harmônicas. Geração distribuídas. Qualidade de Energia. Sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

The Power Generation Systems are traditionally designed so that they are centralized, but with the entry of distributed generation systems this scenario is changing, providing new challenges for the industry to adapt to the new reality and seek restructuring. The distributed generation, introduced by resolution 482/2012 of the National Agency of Electric Energy - ANEEL, a resolution that forced a change in the profile of maintenance and control of its networks and assets by the concessionaires, mainly due to the bidirectional flow. The impacts on distribution networks should be predicted and analyzed to ensure minimum standards of electric power quality. Among the equipment used by the distributed generation, stands out the photovoltaic inverters, non-linear equipment, AC-DC converters, which under certain conditions produce harmonic content with a level above the normalized limit, this deformation of the sinusoidal signal of the fundamental component of the current or voltage wave. This work aims to present a study of the harmonic distortion of voltage and current of a photovoltaic generation system, will be presented theoretical bases and parameters regarding the harmonic distortions, methods and instruments used, to carry out the study, besides the norms and recommendations to be used as base.

Key Words: Harmonic distortions. Distributed generation. Power quality. Photovoltaic systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distúrbios associados à energia elétrica	15
Figura 2 – Criação de forma de onda não linear, adicionando as formas de onda da frequência fundamental e o terceiro e quinto harmônico.	17
Figura 3 – Espectro de frequências harmônicas relacionado à Figura 2.....	17
Figura 4 – Sequência de componentes simétricas.....	27
Figura 5 – Efeito de frequência na capacidade de condução de corrente elétrica.....	29
Figura 6 – Fluxo harmônico sequência zero pelo condutor neutro	30
Figura 7 - Expectativa de vida dos transformadores com a presença de harmônica de corrente.	31
Figura 8 - Expectativa de vida dos transformadores com a presença de harmônica de tensão.....	32
Figura 9 – Placas solares instaladas em telhado de residência	33
Figura 10 – Placas solares instaladas em telhado de residência	34
Figura 11 – Sistema elétrico de potência com presença de geração distribuída.	35
Figura 12 - Células de silício monocristalino	36
Figura 13 - Células de silício policristalino	37
Figura 14 - Células de silício amorfo.	37
Figura 15 - Sistema de Energia Fotovoltaica.....	39
Figura 16 - Radiação média solar diária no período anual.....	41
Figura 17 – Analisador de Grandezas Elétricas RMS modelo MARH-21.....	44
Figura 18 – Esquema de ligação do Analisador de Grandezas Elétricas.	44
Figura 19 – Placas solares no telhado 1.	46
Figura 20 – Placas solares no telhado 2.	46
Figura 21 – Placa de dados emitida pelo fabricante dos inversores.	47
Figura 22 – Inversor Fotovoltaico utilizado	47
Figura 23 – Local de instalação do transformador rebaixador.....	48
Figura 24 – Gráfico da tensão fase A.....	50
Figura 25 – Gráfico da tensão fase B.....	50
Figura 26 – Gráfico da tensão fase C.....	51
Figura 27 – Gráfico da Corrente elétrica fase A.	51
Figura 28 – Gráfico da corrente elétrica fase B.	52
Figura 29 – Gráfico da corrente elétrica fase C.....	52
Figura 30 – DHT de tensão	53
Figura 31 – Variação Harmônica de corrente na fase A, 15h30.....	54
Figura 32 – Variação Harmônica de Corrente na fase A, 16h.	54
Figura 33 – Variação Harmônica de Corrente na fase A, 16h30.....	55
Figura 34 – Variação harmônica de Corrente na fase A, 17h.	55
Figura 35 – Variação Harmônica de Corrente na fase B, 15h30.....	56
Figura 36 – Variação Harmônica de Corrente na fase B, 16h.	56

Figura 37 – Variação Harmônica de Corrente na fase B, 16h30.....	57
Figura 38 – Variação Harmônica de Corrente na fase B, 17h.....	57
Figura 39 – Variação Harmônica de Corrente na fase C, 15h30.....	58
Figura 40 – Variação Harmônica de Corrente na fase C, 16h.....	58
Figura 41 - Variação Harmônica de Corrente na fase C, 16h30.....	59
Figura 42 – Variação Harmônica de Corrente na fase C, 17h.....	59
Figura 43 – Comparação Curva da Corrente e DHT.	60
Figura 44 – Display inversor fotovoltaico.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de distorção de tensão.....	19
Tabela 2 – Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição com tensão menor que 69 kV	19
Tabela 3 – Limites de harmônicos individuais em sistemas públicos de baixa tensão (240 a 420 V).....	20
Tabela 4 – Limites de corrente harmônica para equipamentos Classe A	21
Tabela 5 – Limites de corrente harmônica para equipamentos Classe C	21
Tabela 6 – Limites de corrente harmônica para equipamentos Classe D	21
Tabela 7 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)	22
Tabela 8 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em percentagem da tensão fundamental)	22
Tabela 9 – Classificação de harmônicos – Fluke	26
Tabela 10 – Classificação da sequência em um motor de indução - Fluke.....	26

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
DHT	- Distorção Harmônica Total
DTD	- Distorção Total de Demanda
EP	- Eletrônica de Potência
IEC	- Comissão Internacional Eletrotécnica (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IEEE	- Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
IHD	- Distorção Harmônica Individual (<i>Individual Harmonic Distortion</i>)
kWh	- Quilowatt hora
ONS	- Operador Nacional do Sistema
PRODIST	- Procedimentos de Distribuição
QEE	- Qualidade de Energia Elétrica
SIN	- Sistema Interligado Nacional
SFCR	- Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFI	- Sistema Fotovoltaico Isolado
TDD	- Distorção Harmônica Total (<i>Total Demand Distortion</i>)
THD _i	- Distorção Harmônica Total de Corrente
THD _v	- Distorção Harmônica Total de Tensão
UC	- Unidade Consumidora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	15
2.2 NORMAS, ÍNDICES E LIMITES PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS	16
2.3 RECOMENDAÇÃO DA NORMA IEEE 519-2014	19
2.4 RECOMENDAÇÃO DA NORMA IEC 61000-2-2	20
2.5 RECOMENDAÇÃO DA NORMA IEC 61000-3-2	20
2.6 RECOMENDAÇÃO DA ANEEL	21
3 INDICADORES HARMÔNICOS	23
3.1 DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAL (DHT)	23
3.2 DISTORÇÃO TOTAL DE DEMANDA (DTD)	24
3.3 DISTORÇÃO HARMÔNICAS INDIVIDUAL (DTI)	24
3.4 CLASSIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS	25
4 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS DISPOSITIVOS	28
4.1 EFEITOS EM MOTORES DE INDUÇÃO	28
4.2 EFEITOS EM EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS	29
4.3 EFEITOS NOS CABOS DE ALIMENTAÇÃO	29
4.4 EFEITOS EM DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	30
4.5 EFEITOS EM TRANSFORMADORES	31
4.6 EFEITOS NOS MEDIDORES DE ENERGIA	32
5 GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA	33
5.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO	36
5.2 CONTROLADOR DE CARGA	37
5.3 BATERIA	38
5.4 INVERSOR	38
5.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL	39
6 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA	43
6.1 TIPO DE ESTUDO E LOCAL DA PESQUISA	43
6.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	43
6.3 COLETA DE DADOS	43
6.4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ANALISADO	45
7 ANÁLISE DE DADOS	49
7.1 COMPORTAMENTO DA TENSÃO ELÉTRICA	49
7.2 COMPORTAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA	51
7.3 ANÁLISE DA DHT DE TENSÃO E CORRENTE	52
8 DISCUSSÃO	62
9 CONCLUSÃO	63
A. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

No início do século XX, entre 1910 e 1960, cargas lineares não ocorriam em uma quantidade significativa, sendo mais predominantes no setor industrial principalmente em processos baseados em fenômenos eletroquímicos ou eletrometalúrgicos. Posteriormente, surgiram iluminação de descarga, com reatores contribuindo o aumento de cargas não lineares nas indústrias e comércio (ISONI, 2014).

O crescimento acelerado do número de cargas não lineares nos sistemas de potência tem proporcionado um aumento apreciável nos níveis de distorção das formas de onda, tornando-os preocupantes para o bom desempenho dos sistemas elétricos (BARBOSA, 1988).

A crescente utilização de equipamentos baseados na eletrônica de potência (EP) desperta a relação entre esta área da engenharia elétrica e a qualidade de energia elétrica (QEE). Por meio desses equipamentos, é proporcionada uma forma de controle eficiente do fluxo de energia e de suas qualidades, porém, como consequência, estas cargas geram distorções harmônicas de corrente ou tensão na rede elétrica. As distorções harmônicas causam efeitos indesejados no sistema elétrico, tais como perdas por aquecimento, problemas de ressonância, aumentos das perdas por aquecimentos adicionais em banco de capacitores, degradação da exatidão de medidores de energia ativa por indução, sobretensões em sistema de iluminação entre outros (NASCIMENTO, 2007).

Assim, torna-se necessário medir o conteúdo harmônico do sistema para que se possa determinar uma forma de mitigar os problemas de distorção harmônica (TEIXEIRA, 2009).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

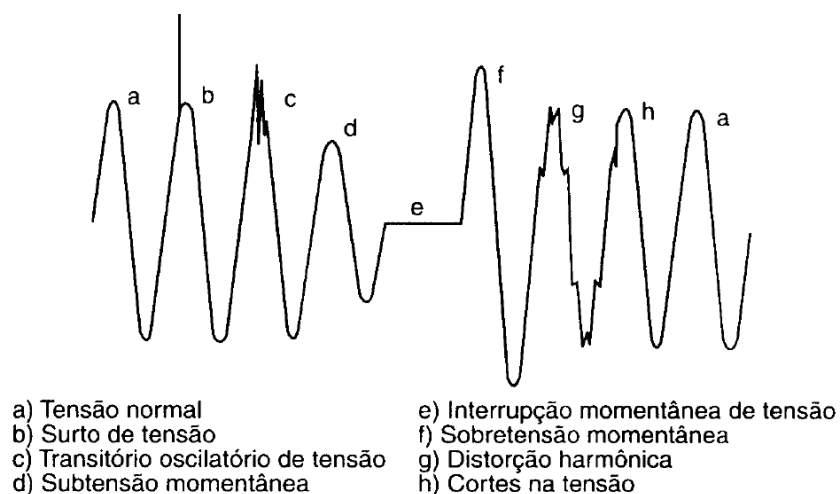
O setor de energia elétrica passa por profundas mudanças devido à alteração do perfil das cargas consumidoras, dos hábitos de consumo dos usuários frente ao uso de energia elétrica (SILVA, 2008). Essas mudanças podem ocasionar variações de tensão; mesmo estando dentro da norma, podem provocar alterações em equipamentos eletrônicos mais sensíveis.

A qualidade de energia elétrica não está relacionada somente ao suprimento de tensão adequada e à continuidade do serviço. É imprescindível o fornecimento de uma forma de onda de tensão praticamente senoidal, ou seja, desprovida de deformações (NASCIMENTO, 2007).

No passado, os equipamentos eram menos sensíveis a variações de tensões e a algum fenômenos que degradavam a QEE, porém, houve uma evolução nos equipamentos, fazendo com que eles necessitem de energia elétrica de alto nível. Então, os consumidores criam a expectativa de consumo sem nenhum mau funcionamento ou interrupção.

A Figura 1 apresenta alguns distúrbios associados à energia elétrica.

Figura 1 - Distúrbios associados à energia elétrica



Fonte: BALTAZAR (2007)

Tensão e frequência são duas variáveis básicas para medição de qualidade de energia elétrica, sendo que a frequência deve se manter em $60 \pm 0,5$ Hz. Já na tensão, são avaliadas outras características, como forma de onda, simetria da onda e amplitudes de tensões dentro dos limites aplicados pela regulamentação (SILVA, 2008).

O sistema elétrico brasileiro, além de ser grande, é complexo e está sujeito a problemas que afetam diretamente a QEE, provocando prejuízos (BALTAZAR, 2007).

A QEE em um sistema elétrico, segundo Nascimento (2007, p. 38). “deve operar com tensões e correntes senoidais, frequência constante, tensão nominal constante, tensões trifásicas equilibradas e fator de potência unitário”.

2.2 NORMAS, ÍNDICES E LIMITES PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS

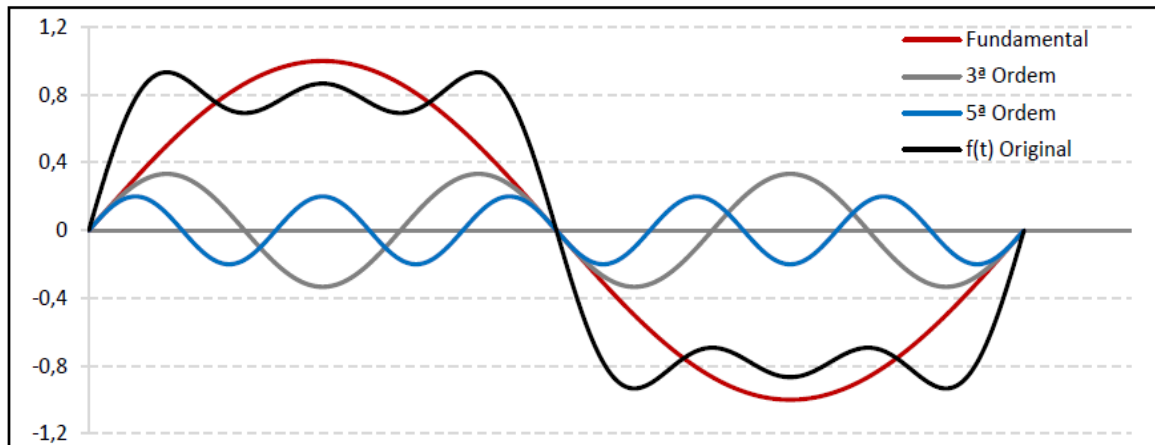
A probabilidade de uma instalação sofrer com uma má QEE depende totalmente da alimentação de energia elétrica fornecida pela concessionária, pelos tipos de cargas existentes e também pela sensibilidade da eletrônica aplicada nos equipamentos das mais variadas áreas com características de serem não lineares. Esse tipo de carga provoca distorções elétricas na rede, e tais distorções são as maiores preocupações para concessionárias e usuários como um todo, pois elas podem comprometer o perfeito funcionamento do sistema e seus componentes (SOUZA, 2008).

O termo harmônico inicialmente surgiu na música, representando uma vibração/onda que sendo múltipla da fundamental afeta a frequência original, provocando distorção do som original, e da mesma forma acontece na rede elétrica. São efeitos provocados na energia elétrica que causam distorção da frequência fundamental, 60 Hz, adotada no Brasil, em que seus múltiplos apresentam uma frequência múltipla inteira da fundamental, sendo a segunda harmônica duas vezes a fundamental, 120 Hz; a terceira harmônica, três vezes a fundamental, 180 Hz; e a n -ésima harmônica, n vezes a fundamental (SANKARAN, 2002).

Sempre que o equipamento causador da distorção estiver em funcionamento, a onda resultante da distorção será uma onda não senoidal, podendo ser vista na Figura 2. A onda senoidal de cor vermelha é a fundamental, frequência de 60 Hz, com frequência igual à da onda original, que apresenta a distorção provocada pelas harmônicas de 3ª e 5ª ordens respectivamente. Essa distorção não existirá quando o

equipamento for desligado ou através de outros meios que minimizam ou o eliminam da rede.

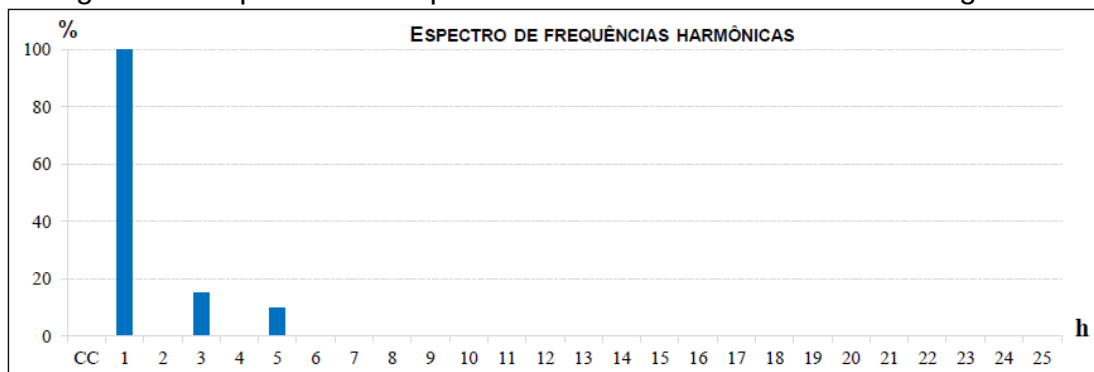
Figura 2 - Criação de forma de onda não linear, adicionando as formas de onda da frequência fundamental e o terceiro e quinto harmônico.



Fonte: FORTES (2016)

Nesses casos de deformações, quanto maior a ordem harmônica na rede menor sua capacidade de deformação do sinal fundamental. Na Figura 3, é apresentado o espectro de frequência da Figura 2, em que o espectro de frequência é a relação percentual à frequência fundamental de uma determinada componente harmônica representando graficamente a amplitude de cada componente, obtido através da transformada rápida de Fourier (em inglês *Fast Fourier Transform*).

Figura 3 – Espectro de frequências harmônicas relacionado à Figura 2.



Fonte: FORTES, (2016).

As principais normas vigentes e guias existentes sobre harmônicos são:

- i. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional Elétrico – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica.
- ii. Guia do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicas - IEEE Std 519-2014.
- iii. Norma da Comissão Eletrotécnica Internacional - IEC 61000.
- iv. Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS – Procedimento de Rede – Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela coordenação e operação dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), elaborando normas que são aprovadas pela ANEEL. Os limites estabelecidos pelas normas devem ser obedecidos rigorosamente no território Brasileiro (TEIXEIRA, 2009).

A Comissão Eletrotécnica de Internacional (IEC) é uma instituição não governamental sem fins lucrativos, de normatização internacional, que publica e elabora normas técnicas para assuntos de eletrônica, eletricidade e áreas relacionadas, estabelecendo valores máximos de injeção de harmônicos produzidos por equipamentos individuais no sistema elétrico (TEIXEIRA, 2009). O IEC possui as seguintes normas para a regulamentação das distorções harmônicas: IEC 61000-2-2 e IEC 61000-3-2, sendo que a IEC 61000-2-2 estabelece o padrão de qualidade para o fornecimento de energia elétrica; já a norma IEC 61000-3-2 refere-se às limitações da injeção harmônica de corrente na rede pública por equipamentos individuais (DECKMANN e POMILIO, 2010).

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) estabelece os limites para a injeção de harmônicos no sistema elétrico, recomendações essas que se originam por meio da experiência de profissionais da área. Apesar de a IEEE ser uma referência mundial, estes limites não podem ser encarados como uma norma em vigor (TEIXEIRA, 2009). IEEE 519-2014 é uma prática recomendada pela IEEE, em que descreve níveis aceitáveis de harmônicos para o ponto de entrega de energia pela concessionária.

2.3 RECOMENDAÇÃO DA NORMA IEEE 519-2014

A norma IEEE 519 trata com divisão da responsabilidade do problema de harmônicos entre os consumidores e a concessionária, tratando os limites de distorções de tensão no ponto de ligação. Conforme Tabela 1, estes são de responsabilidade da concessionária, e os limites de distorção de corrente, conforme Tabela 2, no mesmo ponto, são de responsabilidade dos consumidores. Ela limita a distorção dos harmônicos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), ponto físico que liga a concessionária e o consumidor, sem levar em consideração cada consumidor individualmente (HADDAD,2004).

Tabela 1 - Limites de Distorção de Tensão

FAIXA DE TENSÃO	DISTORÇÃO INDIVIDUAL POR HARMÔNICO (%)	DISOTRÇÃO TOTAL TENSÃO – THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Fonte: IEEE 519 – 2014

Tabela 2 – Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição com tensão menor que 69 kV

DISTORÇÃO DE CORRENTE EM PERCENTUAIS DE I_{carga}						
Harmônicas Individuais						
$I_{\text{cc}}/I_{\text{carga}}$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$H \geq 35$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares

I_{cc} = corrente máxima de curto-circuito.

I_{carga} = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental).

Fonte: IEEE 519 – 2014 – Adaptado pelo autor.

2.4 RECOMENDAÇÃO DA NORMA IEC 61000-2-2

Como referência mundial para medições dos níveis de harmônicos, a norma IEC 61000 apresenta parâmetros tabelados conforme cada situação para sistemas de distribuição, fornecendo as características da tensão no ponto de entrega ao consumidor, parâmetros esses para baixa tensão, conforme Tabela 3, e em média tensão, sob condições normais de operação (HADDAD, 2004).

Tabela 3 – Limites de harmônicos individuais em sistemas públicos de baixa tensão (240 à 420 V).

Ordem Ímpar	Tensão Harmônica (%)	Ordem Ímpar – múltiplo de 3	Tensão Harmônica (%)	Ordem Par	Tensão Harmônica
5	6.0	3	5.0	2	2
7	5.0	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3.0	21	0.2	8	0.5
17	2.0	>21	0.2	10	0.2
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3x25/h				
THDv (até o 40º harmônico) < 8%					
Valores em relação a tensão fundamental					

Fonte: IEC 61000-2-2, 2004 – Adaptado pelo autor.

2.5 RECOMENDAÇÃO DA NORMA IEC 61000-3-2

Os aparelhos que consomem uma corrente eficaz menor que 16 A por fase são divididos em quatro classes (PIRES, 2006).

- Classe A: Aparelhos com alimentação trifásica equilibrada e todos os demais que não se enquadram nas outras classes.
- Classe B: aparelhos portáteis.
- Classe C: aparelhos para iluminação, incluindo dispositivos *dimmer*.
- Classe D: aparelhos contendo uma forma de onda de corrente de entrada especial, com uma potência ativa de entrada menor que 600 W.

Os limites para a Classe A estão na Tabela 4, para os equipamentos da Classe B basta utilizar os índices na Tabela 4 e multiplicar por 1,5. Os equipamentos

da Classe C estão relacionados com seus índices na Tabela 5. Já a Tabela 6 mostra os limites para os equipamentos da Classe D (PIRES, 2006)

Tabela 4 – Limites de corrente harmônica para equipamentos Classe A

Ordem Harmônica (h)	Máxima Corrente (A)	Ordem Harmônica (h)	Máxima Corrente (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.4	8-40	0.23 x 8/h
11	0.33		
13	0.21		
15-39	0.15 x 15/h		

Fonte: Pires, 2006 – Adaptado pelo Autor.

Tabela 5 – Limites de corrente harmônica para equipamentos Classe C

Ordem Harmônica (h)	Máxima Corrente (%)*
2	2
3	30% x fator de potência
5	10
7	7
9	5
11-39	3

*Em relação à corrente fundamental

Fonte: PIRES, 2006 – Adaptado pelo Autor.

Tabela 6 – Limites de corrente harmônica para equipamentos Classe D

Ordem Harmônica (h)	Máxima Corrente	
	Por watt (mA/W)	(A)
2	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.50	0.40
11	0.35	0.33
13	0.296	0.21
15-39	3.86/h	2.25/h

Fonte: PIRES, 2006 – Adaptado pelo Autor.

2.6 RECOMENDAÇÃO DA ANEEL

A ANEEL trata sobre qualidade de Energia através do PRODIST – Módulo 8, em que sugere limites harmônicos por consumidor, conforme Tabela 07, e globais, conforme Tabela 08, para sistemas de tensões menores de 1 kV até 230 kV.

Tabela 7 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$		$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$
Ímpares não Múltiplas de 3	5	7.5	6	4.5	2.5
	7	6.5	5	4	2
	11	4.5	3.5	3	1.5
	13	4	3	2.5	1.5
	17	2.5	2	1.5	1
	19	2	1.5	1.5	1
	23	2	1.5	1.5	1
	25	2	1.5	1.5	1
	>25	1.5	1	1	0.5
Ímpares Múltiplas de 3	3	6.5	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
Pares	2	2.5	2	1.5	1
	4	1.5	1	1	0.5
	6	1	0.5	0.5	0.5
	8	1	0.5	0.5	0.5
	10	1	0.5	0.5	0.5
	12	1	0.5	0.5	0.5
	>12	1	0.5	0.5	0.5

Fonte: ANEEL, 2010 – Adaptado pelo autor.

Tabela 8 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em percentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13.8 \text{ kV}$	8
$13.8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	3

Fonte: ANEEL, 2010 – Adaptado pelo autor.

3 INDICADORES HARMÔNICOS

Para manter uma qualidade de energia de alto nível, é necessário que as distorções harmônicas sejam mensuradas e avaliadas para que seja possível visualizar se estão dentro das regulamentações vigentes, assegurando assim um nível máximo de harmônicos tolerados pelo sistema elétrico. Esses indicadores são utilizados para quantificar e analisar os efeitos das distorções harmônicas. Dentro de vários indicadores existentes, os principais utilizados são a distorção harmônica total (DHT) e a distorção total de demanda (DTD).

3.1 DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAL (DHT)

Dentre todos os indicadores, a distorção harmônica total (DHT – *Total Harmonic Distortion*) é o mais utilizado, sendo também a referência mundial mais adotada como principal parâmetro. É importante saber que a DHT não é uma informação completa, uma vez que o valor da magnitude de tensão e corrente fundamental para poder avaliar os efeitos causados no sistema elétrico (TEIXEIRA, 2009). A DHT pode ser calculada para corrente como para tensão, em que essas informações não são valores completos. A DHT de tensão e corrente pode ser dadas por:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

onde:

h – número inteiro (ordem harmônica);

V_h – valor rms da componente de tensão harmônica h ;

V_1 – valor rms de tensão fundamental;

I_h – valor rms da componente de corrente harmônica h ;

I_1 – valor rms de corrente fundamental.

O valor da distorção harmônica total pode ser nulo, e nesse caso quando ocorre indica que a forma de onda analisada não possui distorção harmônica, assim também podendo ser um indicador que pode representar uma ação conjunta de distorções em relação à componente fundamental.

3.2 DISTORÇÃO TOTAL DE DEMANDA (DTD)

A DTD é uma informação completa, uma vez calculada sempre é calculada em relação à corrente máxima. Este indicador é uma recomendação IEEE 519 para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga. A função matemática é parecida com a DHT, a diferença é que a DTD calcula em relação à corrente máxima da carga, e a DHT utiliza a corrente fundamental no horário da medição (TEIXEIRA, 2009). A DTD é dada por:

$$DHT_1 = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \quad (3)$$

onde:

h – número inteiro de ordem harmônica;

I_L – Corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema;

I_h - valor rms da componente de corrente harmônica h .

3.3 DISTORÇÃO HARMÔNICAS INDIVIDUAL (DTI)

É uma relação entre amplitudes de tensão da componente harmônica e da tensão fundamental. Para a tensão fundamental, podem-se encontrar três definições. A primeira é o valor real obtido no momento da operação; a segunda utiliza a tensão nominal do barramento a ser analisado; e a terceira utiliza um valor de referência definido pelo usuário. Assim também aplicado à componente de corrente. As equações (4) e (5) expressam tais definições.

$$DHI_v = \frac{v_n}{v_1} \times 100(\%) \quad (4)$$

$$DHI_i = \frac{I_n}{I_1} \times 100(\%) \quad (5)$$

Onde:

DHI_v – Distorção harmônica individual de tensão;

DHI_i – Distorção harmônica individual de corrente;

V_n – Valor eficaz de tensão de ordem n ;

I_n – Valor eficaz de corrente de ordem n ;

V_1 – Valor eficaz de tensão fundamental;

I_1 – Valor eficaz de corrente fundamental.

O cálculo da distorção harmônica individual é para identificar a porcentagem de determinada componente harmônica em relação à sua componente fundamental.

3.4 CLASSIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS

Cada harmônico possui nome, frequência e sequência. O nome é para manter uma ordem; a frequência é em relação à fundamental, múltipla dela; e a sequência refere-se à rotação física com respeito ao fundamental. Por exemplo, em um motor de indução, um harmônico de sequência positiva gera um campo magnético que gira na mesma direção do fundamental; já um harmônico de sequência negativa gira na direção oposta. Abaixo, segue a Tabela 09 com os primeiros harmônicos junto com seus efeitos.

Tabela 9 – Classificação de harmônicos – Fluke

ORDEM	FREQ. (Hz)	SEQUÊNCIA
1º	60	+
2º	120	-
3º	180	0
4º	240	+
5º	300	-
6º	360	0
7º	420	+
8º	480	-
9º	540	0

Fonte: O autor.

Tabela 10 – Classificação da sequência em um motor de indução - Fluke

SEQUÊNCIA	ROTAÇÃO	EFEITOS (Efeitos de superfície, correntes parasitas, etc.)
Positiva (+)	Adiante	Aquecimento de condutores, interruptores de circuito, etc.
Negativa (-)	Reversa	Aquecimento de condutores, interruptores de circuito, etc. mais problemas de motor
Zero	Nenhuma	Aquecimento mais o aumentos no neutro dos sistema trifásico de 4 fios

Fonte: O autor.

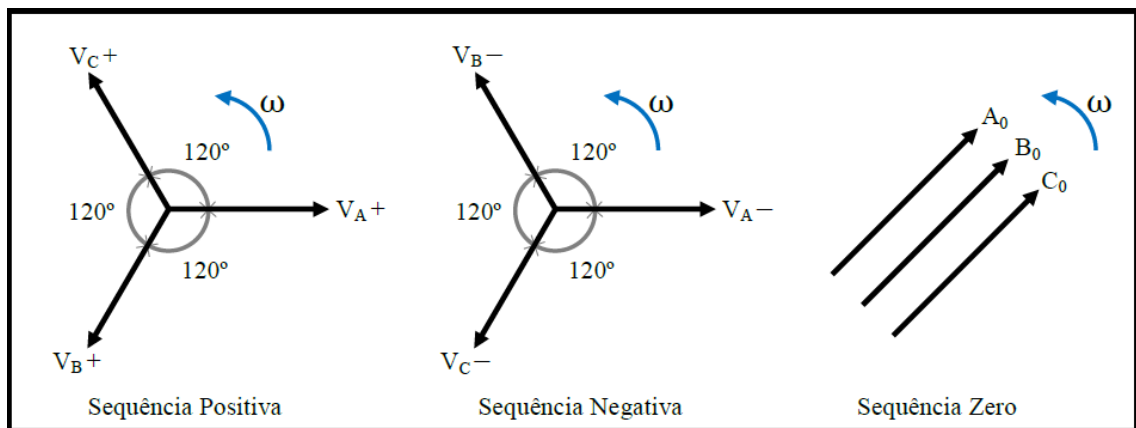
A sequência de fases é definida pela ordem na qual as tensões das fases passam pelo seu valor máximo. A sequência de fase A-B-C é chamada de direta ou positiva; a sequência A-C-B é denominada como inversa ou negativa. Já na sequência zero, não há giro de campo devido à ausência de defasamento angular (FORTES, 2016).

- Componentes de sequência positiva: conjunto com três fasores de igual amplitude defasados 120° com rotação no sentido de A-B-C;
- Componentes de sequência negativa: conjunto com três fasores de igual amplitude defasados 120° com sequência de A-C-B;

- Componentes de sequência zero: conjunto com três fasores de magnitude igual e fase angular sobrepostos, acompanhando o sentido angular de referência.

A Figura 4 ilustra o sentido da velocidade angular (ω) adotado como referência, assim como as rotações de campo.

Figura 4 - Sequência de componentes simétricas.



Fonte: FORTES, 2016.

4 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS DISPOSITIVOS

Em geral, a distorção harmônica provoca na rede elétrica vários problemas indesejáveis nos quais se apresenta certa dificuldade de atenuação. Nos tempos modernos, devido às cargas não lineares, é inevitável a presença de distorções harmônicas, sendo os principais:

- Sobreaquecimento no condutor de neutro;
- Tensões elevadas entre condutores de neutro e terra;
- Interferência nos sistemas de computação e comunicação de dados;
- Queima de motores de indução;
- Sobreaquecimento nos transformadores;
- Atuação indevida de proteções sem causa detectável;
- Erro de medição de grandezas elétricas.

Os efeitos dos harmônicos são sentidos por todos os equipamentos do sistema elétrico, mesmo pelos que não geram distorções, porém alguns equipamentos sentem mais e outros não sofrem com essa distorção. Quando se apresenta um elevado nível de distorção harmônica, existe um aumento no nível de paradas por falha de operação, aumentando a dificuldade da manutenção de encontrar os defeitos e as causas (NASCIMENTO, 2007).

A seguir, são apresentados alguns componentes e efeitos causados por essas distorções tão indesejadas.

4.1 EFEITOS EM MOTORES DE INDUÇÃO

Motores com fonte de alimentação com componentes harmônicas possuem um aumento das perdas no núcleo por correntes de Foucault, assim como perdas no cobre devido ao aumento de correntes eficaz de entrada, podendo apresentar um aumento na temperatura interna, afetando assim o isolamento dos condutores internos.

A presença de campos magnéticos resultantes de correntes harmônicas provocam velocidades diferentes e até mesmo sentidos diferentes. As harmônicas de

sequência negativa induzem forças que tendem a fazer com que o motor gire em sentido contrário, e essas componentes de sequência negativa influenciam negativamente no rendimento e interferindo no desempenho do motor.

Outro fenômeno que afeta as máquinas rotativas é o aumento do ruído audível se comparado com a alimentação senoidal (FITZGERALD, 2006).

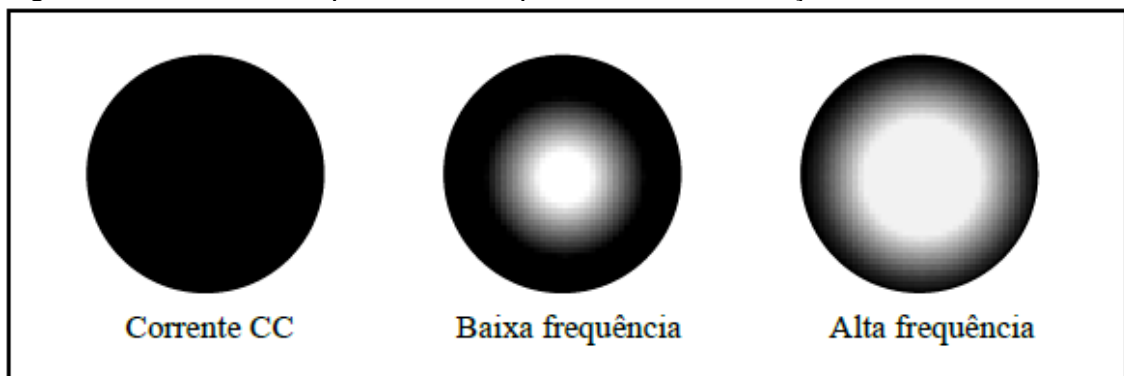
4.2 EFEITOS EM EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

Os equipamentos eletrônicos são susceptíveis a falhas de operação devido a componentes harmônicos. Computadores, equipamentos similares, controladores lógicos programáveis, como equipamentos da área médica que necessitam de alta precisão do funcionamento, podem sofrer várias consequências como acionamentos indevidos e leitura incorretas de sinais. Para os utilizados na área hospitalar, é necessário realizar trabalhos frequentes para que os harmônicos sejam reduzidos através de filtros.

4.3 EFEITOS NOS CABOS DE ALIMENTAÇÃO

Os cabos apresentam perdas consideráveis em função do efeito peculiar, o qual reduz a seção condutora para componentes de alta frequência, como ilustra a Figura 5. Como em sistemas de corrente contínuo há presença de frequências no sinal, o condutor aproveita melhor sua seção transversal, devido à utilização total de sua área útil.

Figura 5 - Efeito de frequência na capacidade de condução de corrente elétrica.

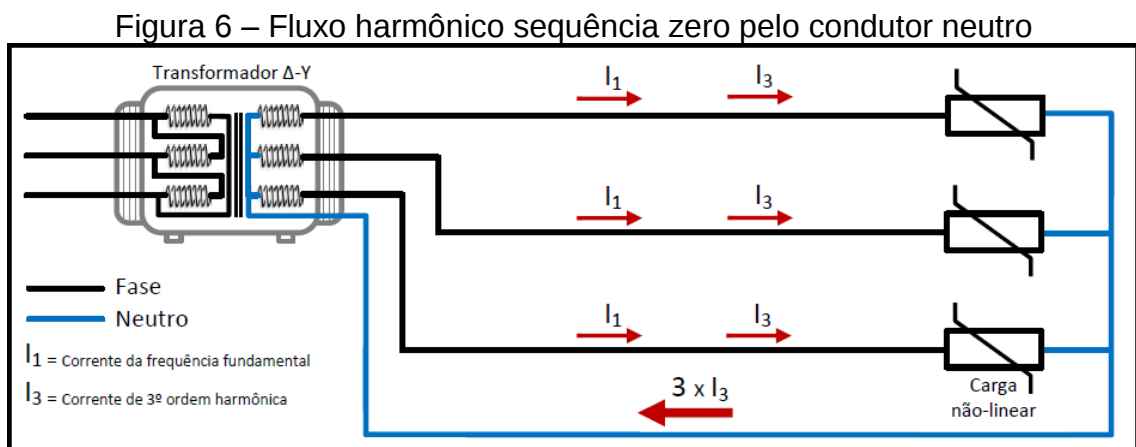


Forte: FORTES, 2016.

Aumento da resistência do condutor aumenta assim a sua temperatura (Efeito Joule) em razão dos campos magnéticos gerados pelos demais condutores (FITZGERALD, 2006).

Outro aspecto de grande importância é a sobrecarga do condutor neutro, ocasionada por correntes harmônicas triplas, conhecidas como *triplen harmonics*, sendo múltiplas de terceira ordem e prevalecente de sequência zero. Essas correntes harmônicas, por não possuírem defasamento angular entre si, não se anulam, ocasionando uma soma algébrica das correntes de cada fase no condutor neutro e uma diferença de potencial entre neutro e terra e também o sobreaquecimento do condutor (FORTES, 2016).

A Figura 6 apresenta o esquema elétrico com alimentação de três cargas monofásicas não lineares, mesmo valor de impedância, em que demonstra a circulação da componente de sequência zero pelo neutro devido à presença da terceira harmônica.



Fonte: FORTES, 2016.

4.4 EFEITOS EM DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

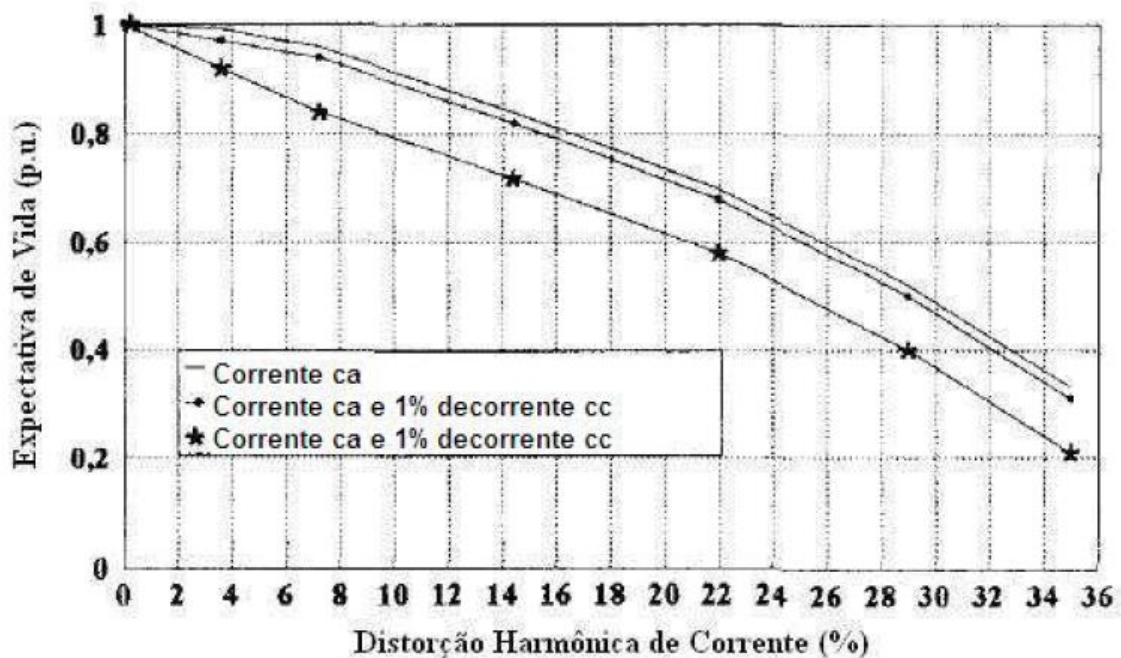
Os dispositivos utilizados para proteção sofrem com a presença de harmônicos, podendo assim gerar uma atuação indevida, e o tempo de atuação de seu conjugado também pode ser influenciado pela presença de harmônicos. Já os relés eletromecânicos dependem da passagem por zero e do pico de tensão ou corrente. Uma vez que a presença de harmônicos na rede pode provocar deformação na onda, não se pode garantir o funcionamento correto (TEIXEIRA, 2009).

4.5 EFEITOS EM TRANSFORMADORES

Equipamentos projetados para trabalhar levando em consideração que as ondas de corrente e tensão serão perfeitamente senoidais. Transformadores podem ter consequências como um ruído audível até elevadas perdas nos enrolamentos, causando sobreaquecimento e consequentemente diminuição da sua vida útil, devido à presença de harmônicos nas redes ou quando transformadores alimentam cargas que geram muitos harmônicos (TEIXEIRA, 2009).

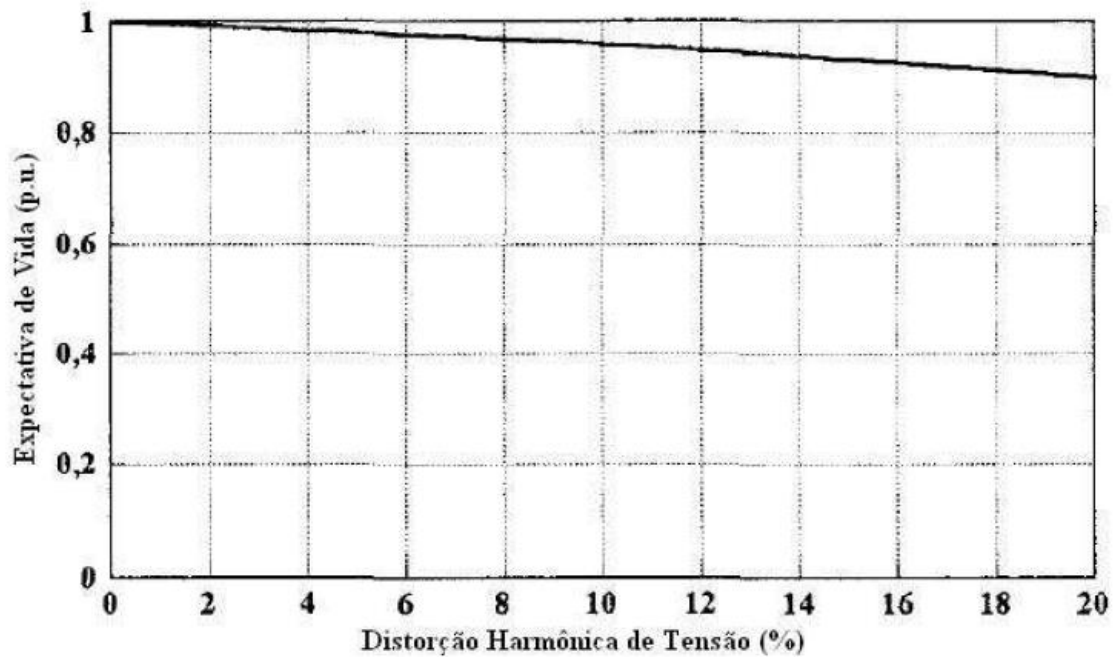
As distorções harmônicas de tensão são menos prejudiciais para o transformador provocando um aumento da perda em seu núcleo. Já as distorções harmônicas de corrente afetam o transformador de forma mais impactante, provocando maiores perdas devido ao aquecimento maior em seus enrolamentos. As Figuras 7 e 8 mostram a expectativa de vida para o transformador que sofre com a presença de harmônicos de corrente e tensão respectivamente.

Figura 7 - Expectativa de vida dos transformadores com a presença de harmônica de corrente.



Fonte: TEIXEIRA, 2009.

Figura 8 - Expectativa de vida dos transformadores com a presença de harmônica de tensão.



Fonte: TEIXEIRA, 2009.

4.6 EFEITOS NOS MEDIDORES DE ENERGIA

Os medidores de energia a disco de indução sofrem com a presença de harmônicos, pois não são eficientes e tolerantes à frequência fora da faixas. Isso acontece pois são fabricados e calibrados para que operem sob condições de frequência constante, bem como tensões e correntes de formato senoidal, assim, quando o circuito sofre com distorções harmônicas, faz com produza leituras com erros, podendo fazer com que o disco acelere ou desacelere ocasionando erros de medição (BARBOSA, 1988).

5 GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia do sol pode ser utilizada para gerar energia elétrica, através do efeito fotovoltaico, que consiste eventualmente na conversão da radiação solar em energia elétrica. Este sistema tem a característica de produzir corrente elétrica que é coletada e processada por dispositivos conversores e controladores, podendo ser armazenada em baterias, consumida diretamente ou até utilizada em sistemas diretamente conectados à rede elétrica.

Esse tipo de geração, além de poder constituir usinas de geração, competindo com outras tradicionais fontes, pode ser facilmente instalado e adaptado à arquitetura, pode ser adaptado em qualquer tipo de espaço desde que se tenha incidência de luz solar e atenda aos requisitos mínimos necessários para que o sistema trabalhe com sua máxima eficiência, utilizando assim ao máximo da energia que a radiação solar possa nos oferecer no local, como telhados, paredes e fachadas. É uma forma de contribuir para o suprimento de energia cuja produção é local de energia limpa sem emissão de gases poluentes, resíduos ou ruídos, ainda podendo ser integrada nas cidades e nos grandes centros urbanos. A Figura 9 mostra um exemplo de instalação das placas solares em uma residência.

Figura 9 – Placas solares instaladas em telhado de residência



Fonte: VILLALVA e JONAS, 2013.

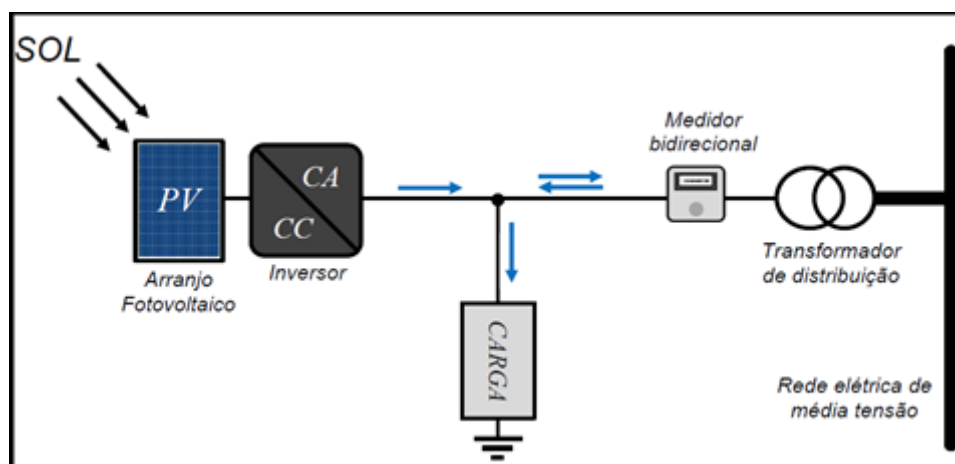
São dois tipos de geração fotovoltaica usadas, o Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI) e o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR). Ambos os sistemas basicamente são os mesmos. O SFI geralmente é utilizado onde não há rede elétrica,

sendo necessária a utilização de baterias para armazenar a energia elétrica gerada e não utilizada. Já no caso do SFCR, que é visto como uma geração distribuída, é conectado à rede elétrica, utilizando assim a energia fornecida pelo sistema fotovoltaico nos momentos de produção, tendo seu excedente injetado na rede elétrica secundária para posteriormente ser utilizado em forma de compensação, quando não há produção de energia pelo sistema, e também em casos que não há produção se utilizar a energia fornecida pela concessionária (URBANETZ JUNIOR, 2010). A Figura 10 mostra o fluxo de potência em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Na configuração da Figura 10, não é necessária a utilização de baterias, de modo que, quando não houver a produção de energia pelo SFCR, a rede elétrica secundária da concessionária irá suprir a demanda da carga, podendo ser em dias nos quais o SFCR não produz o suficiente, mas principalmente em períodos noturnos. Em casos quando há uma falha no fornecimento ou mesmo um desligamento pela concessionária de energia, o inversor deve ter a capacidade de detectar a falta de tensão da rede e por motivos de segurança se desconectar da rede, mesmo quando a radiação solar e o sistema seja capaz de suprir a demanda da carga.

Essa característica serve para proteger a integridade de funcionários da concessionária que possam eventualmente realizar uma manutenção na rede, porém, também protege o inversor.

Figura 10 – Placas solares instaladas em telhado de residência



Fonte: FORTES, 2016.

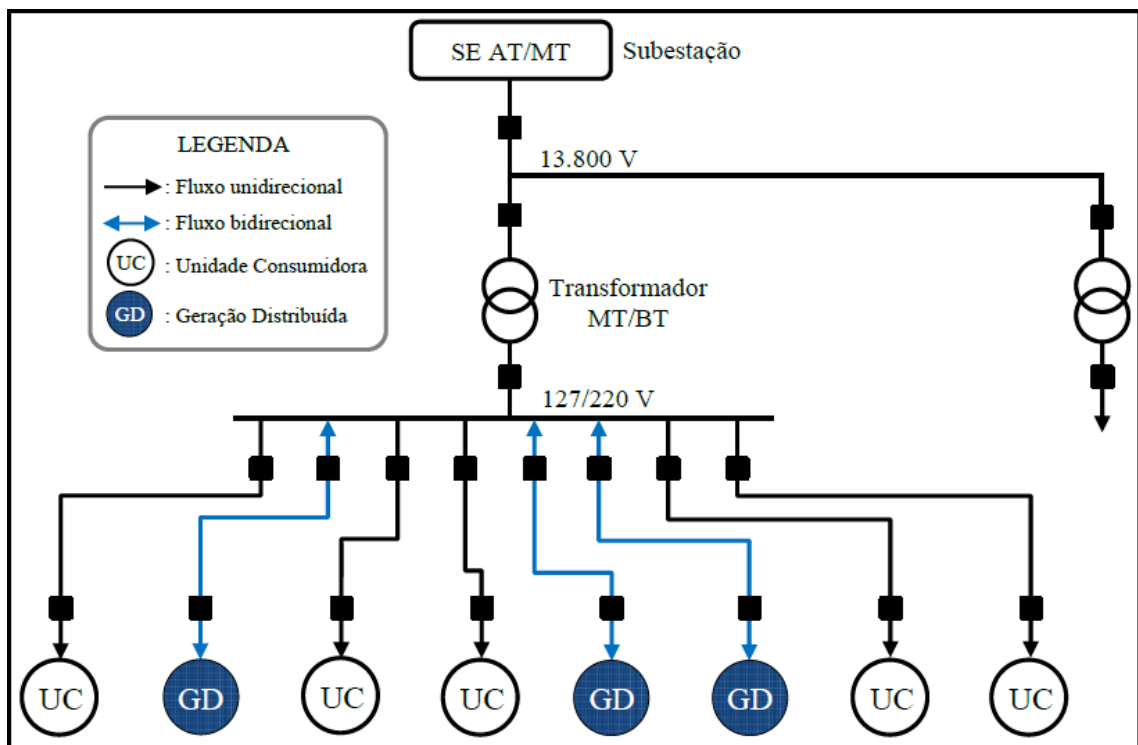
O sistema de geração distribuída SFCR para o consumidor pode reduzir a oscilação da frequência e da tensão, maior segurança de fornecimento de energia, já

para o caso das concessionárias, pode ter uma diminuição de perdas nas linhas de distribuição e transmissão, adiantamento ou até exclusão da necessidade de investimento para expansão nas linhas de transmissão ou diminuição no carregamento das redes (SOUSA e NERYS, 2011).

Entretanto, existem pontos negativos: maior dificuldade na operação da rede de distribuição, devido à utilização de fluxo bidirecional; maior complexidade de controle da tensão da rede durante o período de carga leve; aumento do nível de distorção harmônica; e descontinuidade de geração, devido à dificuldade de previsão de geração de energia.

Na Figura 11, segue uma representação de como é um sistema elétrico de potência com algumas unidades consumidoras possuindo um SFCR e outras não. As unidades geradoras de energia estão representadas como geração distribuída (GD), e as demais somente como unidades consumidoras (UC).

Figura 11 – Sistema elétrico de potência com presença de geração distribuída.



Fonte: FORTES, 2016.

5.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos geradores, construídos por uma junção PN, que tem a função de transformar a energia radiante do Sol diretamente em energia elétrica; a potência produzida varia conforme a quantidade e potência do painel instalado. Os dois principais elementos semicondutores utilizados na composição dos painéis solares fotovoltaicos são o silício cristalino (c-Si) e o silício amorfo hidrogenado (a-Si) (RUTHER, 2004). As células de silício monocristalino são obtidos em fornos especiais. Devido ao processo de extração, ele possui um elevado custo de produção, por ser mais criterioso e que exige uma maior quantidade de materiais e energia, com eficiência em torno de 15% a 18%. Na Figura 12, segue uma forma da célula de silício monocristalino.

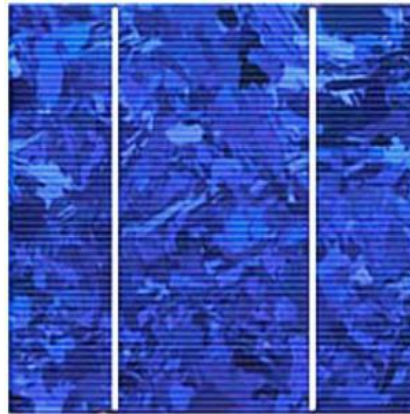
Figura 12 - Células de silício monocristalino



Fonte: EPE, 2012.

As técnicas utilizadas para obtenção das células de silício policristalino são no modo geral as mesmas para obtenção do silício monocristalino. Entretanto, é necessário um menor rigor e também menor demanda por energia (EPE, 2012). Segundo Rütther (2004), as células de silício policristalino apresentam eficiência menor que o silício monocristalino devido ao seu processo possuir uma perfeição cristalina menor, tendo uma eficiência média em torno de 14,5% a 16,2%. Seguem na Figura 13 células de silício policristalino.

Figura 13 - Células de silício policristalino



Fonte: EPE, 2012.

Para se fabricar as células de silício amorfo, não é necessária muita energia, pois as temperaturas são consideradas baixas (menos de 300°C) quando comparadas à fabricação de células de silício cristalino. É possível a utilização de substratos com valores de mercado inferiores, como vidros e alguns tipos de plásticos. Contudo, graças aos substratos, já se tem no mercado células flexíveis aumentando a versatilidade para seu uso. A eficiência quando comparado a silício cristalino é relativamente baixa em torno de 5% a 8%. Na Figura 14, seguem células de silício amorfo.

Figura 14 - Células de silício amorfo.



Fonte: EPE, 2012.

5.2 CONTROLADOR DE CARGA

É um dispositivo não destinado à produção de energia, e sim apenas para realizar através do controle eletrônico o controle do estado de carga da bateria, mantendo-a protegida de uma possível descarga excessiva e de sobrecarga por

excesso de produção pelo módulo, impedindo assim o aquecimento da bateria, o que evita a diminuição da vida útil da bateria. Ele também gerencia a carga da bateria respeitando seu perfil natural de carga. O estágio de absorção garante um carregamento completo, tendo em vista que para atingir os 100% de carga deve ter uma controle minucioso para que a bateria não se danifique e, por fim, o estágio de flutuação. Nesse estágio, o controlador detecta que a bateria está com carga completa, assim o controlador apenas mantém a bateria carregada, controlando sua faixa de tensão, de acordo com as características de cada fabricante de bateria.

5.3 BATERIA

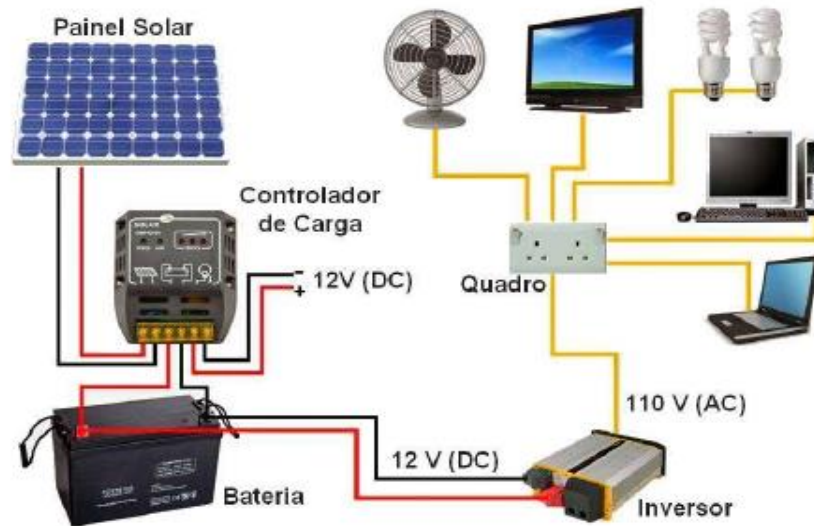
Utilizadas em sistemas isolados e afastados da rede elétrica, as baterias são convenientes para armazenamento de carga e suprir a necessidade diária quando tiver momentos de baixo índice de insolação e períodos noturnos, sendo assim normal nesses tipos de ligação. Existem vários tipos de baterias, seladas ou abertas, sendo que nas seladas não há necessidade de adição de água. As baterias de chumbo ácido são as mais conhecidas e utilizadas, podendo o ácido ser líquido ou em gel. Nos sistemas fotovoltaicos, não se recomenda o uso de baterias automotivas convencionais, pois para esses casos é necessária a utilização de baterias estacionárias. As baterias estacionárias foram desenvolvidas com características de fornecimentos de energia por um longo tempo, também podendo atingir uma porcentagem menor de sua carga máxima sem se danificar.

5.4 INVERSOR

É um equipamento eletrônico que converte a tensão e corrente contínua (CC) em tensão e corrente alternadas (CA). O inversor é necessário em sistemas fotovoltaicos para alimentar sistemas e consumidores em corrente alternada a partir de uma corrente contínua produzida pelo módulo fotovoltaico ou armazenada na bateria. Existem vários modelos de inversores, podendo encontrar das mais variadas potências e também nas tensões de entrada de 12 V, 24 V ou 48 V. Normalmente, utiliza-se inversor com entrada de 12 V para até oito módulos fotovoltaicos, já para sistemas de potência maior são utilizados inversores com entradas maiores para que

se tenha um nível de corrente elétrica menor. A Figura 15 representa a ligação de um sistema fotovoltaico completo.

Figura 15 - Sistema de Energia Fotovoltaica.



Fonte: BSB ENERGIA SOLAR.

5.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

A diferença que o Brasil possui para outros países considerados referência em uso de tecnologias fotovoltaicas, como Alemanha, Itália e Espanha, é grande no âmbito de geração de energia do sistema fotovoltaico. Um fato que bloqueia o avanço das pesquisas e melhorias nos incentivos é que o Brasil possui um potencial muito grande sobre outras fontes de energias renováveis, como hidrelétricas, podendo considerar também as eólicas, que acabam desestimulando as pesquisas.

O cenário nacional está mudando. Até meados da década passada, a utilização da energia solar fotovoltaica era mais para suprimentos de energia, para bombeamento de água, irrigação, iluminação pública e energia nas escolas e centros comunitários em comunidades isoladas na região Norte e Nordeste, bem como para monitoramento remoto e estações telefônicas onde não possui rede elétrica (ANNEEL,2005).

O número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede deve aumentar consideravelmente, graças à Resolução Normativa nº 687/2015, que altera a Resolução ANEEL nº 482/2012 e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição

– PRODIST, o qual autoriza e regulamenta a unidade consumidora a gerar a sua própria energia elétrica através de fontes renováveis, podendo ter ou não excedente exportável, tendo como uma fonte de energia solar fotovoltaica em sistemas de micro e minigeração, ligados à rede de energia elétrica distribuída, com condição e possibilidade de haver créditos em relação à energia excedente produzida. Ainda, pode ser utilizada em momentos de falta de produção (VILLALVA E GAZOLI, 2013). Além da resolução 482/2012 que impulsiona a utilização de geração fotovoltaica, há constante queda no custo dos equipamentos, o que facilita ainda mais a utilização do sistema instalados conectados à rede de distribuição.

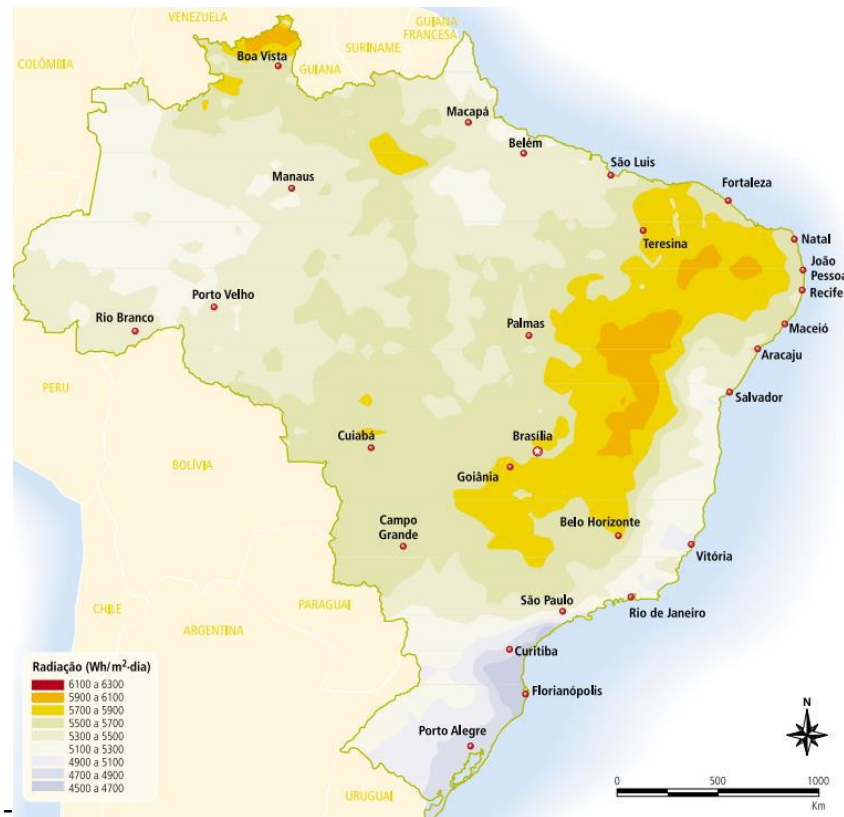
De acordo com Galdino (2012), no período de 2001 a 2012, houve uma queda importante no custo dos equipamentos, passando em 2001 de aproximadamente 30 R\$/Wp (Reais por Watt-pico) para cerca de 9 R\$/Wp em 2012 e ainda deve seguir uma redução média de 1,7 R\$/Wp por ano, conforme interpolação obtida pelo autor. O Brasil possui um potencial energético para a utilização da geração fotovoltaica inegável. Para efeito de comparação entre o Brasil e a Alemanha, que é uma referência mundial, o índice de radiação solar na Alemanha em sua região mais ensolarada é 40% menor do que a irradiação na região menos ensolarada do Brasil (CABRAL, TORRES E SENNA, 2013).

Para os consumidores conectados à rede elétrica de baixa tensão, mesmo quando a energia elétrica injetada na rede seja superior ao consumo, ainda será faturado o custo para se ter energia com disponibilidade no sistema, valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) e 100 kWh (trifásico).

A geração de energia fotovoltaica é considerada alternativa e renovável, muitas vezes utilizados esses termos como sinônimos, mas não são: as fontes renováveis de energia são aquelas que possuem elementos que possam ser facilmente recompostos pela natureza em curto prazo, sendo também inesgotável. Já as fontes alternativas de energia são aquelas que podem ser consideradas e adotadas como substitutas de uma fonte convencional (FORTES, 2016).

A Figura 16 ilustra a média anual de radiação diária no Brasil, expressa em Wh/m².dia.

Figura 16 - Radiação média solar diária no período anual.



Fonte: Atlas de energia elétrica do Brasil (2005).

O Brasil nos últimos tempos, apesar de ter altos níveis de irradiação solar no seu território, não apresenta uma relevância igual a outros países, pois apesar de termos melhorado nos últimos anos algumas políticas de incentivo à fonte solar, o financiamento ainda é limitado para empreendimentos de pequeno porte e para unidades de pessoa física. Já em países como a Alemanha, há investimentos principalmente em fortes políticas públicas de incentivos, como benefícios fiscais e eficientes mecanismos regulatórios. A Resolução 482/2012 da ANEEL vem melhorando e atraindo cada vez mais interessados para a implantação do sistema de geração fotovoltaico.

Em relação ao sistema de compensação de energia elétrica, referente ao excedente da energia ativa injetada no sistema da concessionária local, a caráter de empréstimo gratuito, a unidade consumidora passa a ter créditos em quantidade de energia ativa, podendo consumir em um prazo máximo de cinco anos. Esses créditos podem ser abatidos do consumo de energia da unidade geradora ou em outra unidade

consumidora de titularidade diferente. Vemos abaixo três formas de compensação conforme previsto na resolução 687/2015 da ANEEL.

- Autoconsumo remoto: unidades consumidoras que estejam sob o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa jurídica (CNPJ), com unidades consumidoras diferentes do local no qual o sistema está gerando energia;
- Sistema de geração compartilhada: sistema de concessão ou permissão, através de consórcio ou cooperativa, composta por uma reunião de consumidores composta por pessoa jurídica ou física;
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: unidades consumidoras em propriedades caracterizadas como condomínios ou em uma mesma propriedade, com porcentagens de compensação definidas pelos próprios consumidores.

6 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

6.1 TIPO DE ESTUDO E LOCAL DA PESQUISA

O presente estudo trata de uma análise da qualidade do inversor fotovoltaico em relação à emissão de distorções harmônicas na rede elétrica de distribuição secundária, realizado em um centro de eventos na cidade de Toledo – PR.

A pesquisa é classificada como sendo de natureza aplicada, com abordagem qualitativa, levando em consideração o aumento do uso de geração de energia através do sistema fotovoltaico.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

O centro de eventos escolhido teve seu sistema de geração instalado recentemente, que está conectado à rede para realizar o envio da energia excedente para a rede com o objetivo de utilizá-la quando não possuir condições de geração pelo sistema fotovoltaico.

6.3 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada com um analisador de grandezas elétricas do fabricante RMS, modelo MARH-21, conforme Figura 17, permitindo analisar o comportamento harmônico das corrente e tensões de forma individualizada no inversor fotovoltaico.

As grandezas principais medidas foram registradas em intervalos de integração de um minuto: frequência, tensão, corrente, distorção harmônica total de tensão, distorção harmônica total de corrente com respectivos ângulos de fase e outros indicadores de qualidade de energia.

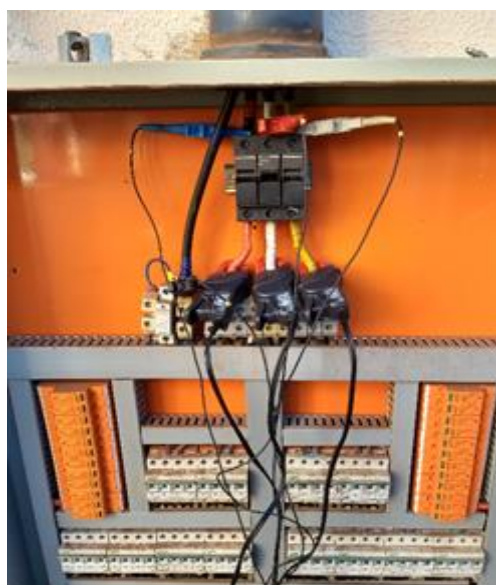
Figura 17 – Analisador de Grandezas Elétricas RMS modelo MARH-21.



Fonte: O Autor.

O equipamento foi instalado na saída do quadro de distribuição logo após os inversores fotovoltaicos, antes de os cabos chegarem ao medidor da concessionária, colocados diretamente no disjuntor principal, conforme Figura 18. Nesse ponto, foram conectados para leitura quatro cabos, um em cada fase, e o quarto no neutro, e colocados três transformadores de corrente tipo alicate nas três fases do circuito.

Figura 18 – Esquema de ligação do Analisador de Grandezas Elétricas.



Fonte: O Autor.

O equipamento foi instalado com o propósito de realizar medições no momento de transição, do período de alta produção para o período de baixa produção. Buscou-se avaliar a qualidade da energia elétrica quando o inversor fotovoltaico está tendo uma produção muito abaixo da sua capacidade nominal, sendo esses momentos os de baixa insolação, ocorrendo com maior intensidade no início da manhã, no final da tarde, bem como na presença de sombreamentos, esses ocasionados por diversos fatores, como sujeira acumulada ao longo do tempo, árvores, prédios, folhas que caíam sobre as módulos solares e por nuvens, obstruindo totalmente ou parcialmente o arranjo fotovoltaico.

6.4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ANALISADO

O projeto foi desenvolvido para funcionar em uma configuração de condomínio, podendo ter várias unidades consumidoras beneficiando-se da energia produzida por uma unidade principal, um jeito mais moderno de se realizar geração compartilhada. Foram instalados 188 módulos solares, três inversores fotovoltaicos e um transformador com configuração de rebaixador.

Os painéis fotovoltaico foram instalados sobre dois telhados, com orientação norte. É possível verificar na Figura 19 que partes dos painéis foram instaladas sobre um suporte, devido à inclinação negativa do telhado. Assim, não seria possível ter a instalação nesse ponto garantindo uma eficiência na produção, pois sairia dos padrões corretos de instalação. Já na Figura 20, verifica-se como ficou a instalação dos demais painéis fotovoltaicos.

Figura 19 – Placas solares no telhado 1.



Fonte: O Autor.

Figura 20 – Placas solares no telhado 2.



Fonte: O Autor.

Os inversores da marca Renovigi, modelo ST20000TL, com potência de 20 (vinte) kWp cada, foram instalados dentro de uma cabine para proteção, sendo que dentro dessa mesma cabine fica instalado o transformador com configuração de rebaixador, sendo que a tensão das saídas dos inversores fotovoltaicos tem 380 V (trezentos e oitenta). Então, é necessário rebaixar para 220 V (duzentos e vinte), assim podendo ser conectado à rede da concessionária.

A Figura 21 tem as informações do inversor que o fabricante disponibiliza, na placa de dados fixada na lateral do inversor, assim com a Figura 22 mostra um inversor instalado.

Figura 21 – Placa de dados emitida pelo fabricante dos inversores.



Fonte: O Autor.

Figura 22 – Inversor Fotovoltaico utilizado



Fonte: O Autor.

Sobre o transformador, não foi possível especificar mais informações, devido ao administrador do centro de eventos não possuir. Como o sistema estava energizado por motivos de segurança, não foi aberta a caixa de proteção, mas a Figura 23 mostra o local onde ele está instalado.

Figura 23 - Local de instalação do transformador rebaixador



Fonte: O Autor.

7 ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados foi realizada buscando avaliar o processo de transição solar, em que o sistema fotovoltaico começa a parar de produzir energia elétrica devido a uma potência baixa proveniente dos painéis solares ocasionada pela baixa emissão de radiação solar, motivada pela chegada do período noturno e o momento no qual entra apenas o fornecimento pela concessionária. A leitura de informações foi realizada no quadro de distribuição, saída do sistema fotovoltaico que interliga com a entrada de serviço da concessionária.

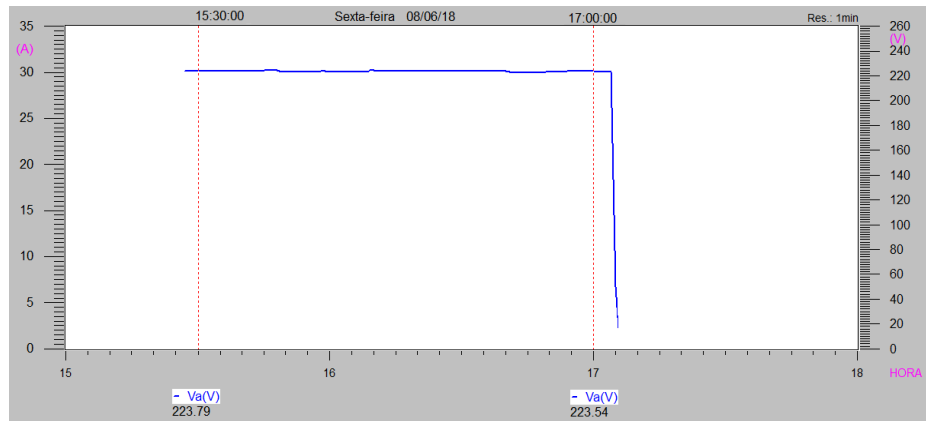
As medições foram realizadas no dias 08, 09 e 10 de junho de 2018, das 15h30 até as 17h, levando em consideração que no ponto a ser realizado a medição a tensão nominal fase-fase é de 380 V (trezentos e oitenta), por estar antes do transformador rebaixador.

7.1 COMPORTAMENTO DA TENSÃO ELÉTRICA

Durante o período de medições, as tensões permanecem praticamente constantes, sofrendo variações consideradas normais. As Figuras 24, 25 e 26 mostram o gráfico constante da tensão ao longo do tempo.

Na Figura 24, no início das medições, a tensão de fase encontrava-se em 223,79 V e, no final, em 223,54 V, sofrendo poucas e pequenas variações ao longo do tempo.

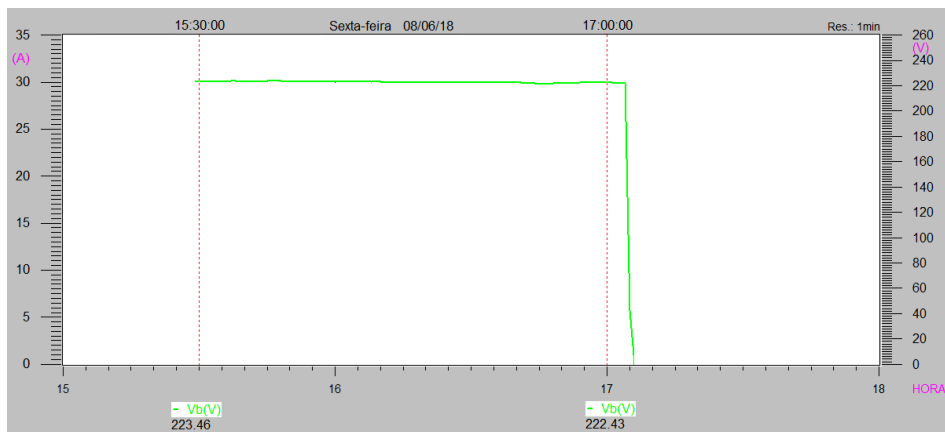
Figura 24 – Gráfico da tensão fase A.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

Na Figura 25, no início das medições, a tensão de fase encontrava-se em 223,46 V e, no final, em 222,43 V, sofrendo poucas e pequenas variações ao longo do tempo.

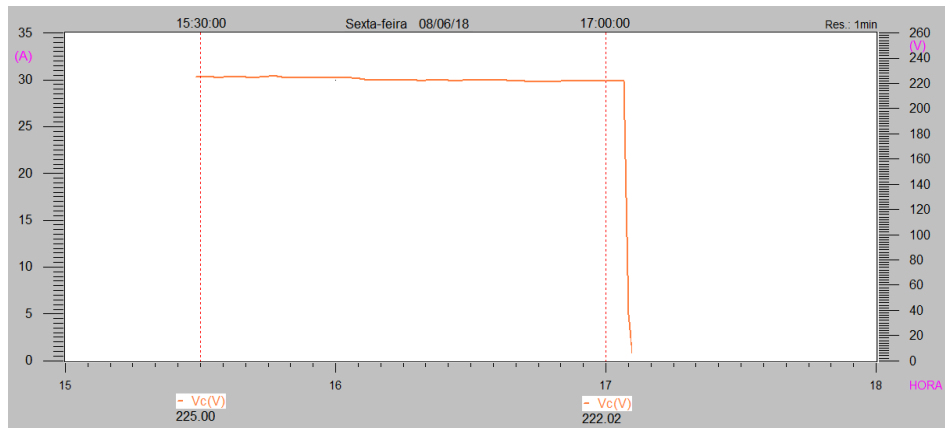
Figura 25 – Gráfico da tensão fase B.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

Na Figura 26, no início das medições, a tensão de fase encontrava-se em 225,00 V e, no final, em 222,02 V, sofrendo poucas e pequenas variações ao longo do tempo.

Figura 26 – Gráfico da tensão fase C.



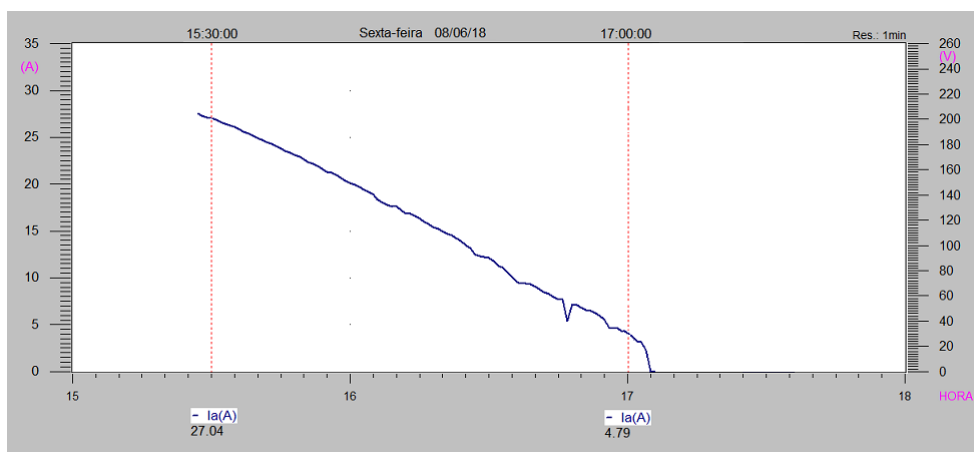
Fonte: Software RMS ANAWIN.

7.2 COMPORTAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA

Para o caso da corrente elétrica, conforme foi chegando o final da tarde, a potência de geração de energia elétrica foi decaindo e a corrente elétrica também foi diminuindo, como se pode observar nas Figuras 27, 28 e 29 das respectivas fases A, B e C.

Na Figura 27, no início das medições, a corrente de fase encontrava-se em 27,04 A e, no final, em 4,79 A.

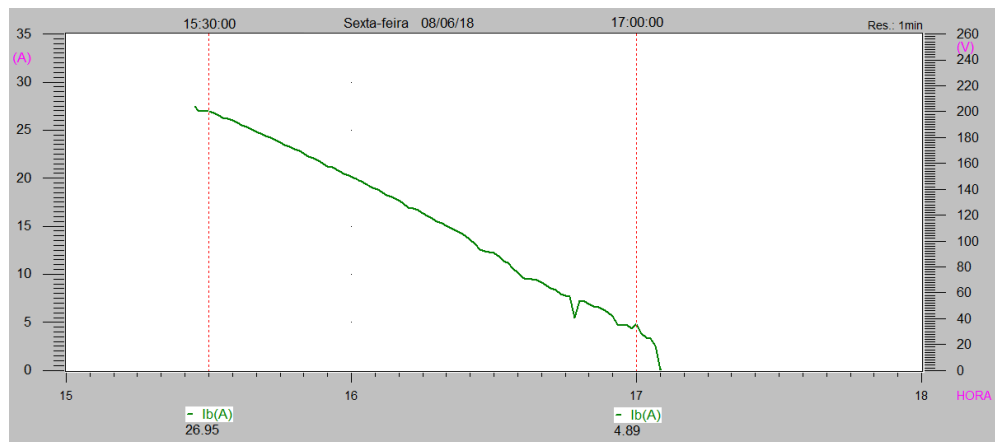
Figura 27 – Gráfico da Corrente elétrica fase A.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

Na Figura 28, no início das medições, a corrente de fase encontrava-se em 26,95 A e, no final, em 4,89 A.

Figura 28 – Gráfico da corrente elétrica fase B.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

Na figura 29, no início das medições, a corrente de fase encontrava-se em 27,08 A e, no final, em 4,77 A.

Figura 29 - Gráfico da corrente elétrica fase C.

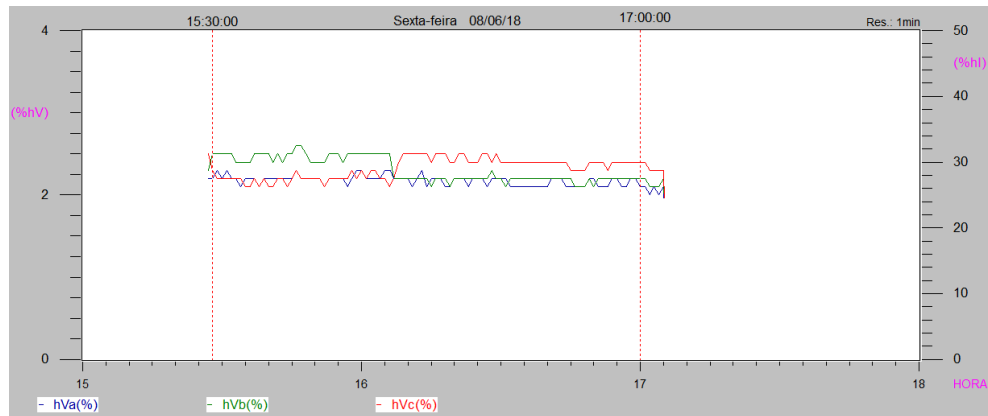


Fonte: Software RMS ANAWIN.

7.3 ANÁLISE DA DHT DE TENSÃO E CORRENTE

Para as componentes harmônicas de tensão e corrente, foram obtidas variações diferentes. As distorções de tensão mantiveram-se por volta de 2% conforme os gráficos a seguir respectivamente das fases A, B e C. As distorções mantiveram-se dentro dos limites conforme o PRODIST Módulo estipula.

Figura 30 – DHT de tensão



Fonte: Software RMS ANAWIN.

A distorção harmônica para a fase A estava às 15h30 com DHT=2,12%. Às 16h, com DHT=2.22%. Às 16h30, com DHT=2.11%. Às 17h, com DHT=2.08%.

A distorção harmônica para a fase B estava às 15h30 com DHT=2,13%. Às 16h, com DHT=2.51%. Às 16h30, com DHT=2.16%. Às 17h, com DHT=2.14%.

A distorção harmônica para a fase C estava às 15h30 com DHT=2,12%. Às 16h, com DHT=2.17%. Às 16h30, com DHT=2.36%. Às 17h, com DHT=2.32%.

Essas distorções foram praticamente constantes, variando somente de 2.08 até 2.51%, podendo ser consideradas desprezíveis, sem a possibilidade de afetar a rede elétrica, por estar dentro dos padrões exigidos pelas normas.

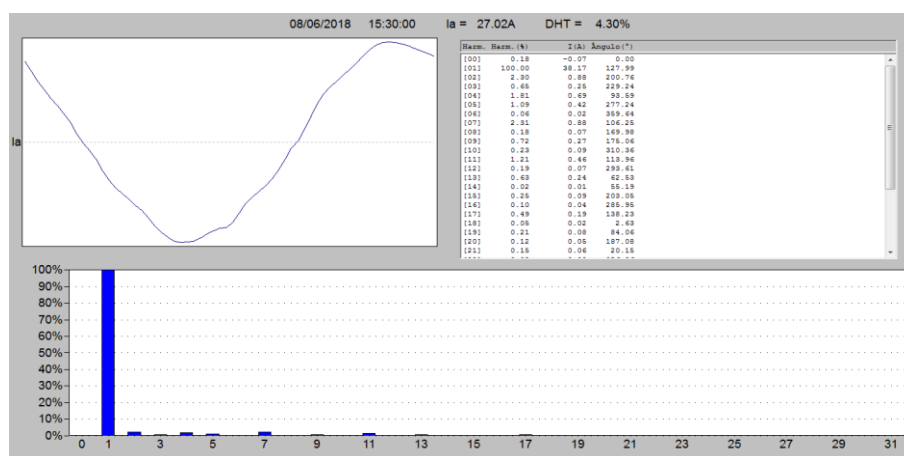
E para as distorções harmônicas de correntes foram obtidos gráficos com alterações mais substanciais, essas que com o passar da hora e o chegar do final da tarde sofreram mais distorção, mantendo uma relação de menor potência de produção de energia elétrica com uma maior distorção provocada pelo inversor fotovoltaico. Assim, pode-se afirmar que o horário de pico foi aproximadamente no período das 11h até as 13h. A produção de distorção de harmônicas de corrente é pequena e já na situação de começo da manhã e no final da tarde, quando a sua produção está muito abaixo da sua nominal, a distorção harmônica provocada pelo inversor aumenta ocasionando maiores condições indesejáveis na rede elétrica.

Segundo Deckmann e Pomilio (2017), a variação da DHT de tensão é uma boa indicação, desde que a frequência da fundamental seja relativamente constante, algo que não pode se dizer sobre a DHT de corrente que pode ser mais impactante sobre o circuito, ainda mais quando exista alteração da componente fundamental,

devido à variação de carga. Essa situação pode ser considerada quando o sistema fotovoltaico está gerando energia direto para rede e não está tendo consumo, então a variação de carga é constantemente modificada.

A Figura 31 mostra o espectro harmônico e a distorção na senoide de corrente da fase A com uma DHT de 4.30 % às 15h30, com pouca deformação.

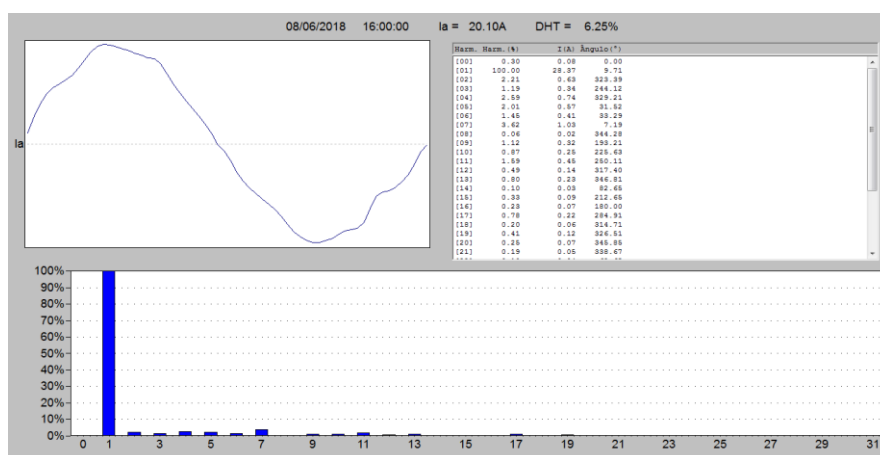
Figura 31 – Variação Harmônica de corrente na fase A, 15:30 h.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

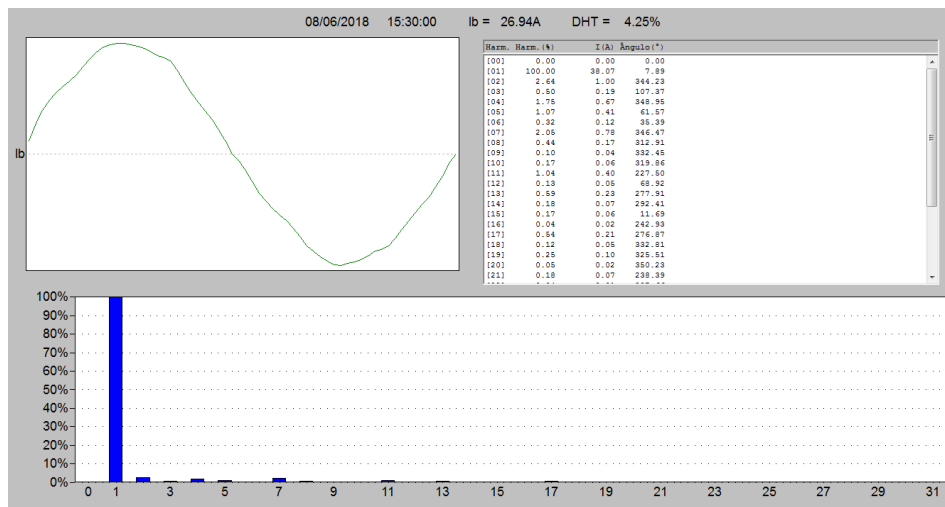
A Figura 32 mostra o espectro harmônico e a distorção na senoide de corrente da fase A com uma DHT de 6.25 % às 16h. Neste momento, com pouca deformação apresentada na senoide.

Figura 32 – Variação Harmônica de Corrente na fase A, 16h.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

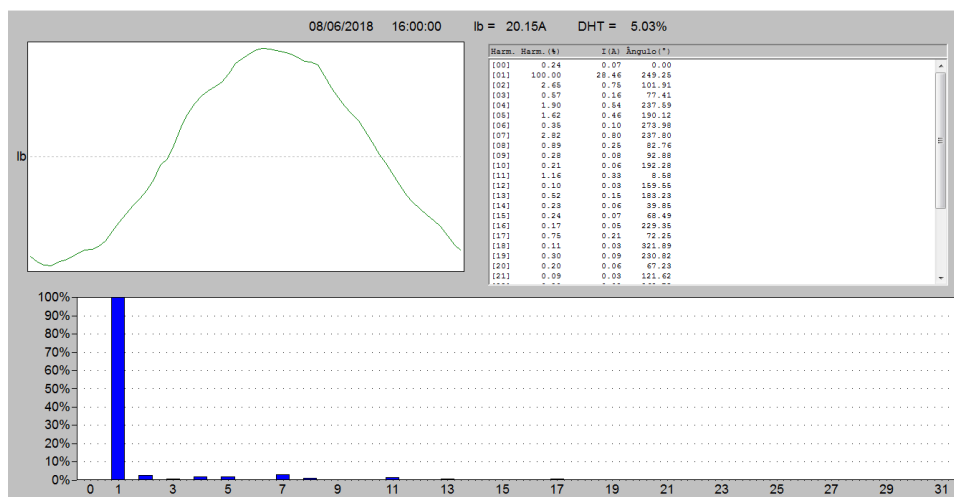
Figura 35 – Variação Harmônica de Corrente na fase B, às 15h30.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

A Figura 36 mostra o espectro harmônico e a distorção na senóide de corrente da fase B com uma DHT de 5.03% às 16h. Neste momento, com pouca deformação apresentada na senóide.

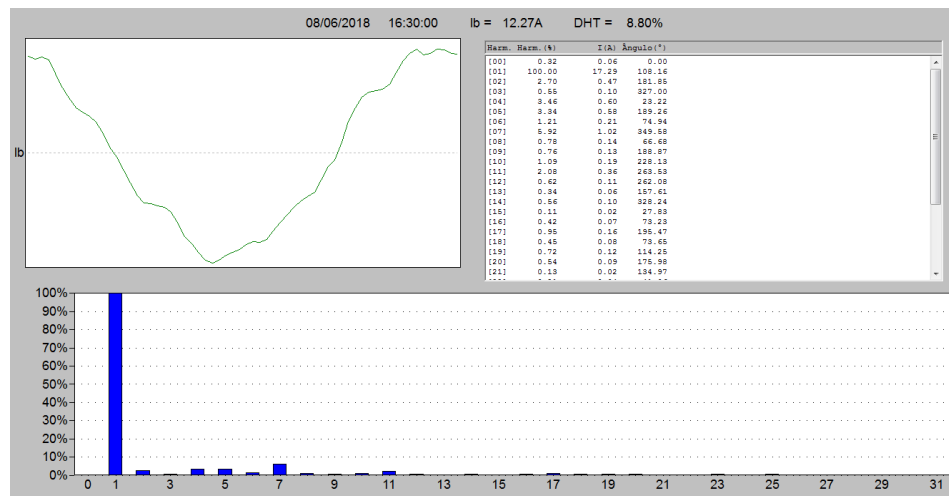
Figura 36 - Variação Harmônica de Corrente na fase B, às 16h.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

A Figura 37 mostra o espectro harmônico e a distorção na senoide de corrente da fase B com uma DHT de 8.80% às 16h30. Neste momento, com uma deformação um pouco mais substantiva na senoide.

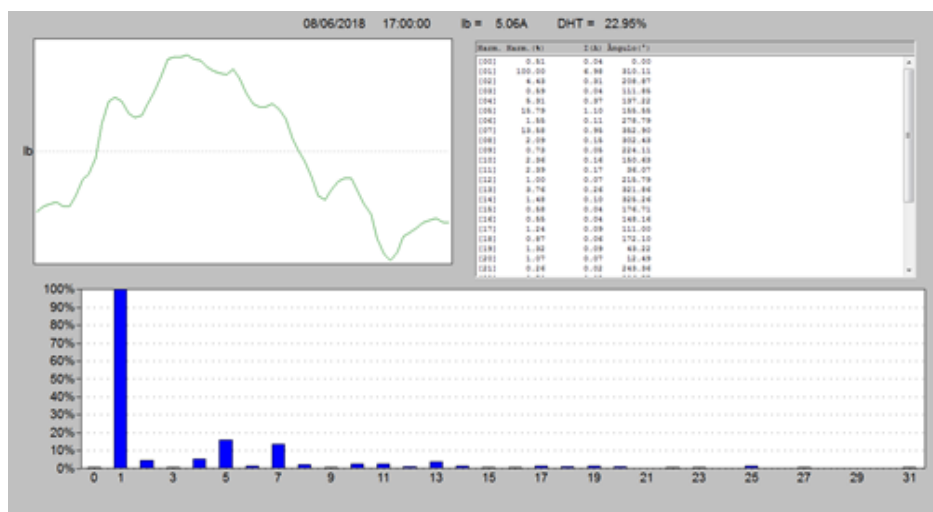
Figura 37 – Variação Harmônica de Corrente na fase B, às 16h30.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

A Figura 38 mostra o espectro harmônico e a distorção na senoide de corrente da fase B com uma DHT de 22.95% às 17h. Neste momento, com deformação que impacta diretamente na qualidade da senoide.

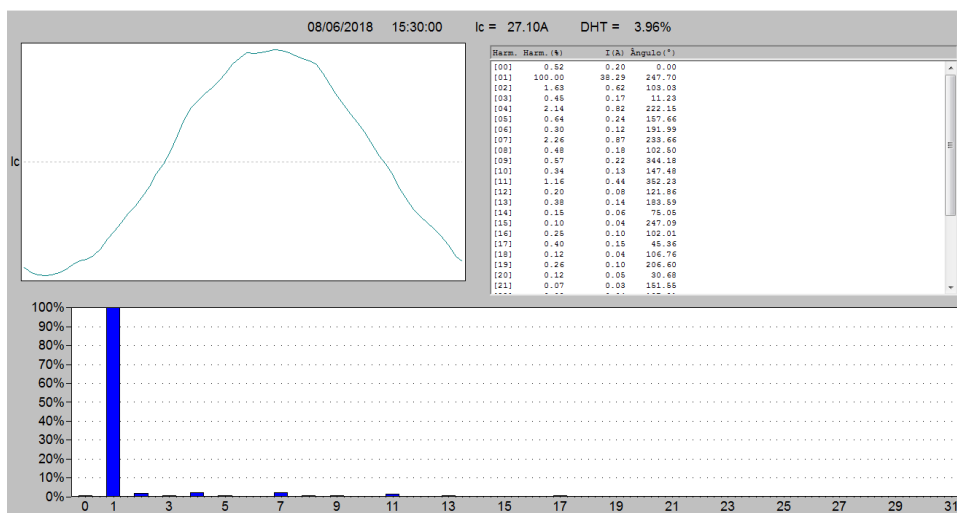
Figura 38 – Variação Harmônica de Corrente na fase B, às 17h.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

A Figura 39 mostra o espectro harmônico e a distorção na senoide de corrente da fase C com uma DHT de 3.96 % às 15h30, com pouca deformação.

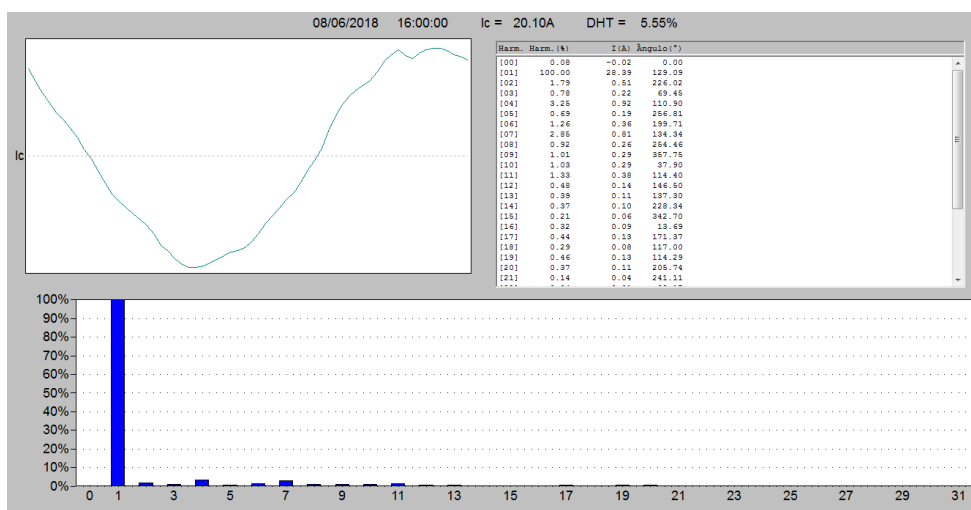
Figura 39 – Variação Harmônica de Corrente na fase C, às 15h30



Fonte: Software RMS ANAWIN:

A Figura 40 mostra o espectro harmônico e a distorção na senoide de corrente da fase C com uma DHT de 5.55% às 16h. Neste momento, com pouca deformação apresentada na senoide.

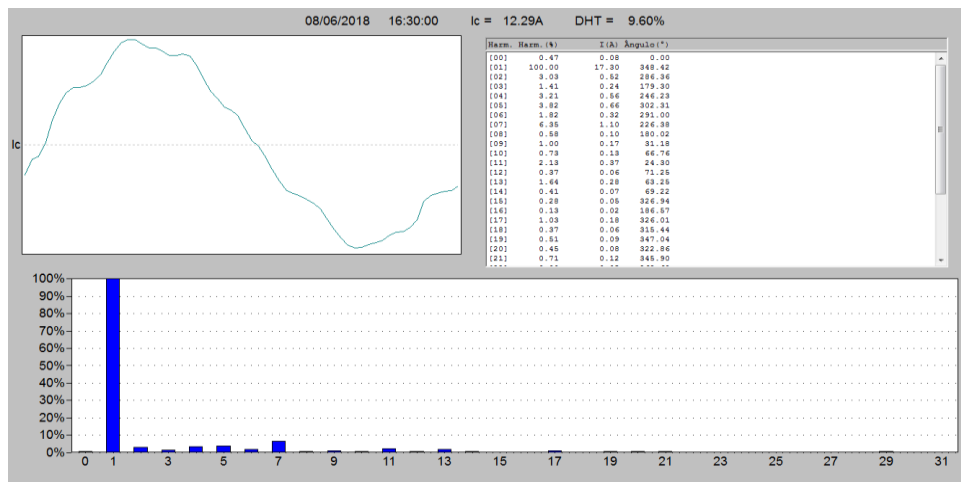
Figura 40 – Variação Harmônica de Corrente na fase C, às 16h.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

A Figura 41 mostra o espectro harmônico e a distorção na senoide de corrente da fase C com uma DHT de 9.60% às 16h30. Neste momento, com uma deformação um pouco mais substantiva na senoide.

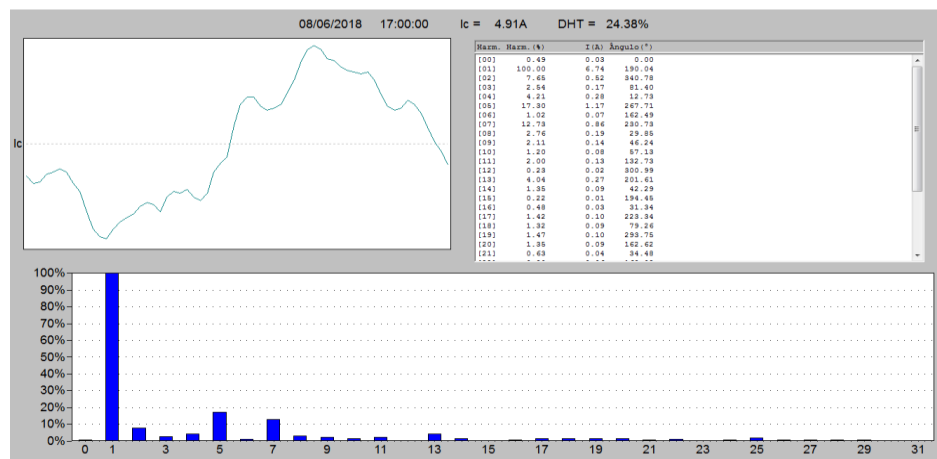
Figura 41 - Variação Harmônica de Corrente na fase C, às 16h30.



Fonte: Software RMS ANAWIN.

A Figura 42 mostra o espectro harmônico e a distorção na senoide de corrente da fase C com uma DHT de 24.38% às 17h. Neste momento, com deformação que impacta diretamente na qualidade da senoide.

Figura 42 – Variação Harmônica de Corrente na fase C, às 17h.



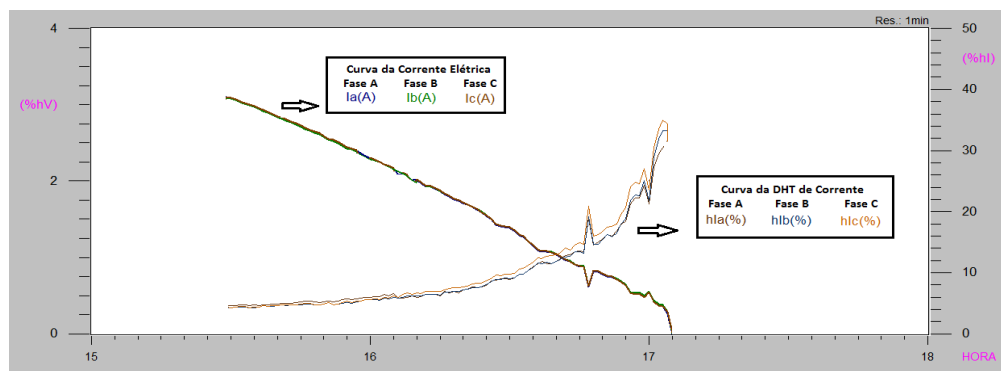
Fonte: Software RMS ANAWIN.

Segue uma a ilustração das DHT de corrente das três fase através da Figura 43, a qual mostra como a porcentagem em relação à fundamental foi aumentando conforme a potência de geração do sistema fotovoltaico foi diminuindo. Assim, segundo Fortes (2016), as distorções harmônicas geradas pelos inversores acontecem somente por dois aspectos: o primeiro por se tratar de um equipamento considerado não linear, de funcionamento, através de chaveamento realizado por

chaves eletrônicas (geralmente IGBT's e MOSFETS) para estruturação da onda senoidal da saída. Esse controle gera as distorções harmônicas. O segundo é devido aos momentos de baixa insolação, devido à baixa insolação ou sombreamento sobre os painéis solares.

Essa distorção se comporta diferentemente da corrente, que estava aproximadamente com 27 A às 15h30 e às 17h com 5 A. A DHT às 15h30 estava com aproximadamente 4%, passando para 25 % às 17h.

Figura 43 – Comparação Curva da Corrente e DHT.

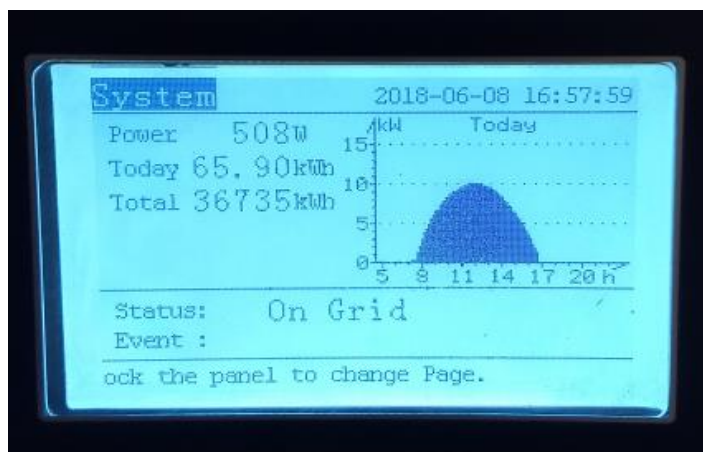


Fonte: Software RMS ANAWIN.

O sistema analisado teve uma produção de energia elétrica aproximada até as 16h58 de 205.7 kWh pelos três inversores, levando em consideração que o consumo de energia elétrica estava muito baixo no dia, porque não estava com nenhum evento sendo realizado, somente as cargas, como alguns refrigeradores e lâmpadas ligadas. Boa parte da potência gerada foi injetada na rede elétrica de distribuição da concessionária.

Na Figura 44, é possível verificar o *display* de um dos inversores em que mostra os valores de produção momentânea, diária e total, somente daquele inversor fotovoltaico.

Figura 44 – Display inversor fotovoltaico



Fonte: O Autor.

8 DISCUSSÃO

Este trabalho mostrou algumas dificuldades de conseguir informações de fabricantes em relação à análise de distorção harmônica gerada pelos inversores fotovoltaicos. Fabricantes somente colocam um fato de que é menor que um valor, o que está dentro dos padrões mínimos de qualidade.

Para leitura dos dados e de grandezas elétricas, foi utilizado um analisador de energia elétrica da marca RMS. Inicialmente, foi conflitante a forma de realizar a leitura das distorções harmônicas, porém, com o quadro de distribuição do sistema integrado a ele, foi possível através de testes encontrar o ponto correto para conseguir mensurar.

9 CONCLUSÃO

Sabe-se que as fontes de energias renováveis de energia elétrica estão tendo seu uso de forma intensificada, tornando-se realidade, incentivo que vem devido a aspectos econômicos, na redução do valor da fatura de energia. Por se tratar de uma fonte de energia inesgotável, não poluente e silenciosa, a geração fotovoltaica pode ser facilmente instalada em edificações já existentes sem a possibilidade de causar alguma contrapartida.

Pela configuração que o Brasil possui no seu sistema elétrico, a exploração da energia solar pode ajudar, reduzindo custos elevados de transmissão e distribuição, fato que ocorre pois traz a geração mais perto do consumidor. Porém, é necessário se realizar um controle rígido sobre as conexões de sistemas fotovoltaicos, caso contrário isso pode trazer consequências desagradáveis ao sistema elétrico.

Enquanto a participação da geração solar não é significativa, não se tem um impacto relevante na rede elétrica, porém, com o aumento de instalações conectadas à rede de distribuição, é necessário realizar um estudo minucioso do impacto que isso pode ocorrer em algum determinado ponto da rede, possibilitando a instalação de equipamentos que possam mitigar o efeito indesejado na rede, mantendo a qualidade de energia mínima estabelecido por normas nacionais e internacionais.

Este estudo da qualidade da energia elétrica buscou evidenciar a presença de componentes harmônicas na rede causada pelo uso de inversores fotovoltaicos. Como resultado, foram percebidas variações da forma de onda devido a distorções harmônicas. As distorções harmônicas de tensão ao longo do tempo se mantiveram constantes entre 2 a 2.51 % de DHT; já para o caso de distorções harmônicas de corrente, houve um aumento significativo com a chegada do final da tarde, quando a potência de geração muito abaixo da capacidade nominal do sistema evoluiu aproximadamente de 5 a 25%. Avalia-se que nos momentos do começo da manhã e final da tarde a distorção harmônica de corrente injetada na rede pode ser prejudicada ainda mais, porque a rede da concessionária possui característica de carga variável. Com isso, é possível avaliar que, nesses momentos, essa distorção pode provocar várias avarias na rede e em equipamentos que estão em paralelo.

Uma medida de grande importância para novas instalações de sistemas de geração fotovoltaicas é o Relatório de Impacto no Sistema Elétrico (RISE), o qual

determina qual o grau de influência que a unidade geradora de energia irá produzir no sistema elétrico. Devem-se sugerir também medidas de mitigação de harmônicas para que os níveis pré-estabelecidos não sejam ultrapassados.

A. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Institucional. **Atribuições.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/competencias>>. Acesso em 17 abr. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia do Brasil.** 2 ed. Brasília: Aneel, 2005.

BARBOSA, Marcelo de Almeida. **Distorções harmônicas em sistemas elétricos industriais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8.** Qualidade da energia elétrica, aprovado pela Resolução Normativa 767/2017.

CABRAL, I. S.; TORRES, A. C.; SENNA, P. R. **Energia Solar: Análise Comparativa entre Brasil e Alemanha.** Salvador, 2013.

DECKMANN, S. M.; POMILIO J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica.** 2017. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação. UNICAMP.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. Ministério de Minas e Energia. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Rio de Janeiro: Epe, 2012.

FILHO, José Bionede Melo, 2009, Recife. **Visão do Mercado de Módulos Fotovoltaicos.** Disponível em <<http://dina.poli.br/index.php/publicacoes/56-modulos>>. Acesso em: 25 out. 2017.

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas – Com Introdução à Eletrônica de Potência.** 6ª edição. Porto Alegre. Bookman, 2006.

FORTES, R. R. A. **Distorções Harmônicas Produzidas por Inversores de Geração Distribuída Fotovoltaica em Condição de Ressonância Paralela.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade Estadual Paulista, UNESP, Ilha Solteira.

GAMA, A. C. **Análise da distorção harmônica em uma instalação industrial: Estudo de caso.** 2017. Trabalho (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro.

HADDAD, Jamil. **Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade e Tarifação,** Ministério de Minas e Energia – MME – PROCEL – Rio de Janeiro, dezembro/2004.

IEEE – **About us.** Disponível em: <https://www.ieee.org/about/ieee-history.html>. Acesso em: 17 abr. 2018.

IEEE Std. 519-1992. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical power Systems**. Abril 2018.

IEEE Std. 519-2014. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical power Systems**. Abril 2018.

ISONI, M. **A moderna eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas – Distorções Harmônicas – Uma revisão de Conceitos Gerais**. 2014. Disponível em https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiPmMG_s47TAhUDS5AKHVzgCmEQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fdocumento.ifnmg.edu.br%2Faction.php%3Fkt_path_info%3Dktcore.actions.document.view%26fDocumentId%3D2908&usg=AFQjCNFqUKHtXjERT0EGa5oJSpWqal4noA. Acesso em: 20 out. 2017.

NASCIMENTO, C. F. **Determinação do conteúdo harmônico de corrente baseada em redes neurais artificiais para cargas não-lineares monofásicas**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, **Procedimentos de rede: Submódulo 2.8 – Padrões de desempenho da rede básica**. Rio de Janeiro, 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, **Institucional**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 17 abr. 2018.

PIRES, I. A. **Caracterização de harmônicos cuasados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. Belo Horizonte, 2006.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaico integrada a Edificações Urbanas e Interligadas à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Florianópolis: Ufsc Labsolar, 2004.

SANKARAN, C.; **Power Quality, 1 edition**, CRC PRESS, 2002.

SILVA, L. C. E. **Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira.

SOUSA, B. X.; NERYS, J. W. L. **Estudo de Caso de Geração Distribuída Fotovoltaica de Pequeno Porte Conectada à Rede de Distribuição**. Goiânia, 2011.

SOUZA, W. E. **Análise das distorções Harmônicas de tensão a partir de características dos Transformadores e de dados de consumo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, setores de Tecnologia e Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba – Paraná.

TEIXEIRA, D. Â. **Análise das distorções harmônicas – Estudo de caso de um sistema industrial.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** 1 ed. Rio de Janeiro, 2016. 328 p.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações.** São Paulo, 2013.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros que possam Afetar a Conectividade,** 2010. 189 f (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.