



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VITOR HUGO SLONGO TANIGUCHI

**ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE**
Estudo de Caso USF - Mineirão

Palmas/TO
2019

VITOR HUGO SLONGO TANIGUCHI

**ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMONICA EM SISTEMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE**
Estudo de Caso USF - Mineirão

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Me. Alcy Monteiro Junior

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- T164a Taniguchi, Vitor Hugo Slongo .
Análise de Distorção Harmônica em Sistema de Geração Fotovoltaico Conectado a Rede: Estudo de Caso USF-Mineirão . / Vitor Hugo Slongo Taniguchi. – Palmas, TO, 2019.
69 f.
- Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2019.
Orientador: Alcy Monteiro Júnior
1. Distorção Harmônica . 2. Qualidade de Energia Elétrica . 3. Usina Solar Fotovoltaica - Mineirão. 4. Geração Fotovoltaica. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

VITOR HUGO SLONGO TANIGUCHI

ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE:

Estudo de Caso em USF - Mineirão

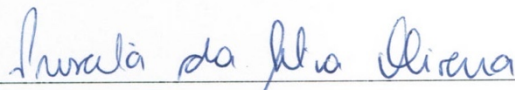
Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 12 / 04 / 2019

Banca Examinadora



Prof. Me. Alcy Monteiro Júnior), UFT.



Prof. Dra. Priscila da Silva Oliveira, UFT.



Prof. Ma. Gisele Souza Parmezzani Marinho, UFT.

Palmas-TO, 2019

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.
(John F. Kennedy)

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, por me mostrar os caminhos corretos e pela iluminação durante essa peregrinação terrestre. A minha família, em especial a minha mãe, Elizabete Slongo, por toda a dedicação, paciência e palavras de incentivo, contribuindo para a realização do mesmo. Aos meus amigos, passando unidos nesses belos momentos.

Agradeço aos meus professores, que sempre estiveram prontos a ajudar e ensinar, proporcionando o melhor aprendizado, em especial ao Professor Me. Alcy Monteiro Júnior, por contribuir integralmente neste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta inicialmente, uma fundamentação teórica acerca de harmônicos em sistemas elétricos, e a sua influencia nos equipamentos elétricos, com foco em inversores de energia. Também apresenta os limites definidos pelos órgãos reguladores das normas de qualidade de energia elétrica, tanto nacionais, quanto internacionais. O estudo de caso faz uma análise de distorção harmônica dentro da Usina Solar Fotovoltaica – Mineirão, situada na cidade de Belo Horizonte – MG, onde o trabalho possui o principal objetivo de observar a interação com múltiplos inversores da usina fotovoltaica, pela ocorrência de atenuação ou agravamento das distorções harmônicas nas instalações e comparar com as normas. Assim, foram analisados medições com diversos locais, diretamente no inversor, na sala com vários inversores, na subestação elevadora e na interligação, que neste caso é o PAC (ponto de acoplamento comum), com analisadores de qualidade de energia. Após a análise através do um *software*, *PowerLog* v.5.6 e Microsoft Excel, realizar uma comparação com os valores demonstrados nas normas, parecendo com uma conclusão verificando sua mitigação/atenuação dos harmônicos.

Palavras-chaves: distorção harmônica, qualidade de energia elétrica, USF-Mineirão.

ABSTRACT

This work presents, initially, a theoretical foundation about harmonics in electrical systems, and its influence on electrical equipment, focusing on energy inverters. It also presents the limits defined by the regulatory bodies of the electric power quality standards, both national and international. The case study makes a harmonic distortion analysis within the Solar Photovoltaic Plant - Mineirão, located in the city of Belo Horizonte - MG, where the work has the main objective of observing the interaction with multiple inverters of the photovoltaic plant, due to the occurrence of attenuation or aggravation of the harmonic distortions in the installations and to compare with the norms. Thus, measurements were analyzed with several locations, directly in the inverter, in the room with several inverters, in the elevating substation and in the interconnection, which in this case is the PAC (common coupling point), with energy quality analyzers. After analysis through a software, PowerLog v.5.6 and Microsoft Excel, perform a comparison with the values shown in the standards, looking like a conclusion verifying its mitigation / attenuation of the harmonics.

Key-words: harmonic distortion, electric power quality, USF-Mineirão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Empreendimentos em Operação.....	18
Figura 2 - Empreendimentos em Operação, dados de 2016	19
Figura 3 - Empreendimentos em construção e construção não iniciada.....	19
Figura 4 - Unidades consumidoras com geração distribuída	20
Figura 5 - Inversor	24
Figura 6 - Sinal com altíssima frequência triangular.....	25
Figura 7 - Sinal sendo convertido para alternada juntamente com o sinal de controle do inversor.....	25
Figura 8 - Diagrama esquemático do <i>Ingecon Smart Sun 15LT</i>	26
Figura 9 - Circuito do inversor <i>Transformeless</i> , sem controle.....	27
Figura 10 - Onda deformada e suas harmônicas	30
Figura 11 - Representação do teorema de Fortescue	32
Figura 12 - Defasagem de cada tipo de carga	33
Figura 13 - onda e suas deformações de cada harmônico.....	34
Figura 14 - Tetraedro de Potência	35
Figura 15 - Espectro Harmônico (a) carga linear (b) carga não linear	38
Figura 16 - índices que DHT máxima pela PRODIST	39
Figura 17 - índices de DHT do IEEE Std.519.....	40
Figura 18 - índices de TDD do IEEE Std. 519.....	40
Figura 19 - Índices de Distorção Harmônica pelo IEC.....	41
Figura 20 - Analisador de qualidade de energia.....	42
Figura 21 - Requisitos mínimos para o uso do <i>software PowerLog</i>	43
Figura 22 - Planta baixa da USF-Mineirão	45
Figura 23 - Planta baixa de todas as STI's.....	45
Figura 24 - STI-1	46
Figura 25 - arranjos dos painéis fotovoltaicos de SDTI-1	47
Figura 26 - Diagrama de conexão do trafo zig-zag	48
Figura 27 - arranjos dos módulos fotovoltaicos, em (a) são 60 modulos e em (b) são 75 modulos.....	49
Figura 28 - Plata baixa, locais de medição.....	50
Figura 29 - Potência Ativa e Aparente, dia 21 de setembro.....	51
Figura 30 - Potência Ativa e Aparente, dia 22 de setembro.....	52
Figura 31 - DHTi e DHTv, no Inversor dia 21/09.....	53
Figura 32 - DHTi e DHTv, no inversor no dia 22/09	53
Figura 33 - DHTi e DHTv, STI-1 no dia 21/09.....	54
Figura 34 - DHTi e DHTv, STI-1 no dia 22/09.....	54
Figura 35 - DHTi e DHTv, SE - Sul no dia 21/09.....	55
Figura 36 - DHTi e DHTv, SE - Sul no dia 22/09.....	55
Figura 37 - DHTi e DHTv, Interligação (PAC) no dia 21/09	56
Figura 38 - DHTi e DHTv, Interligação (PAC) no dia 22/09	57
Figura 39 - Histograma de (a)DHTv e (b)DHTi, ao longo do dia 22/09.....	57
Figura 40 - Harmônico de corrente de cada Ordem	59
Figura 41 - Harmônico de tensão de cada Ordem	59
Figura 42 - Harmônico de corrente de cada Ordem	60
Figura 43 - Harmônico de tensão de cada Ordem	60
Figura 44 - DHTv e DHTi, no PAC ao longo do dia.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sequência das componentes Harmônicas e sequencia de fase para componentes Harmônicas até a 24 ordem.....	32
Tabela 2 - Porcentagens de DHT, no dia 21 e 22, Inversor e STI-1.....	55
Tabela 3 - Porcentagens de DHT, no dia 21 e 22, Inversor e SE-Sul.....	56
Tabela 4 - Porcentagens de DHT, no dia 21 e 22, Comparação Geral.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFT – Universidade Federal do Tocantins

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica;

CC – Corrente Continua

CA - Corrente Alternada

NBR – Normas Brasileiras

PAC – Ponto de acoplamento comum

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PMP – Ponto de Máxima Potência

QBT – Quadro de Baixa Tensão

SE – Subestação

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

STI – Sala Técnica de Inversores

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

DDT – Distorção de Demanda Total

DHT – Distorção de Harmônica Total

USF – Usina Solar Fotovoltaica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 OBJETIVO GERAL	15
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3 METODOLOGIA	16
1.3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BRASIL	18
2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	19
2.3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	21
2.4 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	22
2.5 INVERSORES DE ENERGIA	23
2.5.1 PWM – MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO	24
2.5.2 MPPT (<i>MAXIMUM POWER POINT TRACKER</i>)	25
2.5.3 INVERSORES E SUAS TECNOLOGIAS	26
2.6 HARMÔNICOS	28
2.6.1 SÉRIE DE FOURIER	28
2.6.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS	31
2.6.3 CARGAS LINEARES E CARGAS NÃO LINEARES	32
2.6.5 INDICADORES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA	36
DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DHT)	36
DEMANDA TOTAL DE DISTORÇÃO (DTD)	37
2.7 NORMATIZAÇÃO	38
2.7.1 PRODIST – MÓDULO 8	39
2.7.2 IEEE <i>STANDARD</i> . 519	39
2.7.3 IEC 61000	40
3 INSTRUMENTAÇÃO MÉTODOLOGIA DE MEDIÇÃO E ESTUDO DE CASO	42
3.1 EQUIPAMENTOS	42
3.2 SOFTWARE	43
3.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO	43
3.4 ESTUDO DE CASO	44
3.4.1 STI-1	46
3.4.2 CARACTERÍSTICAS DA USINA	47
4 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMONICAS	50
4.1 PONTO DE MEDIÇÕES	50
4.2 MEDIÇÕES NO INVERSOR	52

4.3 MEDIÇÕES STI-01	53
4.4 MEDIÇÕES SE ELEVADORA	55
4.5 MEDIÇÕES NA INTERLIGAÇÃO	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1 TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A demanda energética esta diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico e industrial de um país, países desenvolvidos são os que mais demandam produção energética e ao mesmo tempo possuem menores preços. Historicamente, o uso de petróleo e seus derivados fez com que a matriz energética possuísse novas formas para a sua demanda, em destaque a energia elétrica.

A organização para desde a geração ao consumo de energia elétrica é estabelecida como a geração, que provem de grandes usinas elétricas, a transmissão, percorrendo grandes distancia distribuição, sendo radiada através dos consumidores, e o consumo. Com a necessidade de novas demandas faz-se a necessidade a criação de novas centrais geradoras, culminando em transportes de energia mais robustos. Apelando para métodos mais próximos e de menor custo nesta geração a geração na distribuição é uma alternativa.

Segundo Reuters (2019), em entrevista com ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar), entre o ano de 2017 para o ano de 2018, o crescimento da geração distribuída entrou em um ritmo acelerado, com expansão de 172% em comparação com 86% das grandes usinas. A expectativa, para energia solar, do ano de 2019 é de alcançar um crescimento de 44% em capacidade instalada no Brasil, levando ao um patamar de 3,3 GW.

O Brasil é possui alta irradiação solar, segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil, mostram que esta radiação média de 5153 Wh/m^2 , e somente a região Sudeste do país possui uma média de 4951 Wh/m^2 . O estudo aponta que a região Nordeste possui a melhor variação de radiação, comparável com os melhore locais do mundo.

Fazer com que a geração seja próxima das localidades das cargas, ocasiona em custos da energia seja mais baixo, tornando os investimentos de futuras unidades geradoras adiadas (Filho e Azevedo, 2013), este traduz a geração distribuída.

A geração fotovoltaica é uma alternativa para o Brasil, e é realizado com inversores de energia, fazendo com que a corrente continua (CC), produzida pelas placas fotovoltaicas, sejam convertidas em corrente alternada (CA) para o uso e injeção na rede distribuída. Porém, estes equipamentos utilizam tecnologia eletrônica, chaveando a corrente para realizar a conversão, produzindo distorções harmônicas, tanto de corrente quanto de tensão, tornando a qualidade de energia elétrica (QEE) prejudicadas.

A QEE não está ligada somente à fonte que gera o sinal, que fornece energia, mas também com a carga que é suprida esta demanda. A fonte pode influenciar na carga da mesma

forma que a carga pode influenciar na fonte. Estas variações no sinal são devido ao tipos de carga que são alimentadas, cargas não lineares.

Cargas lineares são cargas que quando energizada por fontes senoidais, não distorcidas, produzem correntes não distorcidas. Já cargas não lineares produzem distorção, mesmo sendo alimentadas por uma fonte senoidal. (Leão, 2014)

Inversores de energia são cargas não lineares, que produzem para dentro do sistema distorções. Pela quantidade grande de cargas instaladas nos sistemas de potência produzem harmônicos de corrente. Juntamente com a impedância do sistema elétrico, produzem também harmônicos de tensão. Assim, cargas não lineares podem ser vistas como geradoras de harmônicos de tensão e corrente (Sankaran, 2002).

Segundo o PRODIST (2017) (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), no módulo oito, define o sinal harmônico como um fenômeno associados à deformação nas formas de onda da tensão e corrente em relação a onda senoidal da frequência fundamental. Sendo necessário atribuir limites para o sistema de distribuição, uma vez que o este tipo de fenômeno prejudica a qualidade de energia elétrica e assim danificando equipamentos e demais dispositivos dentro do SEP (Sistema Elétrico de Potência).

Sendo assim, necessário a análise destes tipos de fenômenos para se determinar a qualidade de energia que se é produzido por esses equipamentos. Neste trabalho será abordado a geração através de um sistema fotovoltaico, localizado na distribuição e avaliar se necessário uma solução para a mitigação ou das distorções harmônicas.

1.1 Problema de pesquisa

O estudo da qualidade de energia elétrica (QEE) é muito importante, onde não só os níveis de tensão e corrente são importantes, mais a interação dos equipamentos elétricos em conjunto. Visando esta interação, realizar a análise de distorção harmônica é importante para verificar-se a qualidade de energia.

O trabalho consiste em desenvolver uma análise das correntes harmônicas injetadas na por inversores fotovoltaicos, que são cargas não lineares, tanto um inversor individual, quanto em um arranjo de inversores, com a finalidade de verificar os níveis de distorção harmônica, através de indicadores, como distorção harmônica individual (DHI), distorção total de harmônica (DTH) e distorção harmônica total de tensão e corrente (DHT), e comparar com as normas existentes.

1.1.1 Justificativa

Com o crescente avanço e utilização das tecnologias da eletrônica de potência, fazendo ser possível a conversão de corrente contínua para corrente alternada, mostra a importância da qualidade de energia elétrica, pois, mesmo com o desempenho dos equipamentos, o chaveamento traz consigo a produção de distorções harmônicas, resultando na piora da qualidade de energia elétrica.

A poluição do sinal com os harmônicos gerados por cargas não lineares, em especial inversores de sistemas fotovoltaicos, não está presente somente em grandes gerações, mas também em pequenas, como residências e comércios.

O fluxo destas correntes de harmônicos pode resultar em efeitos indesejáveis no sistema, tais como perdas pelo aquecimento em máquinas rotativas, interferência no eletromecânico de operação de equipamentos de proteção, ressonância e aquecimento em banco de capacitores em paralelo, dentre outros.

Assim, com o monitoramento do Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede (SFCR), será possível determinar se os requisitos e normatização e laudos de certificação dos inversores fotovoltaicos, está coerente.

1.2 Objetivos

Para este determinado trabalho foi escolhido os seguintes objetivos:

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar o estudo e análise da propagação harmônica em SFCR, através de métodos e procedimentos de engenharia, com intuito de verificar a qualidade de energia elétrica injetada na rede de distribuição.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos a serem alcançados neste trabalho são:

- Levantamento bibliográfico referente à SFCR e distorção harmônica e demais competências para o trabalho;
- Analisar o crescimento de harmônicos no ponto de conexão da geração fotovoltaica do sistema de distribuição;
- Analisar a distorção harmônica causada pela operação de vários inversores na mesma geração fotovoltaica.

1.3 Metodologia

Nesta seção, realizou-se uma pesquisa previa para definir os procedimentos metodológicos a serem utilizados, onde foram divididos e apresentados no item 1.3.1 que descreve os procedimentos.

1.3.1 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos utilizados para preparar este trabalho foram:

- Revisão bibliográfica, buscando assuntos pertinente a distorções harmônicas em sistemas fotovoltaicos conectados a rede;
- Coletar os dados para análise, onde os dados serão da dissertação de mestrado de Monteiro Júnior (2014);
- Análise dos dados através dos *softwares*, *PowerLog* v.5.6 e Excel;
- Realizar uma conclusão do trabalho realizado com o principal foco na análise realizada.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos correlacionados, nos quais são:

O capítulo 1, Introdução, apresenta uma contextualização do assunto a ser abordado pelo trabalho, exibindo a justificativa, juntamente com objetivos, tanto gerais quanto específicos e a metodologia utilizada.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico, compondo os principais assuntos para tomar embasamento e melhor entendimentos durante o trabalho.

O capítulo 3 mostra o estudo de caso, mostra o local, USF-Mineirão, e suas características, como quantidade de inversores, potência instalada e a arquitetura do estádio.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, a análise da distorção harmônica e comparando-as com os valores definidos pela norma.

O capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, relacionando os objetivos alcançados por esse trabalho e a possibilidade de futuros trabalhos por meio das experiências obtidas por esse trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado assuntos com relevância teórica sobre o assunto, com o objetivo de embasar o tema estudado nesse trabalho.

2.1 Produção de Energia Elétrica Brasil

A geração de energia do Brasil é predominantemente hídrica, segundo o Banco de Informações de Geração (BIG)(2019), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2019, mostra que o Brasil possui 7.409 empreendimentos em operação com a potência instalada de 163.468.911 kW, dentre esse parcela a fotovoltaica possui 1,21% do total, na figura 1 mostra o percentual de todas as matrizes energéticas.

Figura 1 - Empreendimentos em Operação

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	697	704.022	703.836	0,43
CGU	1	50	50	0
EOL	599	14.783.689	14.737.793	9,02
PCH	425	5.215.429	5.160.856	3,16
UFV	2.462	1.987.719	1.985.719	1,21
UHE	216	102.229.978	98.481.478	60,24
UTE	3.007	41.972.108	40.409.179	24,72
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,22
Total	7.409	168.882.995	163.468.911	100

Legenda	
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
EOL	Central Geradora Eólica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear

Fonte: ANEEL, 2019

Comparando essa mesma tabela, porém com o do ano de 2016, na figura 2, podemos observar que a produção de energia fotovoltaica cresceu muito mais em comparação com as demais. A microgeração e minigeração crescem devido às regulamentações que cercam a produção com compensação energética excedente.

Figura 2 - Empreendimentos em Operação, dados de 2016

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	568	455.150	456.811	0,31
EOL	400	9.839.338	9.769.760	6,54
PCH	441	4.896.817	4.887.484	3,27
UFV	42	27.008	23.008	0,02
UHE	219	101.106.620	91.189.170	61,05
UTE	2.935	42.693.875	41.055.662	27,49
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,33
Total	4.607	161.008.808	149.371.895	100

Fonte: ANEEL, 2016

Ainda no BIG (2019), mostra os empreendimentos que estão em operação, figura 3, os que estão em construção e os que ainda não estão em construção, sendo a geração fotovoltaica com porcentagens altas para a construção de novas unidades.

Figura 3 - Empreendimentos em construção e construção não iniciada

Empreendimentos em Construção			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
CGH	3	7.512	0,09
EOL	65	1.186.400	14,6
PCH	32	384.809	4,74
UFV	17	457.912	5,64
UHE	5	909.780	11,2
UTE	37	3.828.934	47,12
UTN	1	1.350.000	16,61
Total	160	8.125.347	100
Empreendimentos com Construção não iniciada			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
CGH	5	11.100	0,09
EOL	151	4.097.030	34,15
PCH	107	1.515.706	12,63
UFV	48	1.359.316	11,33
UHE	7	694.180	5,79
UTE	109	4.319.493	36,01
Total	427	11.996.825	100

Fonte: ANEEL, 2019

2.2 Geração Distribuída

Geração distribuída (GD), de acordo com o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), é a geração de energia próxima aos consumidores independente da tecnologia, a fonte de energia, que compreende os co-geradores, geradores de emergência, pequenas centrais hidrelétricas e o foco do estudo, sistemas fotovoltaicos.

Este tipo de geração tem como vantagens, segundo Filho e Azevedo (2013), na geração distribuída não são somente ambientais, por ser uma fonte renovável, mas também:

- Qualidade e confiabilidade aos consumidores da energia por meio das tecnologias da GD, já que não se podem descartar falhas na transmissão e distribuição;
- Desenvolvimento econômico com a geração de empregos;
- Diminuição do desmatamento, de fontes não renováveis e dos impactos ambientais na geração e distribuição da energia;
- Melhoramento da eficiência energética;
- Atendimento mais rápido à demanda, considerando que o tempo para implantação é menor que na geração centralizada.

Segundo o site da ANEEL, a maior parte de GD é proveniente de geração fotovoltaica conectados a rede, como mostra a figura 4:

Figura 4 - Unidades consumidoras com geração distribuída

UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA			
Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
CGH	68	7.448	60.011,08
EOL	57	100	10.314,40
UFV	60.812	74.822	627.039,23
UTE	139	537	41.323,72

Fonte: ANEEL, 2019.

No Brasil a regulamentação de microgeração e minigeração distribuída é normatizada pela Resolução Normativa nº482 da ANEEL, a partir da data de 17 de abril de 2012, e atualizada pela Resolução Normativa nº687 e Resolução Normativa nº786, ate a data de 17 de outubro de 2017. Essas resoluções estabelecem as condições gerais para acesso a microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, sistema de compensação de crédito, caracterização de microgeração e minigeração e outras providências.

Estes tipos de geração são definidos como:

- “Microgeração Distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL.” (ANEEL, 2017).
- “Minigeração Distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL.” (ANEEL, 2017).

Além de definir os tipos de geração, as resoluções atribuem às definições de sistema de compensação de energia elétrica, melhorias, reforço, empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada e o autoconsumo remoto.

2.3 Qualidade de Energia Elétrica

A qualidade de energia elétrica (QEE) é definida como o sinal que passa por tudo que necessita de energia para entrar em operação, como equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos, assim não prejudicando o processo no qual alimenta, e com um bom desempenho na vida útil (Leão, 2014).

Um sinal de boa qualidade se apresenta com a onda senoidal, com frequência e amplitude fixas, que variam com a forma que será transmitida ou distribuída, e com o deslocamento angular mantido durante todo o sinal. Porém, a relação de QEE não parte somente do fornecedor de energia, concessionária, mas também dos clientes que solicita a energia. Nas interações de carga do cliente e o sistema, neste caso, o cliente fornece energia, podem levar a deformação na forma de onda da tensão e corrente, como correntes harmônicas, corrente reativa, corrente não balanceada, flutuações de tensão (*flicker*).

Inicialmente o consumo de energia elétrica era realizado por cargas lineares, cargas puramente resistiva, indutiva ou capacitiva. Cargas lineares são cargas que não produzem correntes distorcidas quando alimentadas com uma fonte não distorcida, enquanto as cargas não lineares podem distorcer a tensão quando alimentadas por correntes distorcidas. (Leão, 2014.)

Com a modernização dos dispositivos eletrônicos, o aumento do consumo desses equipamentos, juntamente com a crescente capacidade de processamento de informações e a quantidade de consumo de energia elétrica aumentando, fez com que problemas devido à má qualidade de energia elétrica comecem a surgir, por exemplo: disparos em equipamentos de

proteção sem querer, sobreaquecimento de transformadores e máquinas rotativas, correntes excessiva nos condutores neutros, explosões de capacitores, entre outros.

Estes problemas são causados por correntes harmônicas decorrentes de cargas não lineares, que realiza a distorção, deformação, na forma de onda (tanto da corrente quanto da tensão) em estado estacionário.(Leão, 2014).

Para manter a qualidade de energia é necessário procedimentos e limitações de quantidade de distorções harmônicas que podem ser injetadas, porém, deve-se entender como são formados estes tipos de distúrbios na qualidade de energia.

2.4 Geração Fotovoltaica

A radiação que chega à superfície terrestre é parte componente direta e parte componente difusa, e que a soma representa a Irradiação Global Horizontal, de grande importância para a geração fotovoltaica. A irradiação indireta sofre difusão e atinge a superfície por diferentes direções, já a direta é sem reflexos, diretamente do sol, com variações ao longo do dia.

O movimento da terra ao redor do sol apresenta uma trajetória elíptica, com declinação solar de $24,45^\circ$ em relação ao plano da elipse da órbita da Terra, que varia entre $-23,45^\circ$ a $23,45^\circ$, negativo ao Sul e positivo ao Norte (Bluesolar, 2011)

Nos semicondutores, existe uma banda proibida (ou *bandgap*) que está entre a banda de condução e a banda de valência, que pode chegar até 3eV (eletro-volt). Quando há aumento da temperatura a condutividade é aumentada, que ocasiona excitação térmica dos elétrons, passando da banda de valência para a banda de condução (Pinho; Galdino, 2014).

O módulo fotovoltaico é a conexão de células fotovoltaicas arranjadas de forma que se produza tensão e corrente, este é o único componente gerador. A partir da tensão e corrente que pretenda obter define o número de células e o arranjo, sendo este em serie e/ou paralelo.

Para SFCR (Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede) pode-se obter módulos com tensões bastante variáveis. Hoje, há módulos rígidos e flexíveis e são fabricados de forma automatizada e recebem a menor interferência humana possível (Pinho; Galdino, 2014).

O desempenho dos módulos fotovoltaicos depende de dois fatores importantes: da irradiância solar e da temperatura. À medida que a irradiância aumenta a corrente elétrica gerada no módulo e quando há variação de temperatura tem-se uma queda de tensão, que apesar de haver um pequeno aumento da corrente, não compensa essa diminuição (Pinho; Galdino, 2014).

2.5 Inversores de Energia

Os inversores são equipamentos que fazem a conversão da energia de corrente contínua para corrente alternada, em que características como frequência, conteúdo de harmônicos e forma de onda, por exemplo, estejam de forma a satisfazer as condições exigidas pela rede elétrica (Ruther, 2004).

De acordo com Pinho; Galdino (2014) os inversores podem ser classificados em quatro tipos para os SFCRs, são eles:

- Inversores Centrais: usados em Usinas Fotovoltaicas, são inversores trifásicos de grande porte (KWp até MWp);
- Inversores *Multistring*: apropriados para instalações urbanas (KWp), são inversores trifásicos ou monofásicos que apresentam entradas independentes com Seguimento de Ponto de Potência Máxima (MPPT) para conexão de *strings* (fileiras) de módulos;
- Inversores de *String*: para microgeração (até 10KWp), inversores monofásicos com uma entrada de MPPT;
- Módulo c.a.: módulo fotovoltaico que possui um microinversor anexado a ele.

Ainda de acordo com Pinho; Galdino (2014), algumas características são essenciais para o uso em sistemas fotovoltaicos, por exemplo, eficiência de conversão e confiabilidade altas, manutenção, emissão de ruído audível e emissão de interferência eletromagnética baixos, segurança, boa regulação de tensão na onda, tolerância aos surtos de partidas das cargas que serão alimentadas, entres outras. Na figura 5, mostra o inversor *Ingecon Smart Sun 15LT*.

Figura 5 - Inversor



Fonte: Ingeteam, 2012

Existem varias topologias de inversores sendo possível com o uso de semicondutores. Os controles da conversão são normalmente realizados através de técnicas de modulação, onde as configurações básicas de um inversor podem ser observadas nos itens 2.5.1 e 2.5.2.

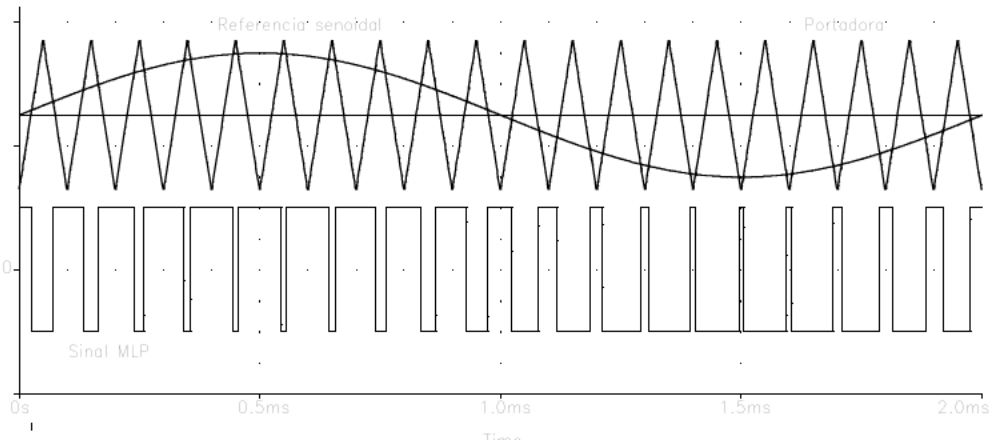
2.5.1 PWM – Modulação por Largura de Pulso

Esta conversão é realizada com modulação de largura de pulso, em outras palavras PWM (*pulse width modulation*), que consiste na comparação de dois sinais de tensão, um de baixa frequência (sinal de referência) enquanto o outro de alta frequência (portadora) resulta em um sinal com frequência fixa e largura de pulso variável.

A portadora define a frequência dos semicondutores e a largura de pulso varia com a amplitude do sinal de referência comparando com o sinal da portadora.

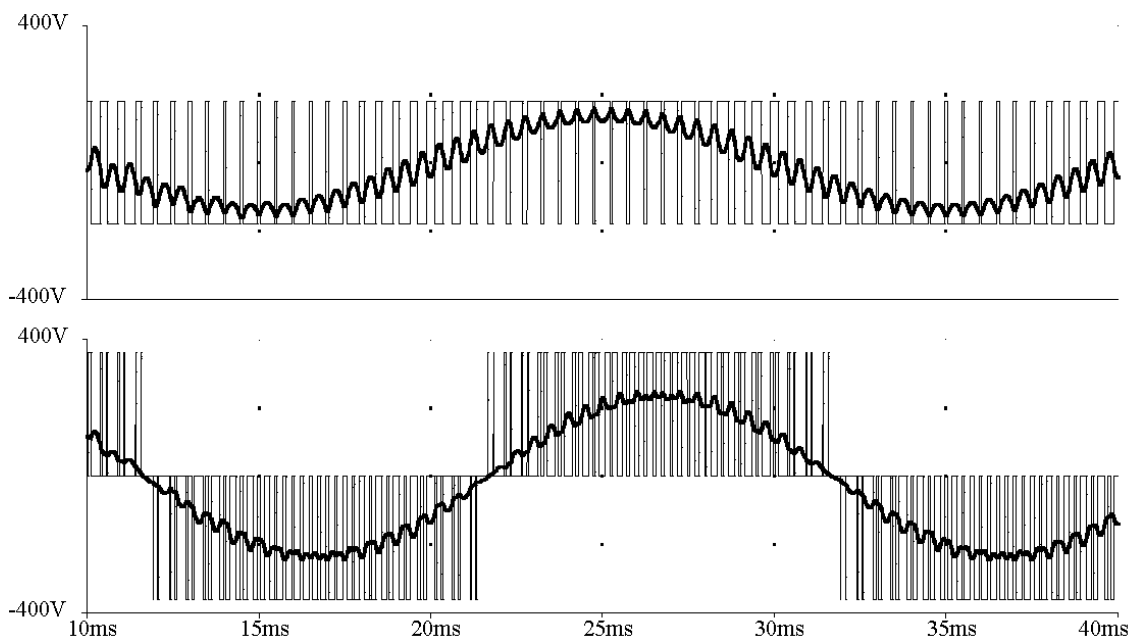
As figuras 6 e 7 mostra um sinal triangular, neste caso contínuo que foi colocado em uma altíssima frequência, sendo convertido em um sinal alternado com uma frequência mais baixa, nos padrões de uso de uso.

Figura 6 - Sinal com altíssima frequência triangular



Fonte: Pomilio, 2017.

Figura 7 - Sinal sendo convertido para alternada juntamente com o sinal de controle do inversor



Fonte: Pomilio, 2017.

2.5.2 MPPT (*Maximum Power Point Tracker*)

Querendo-se obter a maior potência de um painel fotovoltaico normalmente se dá através de um conversor CC-CC, onde o mesmo adequa a tensão de saída do painel, que normalmente é baixa, a necessidade do uso. Este tipo de conversor além de adequar a tensão, também procura a melhor relação de corrente e tensão, assim maximizando a potência.

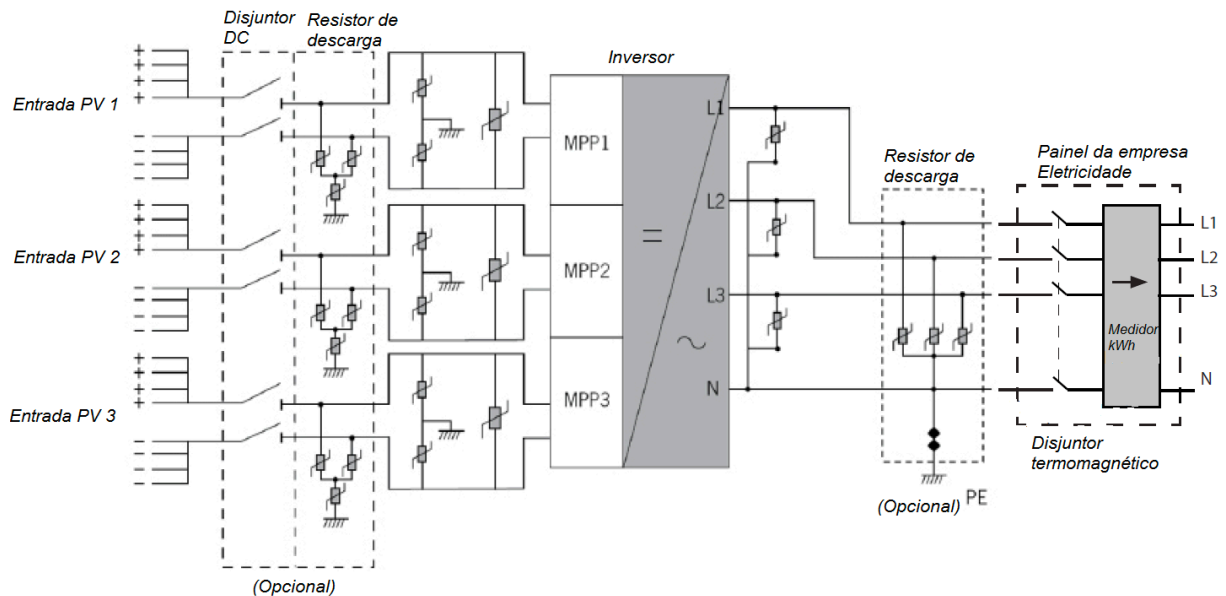
2.5.3 Inversores e suas tecnologias

Os controladores PWM (*Pulse Width Modulation*) são os mais utilizados, pois apesar da menor eficiência se justificam pelo custo. Já os controladores MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), possuem maior eficiência e são cerca de duas vezes mais caros.

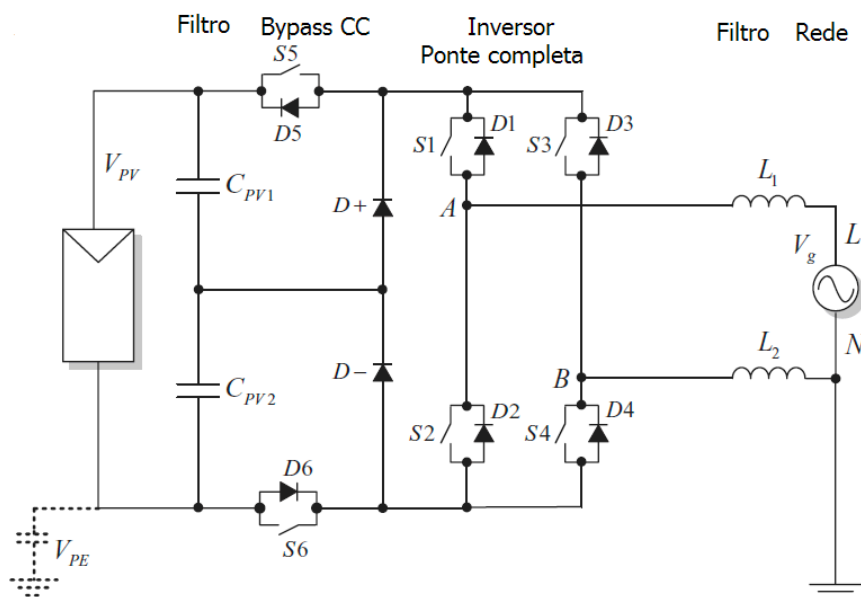
O inversor utilizado para compor a USF-Mineirão, foi o *Ingecon Smart Sun 15LT*, cujo a topologia é *transformerless*, inversores que não possuem transformadores em sua topologia. Assim tornando o inversor mais leve e com maior eficiência.

A figura 8 mostra o diagrama esquemático do inversor *Ingecon Smart Sun 15LT*, onde é um modelo *transformerless*, com ponte completa e chaves by-pass. Podemos observar o circuito na figura 9, a passagem da corrente nas chaves, durante o semiciclo positivo, as chaves S1 e S4 permitem a passagem, enquanto as chaves S2 e S3 não permitem a passagem. Durante o semiciclo negativo, as chaves S2 e S3 permitem a passagem da corrente, e as chaves S1 e S4 bloqueiam. Já as chaves S5 e S6 são chaves que fazem a modulação para a frequência desejada.

Figura 8 - Diagrama esquemático do *Ingecon Smart Sun 15LT*



Fonte: Monteiro Júnior, 2014.

Figura 9 - Circuito do inversor *Transformeless*, sem controle

Fonte: Monteiro Júnior, 2014.

Os fabricantes de inversores fotovoltaicos utilizam da tecnologia *transformerless* (sem transformador), neste caso os inversores podem pesar até 70% menos do que um inversor com transformador na saída, além de reduzir o seu tamanho, aumentando a sua eficiência devida não haver perdas por elevação de tensão, tornando mais baratos também. (Monteiro Júnior, 2014).

Segundo Monteiro Júnior, quando procuramos um inversor trifásico, para certas instalações, encontramos a junção de monofásicos normalmente, assim permite o uso do anti-ilhamento, ou *anti-islanding*. O anti-ilhamento é um método, que permite que o inversor se desligue automaticamente quando há falta de energia na rede elétrica, evitando acidentes durante manutenções na mesma.

Um das principais fontes geradoras de distorções harmônicas em sistemas elétricos, é a geração fotovoltaica, mesmo com inversores que utilizam modulação por largura de pulso, como controle dos equipamentos, produz quantias baixas de forma diversificada. (Latheef, 2006).

Em um sistema elétrico com o acompanhamento de inversores fotovoltaicos, podem ocasionar em efeitos, como ressonância, provenientes de inter-harmônicos e harmônicos de altas ordens. (Halkosaari, 2001).

2.6 Harmônicos

Sinais harmônicos são sinais que são compostos por vários sinais, incluindo a fundamental, cuja união deles forma um sinal distorcido, provido por cargas não lineares. As distorções harmônicas são compreendidas em uma análise de frequência, normalmente em por cada uma das componentes pares, ímpares e zero.

O sinal em forma de ondas senoidais são características desejadas em um sistema elétrico, sendo que os equipamentos e aparelhos elétricos são projetados para serem alimentados com formas senoidais (Leão, 2014).

O sinal senoidal mantém suas características de frequência única para tensão e corrente quando observada através de componentes passivos de circuitos, como resistores, indutores e capacitores. (Klumpner, 2012).

A fundamental, sinal que tem a menor frequência entre as harmônicas que compõem o sinal por completo, que determina a frequência que o sinal é distorcido. O sinal senoidal brasileiro tem sua frequência, sua fundamental, de 60 Hz e composto por inter-harmônicas de ordem n , dobrando a sua frequência, enquanto as de sub-harmônicas tem uma frequência menor das demais.

Nos últimos anos o sinal tem se distorcido muito, pela presença de cargas não lineares e principalmente pela evolução da eletrônica de potência, sendo o maior responsável o chaveamento de conversores (CA-CC e CC-CA).

Estudos de harmônicos são realizados para investigar o impacto de dispositivos não lineares, calcular os níveis de distorção harmônica, detectar condições de ressonância e determinar requisitos de filtragem em uma instalação ou sistema elétrico. (Leão, 2014).

2.6.1 Série de Fourier

A caracterização dos sinais harmônicos para sinais com ondas não senoidais, utiliza-se a análise Fourier, ferramenta matemática em que processa a conversão de forma de onda no domínio do tempo em componentes de frequência, estabelecendo uma relação entre a função contínua no domínio do tempo com uma função no domínio da frequência.

Segundo Fourier, a função representa uma função trigonométrica, sendo essa função uma combinação de amplitude e frequência com senos e cossenos. Em (1) define a série de Fourier :

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos h\omega_1 t + B_h \sin h\omega_1 t] \quad (1)$$

Sendo:

- $\frac{A_0}{2}$ - É o valor médio de $f(t)$, componente C.C. do sinal;
- A_h, B_h - São a amplitude ou valor de pico da componente de ordem h da série;
- ω_1 - É a frequência angular fundamental de $f(t)$ definida como $\omega = 2\pi T$;
- h - É a ordem do Harmônico.

Onde as equações (2), (3) e (4) definem os coeficientes da série de Fourier:

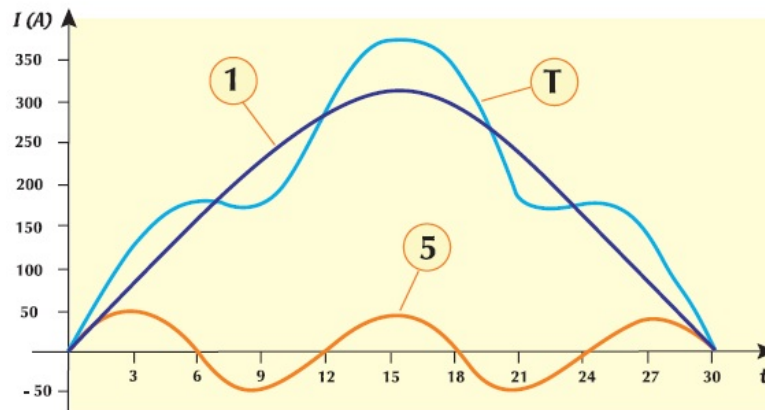
$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(ht\omega_1) dt, h = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(ht\omega_1) dt, h = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

A figura 10 mostra a perturbação harmônica, criando uma onda deformada (T), sendo T a soma de ponto a ponto dos sinais 1 e 5 com amplitudes e frequência diferentes, componentes harmônicas.

Figura 10 - Onda deformada e suas harmônicas



Fonte: Moreno,2001

A série de Fourier é uma ferramenta poderosíssima, na qual ajuda determinar cada componente da soma total do sinal dado, possibilitando uma análise mais precisa na poluição que as cargas não lineares possam causar.

Os coeficientes da série de Fourier representa a contribuição de cada seno e cosseno para cada frequência (Leão, 2014).

Enquanto o coeficiente $A_0/2$ é o valor médio da função $f(t)$, os outros coeficientes são as componentes retangulares do h -ésimo harmônico, demonstrados nas equações (5) e (6). Em (7) corresponde a forma de fasor função $f(t)$:

$$A_h \cos(h\omega_1 t) + B_h \sin(h\omega_1 t) = A_h \sin(h\omega_1 t + 90^\circ) + B_h \sin(h\omega_1 t) \quad (5)$$

$$A_h \cos(h\omega_1 t) + B_h \sin(h\omega_1 t) = B_h + jA_h \quad (6)$$

$$A_h \cos(h\omega_1 t) + B_h \sin(h\omega_1 t) = C_h \angle \phi_h \quad (7)$$

Substituindo o correspondente fasorial (7) em (1) e reescrevendo a função $f(t)$, obtemos as equações (8), (9) e (10):

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_1 t + \phi_h) \quad (8)$$

Ou:

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \cos(h\omega_1 t + \phi_A - 90^\circ) \quad (9)$$

$$f(t) = C_o + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \text{sen}(h\omega_1 t + \phi_B) \quad (10)$$

Em que:

- $C_o = A_o/2$ - Magnitude da componente cc do sinal;
- $C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2}$ - Valor de pico da componente de ordem h da série;
- $\phi_h = \text{tg}^{-1}(A_h/B_h)$ - Ângulo de fase da componente de ordem h da série em seno;
- $\phi_h = \text{tg}^{-1}(B_h/A_h)$ - Ângulo de fase da componente de ordem h da série em cosseno.

Uma lista de frequências (ou ordens), amplitudes e ângulos de fase das componentes harmônicas é denominada “espectro harmônico da onda”. Essa informação é crítica na especificação do projeto de filtros harmônicos (Leão; 2014).

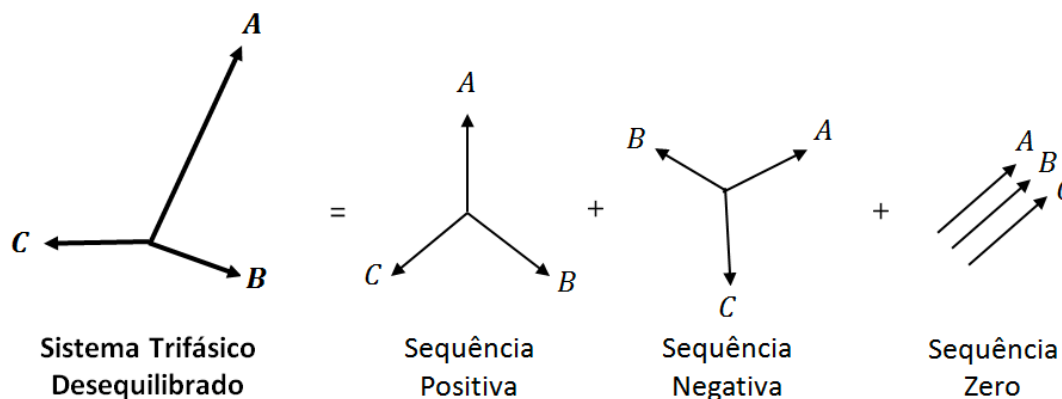
No osciloscópio, quando usado a função FFT (*Fast Fourier Transform*), é possível observar o C_h , que é o valor teórico lido na tela do analisador de espectros.

2.6.2 Componentes Simétricas

O sistema elétrico com n fases desequilibradas poder decomposta em componentes simétricas equilibradas, como foi proposto por Charles LeGeyt Fortescue, em 1918. Em um sistema trifásico de três fasores desbalanceados pode ser decomposto em três sistemas trifásicos de três fasores balanceados, chamados de componentes simétricas.

A figura 11 representa a demonstração que Fortescue que ficou conhecida como o teorema de Fortescue (Leão, 2014).

Figura 11 - Representação do teorema de Fortescue



Fonte: Leão, 2014.

Consequentemente a sequência positiva tem o seu sentido girando de forma contrária à sequência negativa, enquanto a sequência zero não gira.

Em um sistema de cargas e tensão equilibrados, cada componente harmônica possui uma sequência (positiva, negativa ou zero) e sua sequência de fase (ABC, CBA ou Sem Sequencia).

Na tabela 1 será mostrada a sequência e a sequência de fase. (Sankaran, 2002).

Tabela 1 - Sequência das componentes Harmônicas e sequência de fase para componentes Harmônicas até a 24 ordem

Ordem Harmônica	Sequência	Sequência de fase
1,4,7,10,13,16,19,22...	Positiva	ABC
2,5,8,11,14,17,20,23...	Negativa	CBA
3,6,9,12,15,18,21,24...	Zero	Sem Sequencia

Fonte: Sankaran, 2002.

Sequencia positiva é um conjunto de três fasores equilibrado, com defasagem de 120 graus e com a sequência idêntica a do desequilibrado, da mesma forma a sequência negativa é o conjunto de três fasores equilibrados, porém com a rotação contrária a da sequência positiva. E a sequência zero são três fasores iguais rotacionando da mesma forma que a fasores desequilibrados.

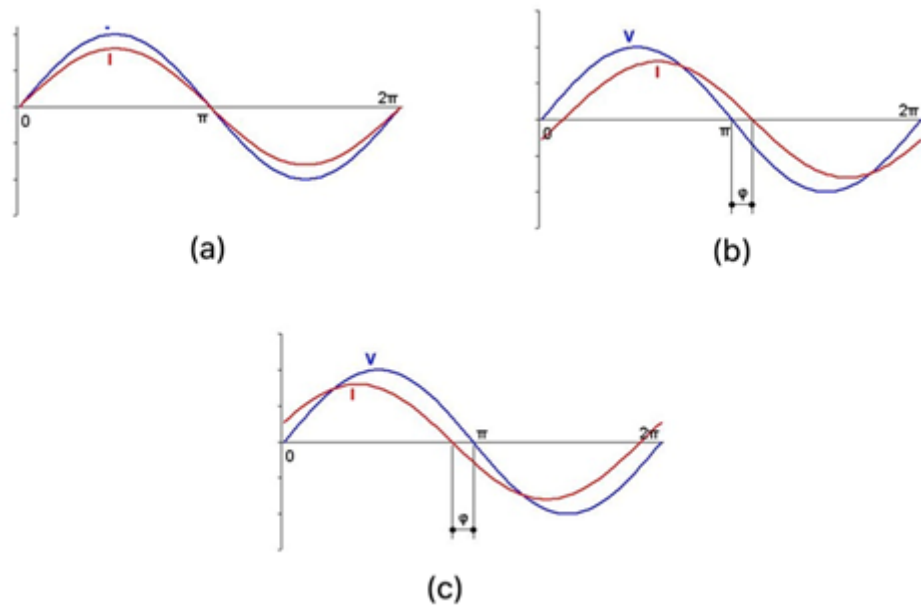
2.6.3 Cargas Lineares e Cargas Não Lineares

Cargas lineares podem ser definidas como a relação linear entre corrente e tensão. Entende-se que a carga absorve corrente senoidal quando alimentada por uma tensão senoidal

e ainda estar defasada por um ângulo ϕ em relação à tensão. Estes tipos de cargas são puramente resistivas, capacitivas ou indutivas.

Como, por exemplo, a figura 12 mostra estes tipos de cargas:

Figura 12 - Defasagem de cada tipo de carga

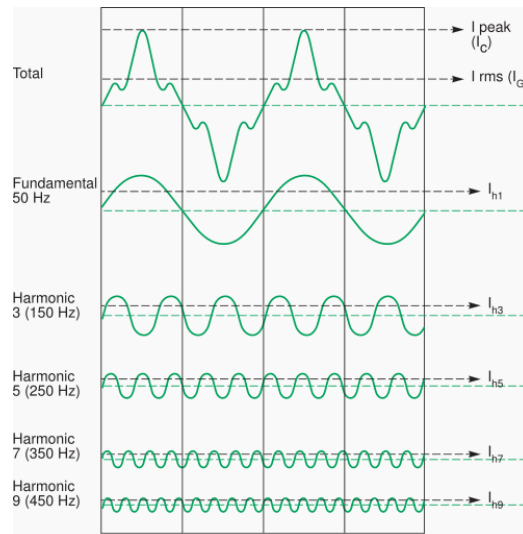


Fonte: Adaptado de Portal do Eletricista, 2014.

A figura 12, mostra em (a) uma carga resistiva, em (b) representa uma carga indutiva e em (c) representa uma carga capacitiva, todas as cargas ilustradas são lineares, quando não fazendo o sinal sofrer deformações na presença das mesmas.

Enquanto as cargas não lineares são cargas que possuem uma relação entre a corrente e a tensão não descrita por uma equação linear, entende-se que ela absorve uma corrente não senoidal, corrente harmônica, mesmo quando alimentado por uma fonte de tensão puramente senoidal, como exemplo, de equipamentos que absorvem este tipo de corrente, são eletrônicos, equipamentos de utilizam chaveamento como controle de disparos. A figura 13 representa uma carga do tipo não linear:

Figura 13 - onda e suas deformações de cada harmônico



Fonte: Angola Power Service, 2012.

Na figura 13 mostra a fundamental sendo deformada com a presença de cargas não lineares, onde cada ordem de harmônica somada a fundamental provocam a total.

2.6.4 Potência de cargas lineares e não lineares

Quando há cargas lineares, alimentadas por uma fonte puramente senoidal, as potências ativa, reativas e aparentes, são dadas pelas equações (11), (12) e (13):

$$P = VI \cos\phi \quad (11)$$

$$Q = VI \sin\phi \quad (12)$$

$$S = VI \quad (13)$$

E a relação entre as potências são dadas pela equação (14):

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (14)$$

Quando se tem cargas não lineares, alimentadas por fontes senoidais, as potências ativas, reativas e aparentes são dadas pelas equações (15), (16) e (17):

$$P = VI_{rms,1} \cos\phi_1 \quad (15)$$

$$Q = VI_{rms,1} \sin\phi_1 \quad (16)$$

$$S = VI_{rms} \quad (17)$$

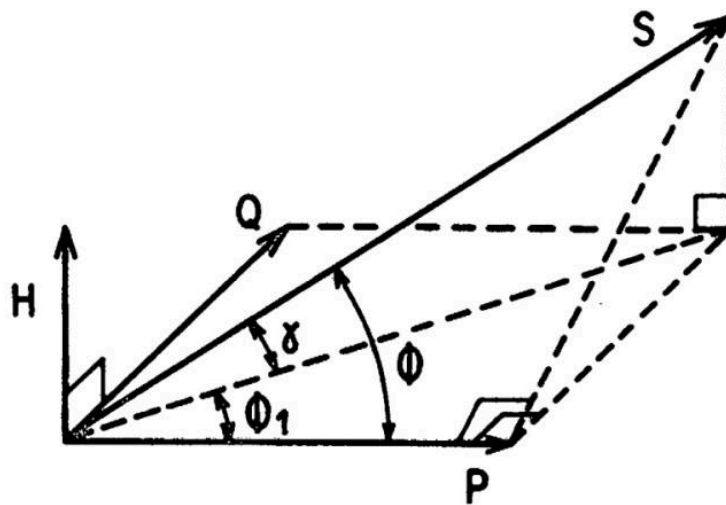
Em cargas não lineares, ainda aparece mais uma componente, denominada de potência de distorção harmônica, a é dada pela equação (18):

$$H = V \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_{rms,h}^2} \quad (18)$$

A relação entre as potências podem ser dadas pela equação (19):

$$S^2 = P^2 + Q^2 + H^2 \quad (19)$$

Figura 14 - Tetraedro de Potência



Fonte: Watanabe; Stephan, 1992.

A figura 14 mostra um tetraedro com a relação das potências tanto quando alimentando cargas lineares, quando alimentada uma carga não linear.

Sem a presença de cargas não lineares o fator de potência é dado como a defasagem angular entre a tensão e a corrente, dado pela equação (20):

$$\cos\phi = \frac{P}{S} \quad (20)$$

Sendo a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Na presença de harmônicos esta relação não é obedecida.

Já na presença de cargas não lineares o fator de potência é dado pela equação (21):

$$FP = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1 + THDi^2}} = \frac{P}{S} \quad (21)$$

O fator de distorção (FD) mostra o quanto a potência aparente se eleva na presença de potência harmônica, é dado pela equação (22):

$$FD = \cos\gamma \quad (22)$$

2.6.5 Indicadores de Distorção Harmônica

Para realizar uma análise da quantidade de harmônicos possui a fundamental é necessário o uso de indicadores/ferramentas que possibilitam analisar cada ordem de harmônica. com isso o uso das normas como parâmetro de montante a ser injetado.

Distorção Harmônica Total (DHT)

Entende-se a distorção harmônica total (DHT), como a razão entre o valor *rms* da componente harmônico a partir da segunda ordem, e o valor *rms* da fundamental, na qual está provocando a distorção/deformação da onda (PRODIST, 2017). Usado tanto para tensão (DHT_v) quanto para corrente (DHT_i), demonstrado nas equações (23) e (24).

Interpreta-se a DHT como os efeitos das harmônicas no sistema de potência, quantificada em porcentagem em relação a fundamental.

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \quad (23)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_1} \quad (24)$$

Sendo:

- h – Ordem do harmônico;
- V_h - Tensão do harmônico;
- I_h - Corrente do harmônico;
- V_{1rms} - Tensão *rms* da fundamental;
- I_{1rms} - Corrente *rms* da fundamental;

O DHT tem um valor melhor interpretado quando visto pela tensão e em vista da corrente deve-se tomar cuidado ao analisar, pois, quando visto pela corrente, pode-se observar que a mesma pode estabelecer índices muito grande de DHTi. Por exemplo, se a corrente da fundamental atingir 2A e possuir a existência de DHTi de 300%, logo podemos ficar preocupados com tamanha distorção, porém a corrente seria no máximo de 6A e dependendo da instalação isso é insignificante e facilmente mitigada pelo sistema.

Demanda Total de Distorção (DTD)

É um indicador muito parecido com a distorção harmônica total, entretanto é calculada com a demanda de corrente máxima do sistema ou corrente nominal. Utilizado para analisar a distorção na corrente, é um parâmetro fixo durante toda a análise. Quando encontrado com valores altos, é interpretado com elevada circulação de harmônico na instalação. É dado pela equação:

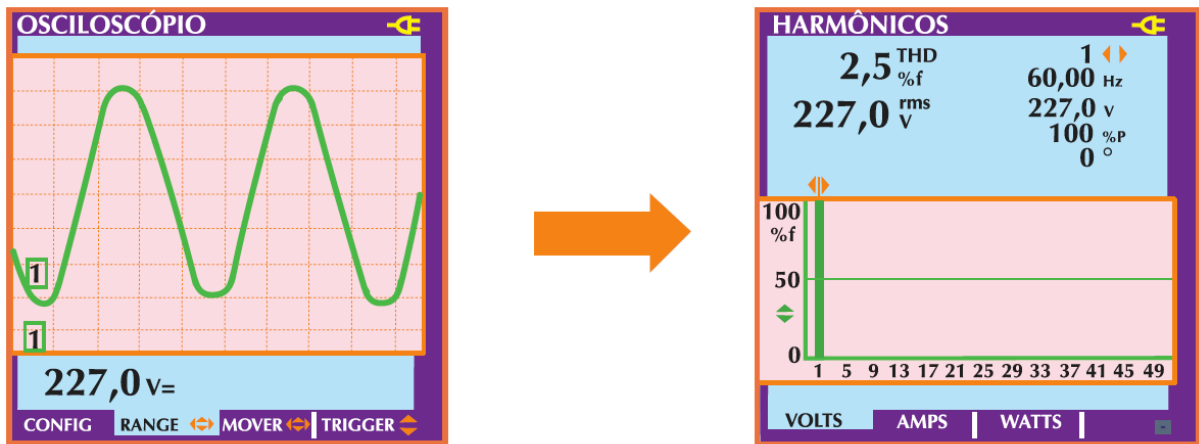
$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_L} \quad (25)$$

Sendo:

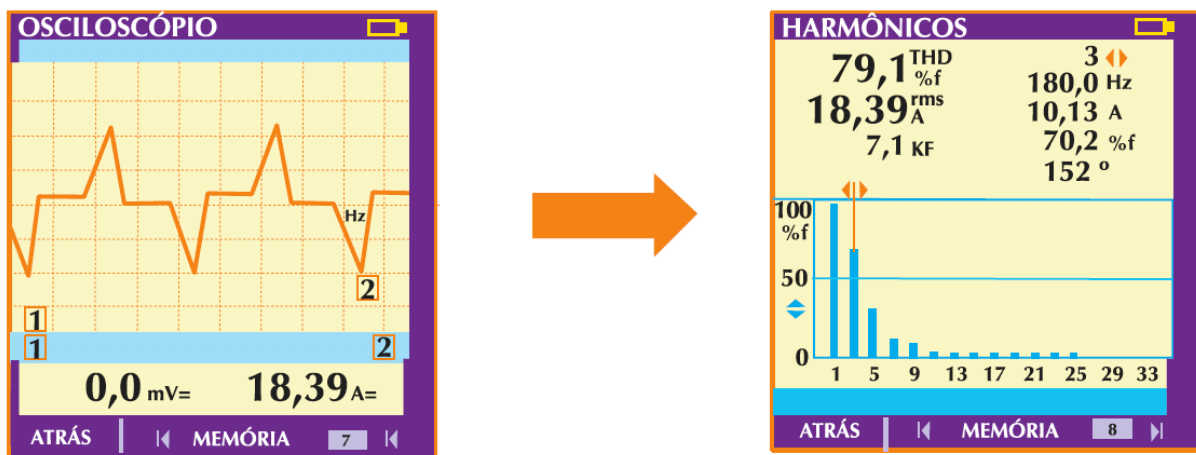
- h – Ordem do harmônico;
 - I_h - Corrente do harmônico;
 - I_L - demanda máxima da corrente ou corrente nominal.
- Espectro Harmônico

O espectro harmônico é uma ferramenta usada para analisar cada ordem da distorção harmônica, permitindo dividir a onda em um gráfico de barras, facilitando a análise. em instalações com corrente alternada são analisadas as harmônicas de ordem ímpar.

Figura 15 - Espectro Harmônico (a) carga linear (b) carga não linear



(a)



(b)

Fonte: Moreno, 2001.

Na figura 15, apresenta em (a) o espectro de uma carga linear, enquanto em (b) mostra o espectro de uma carga não linear. Podemos perceber que a presença de harmônicos no sinal pode ser visto com o gráfico de barra, em uma carga linear a somente a fundamental, enquanto na carga não linear mostra a quantidade de cada ordem de harmônico.

2.7 Normatização

Os níveis de distorção harmônica de tensão e de corrente devem ser atendidos, proveniente de normas e procedimentos, trazendo confiabilidade e qualidade de energia

elétrica do sistema de potência. Dentre elas se destacam a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), o Instituto de engenheiro eletrônico e eletricitistas (IEEE), Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

2.7.1 PRODIST – Modulo 8

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), órgão que regulamenta o setor elétrico brasileiro, define um conjunto de normas para rede de distribuição, compreendida como PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional).

O modulo 8 da PRODIST tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos a qualidade de energia elétrica (QEE), abrangendo a qualidade do produto, do serviço e tratamento das reclamações, na seção de qualidade de energia, são estudados os fenômenos de tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e VTCD (variações de tensão de curta duração).

Figura 16 - índices que DHT máxima pela PRODIST

Indicador	TENSÃO NOMINAL		
	$V_n < 1,0kV$	$1,0kV < V_n < 69kV$	$69kV < V_n < 230kV$
DHT	10,0%	8,0%	5,0%

Fonte: Adaptado de PRODIST, 2017

2.7.2 IEEE Standard. 519

A recomendação *Std.* IEEE 519:2014, estabelece limites para distorções harmônicas de tensão e corrente no ponto de acoplamento comum (PAC). Os limites de distorção de tensão e corrente para sistemas de 120V a 69kV, são apresentados através de tabelas mostrados a seguir:

Figura 17 - índices de DHT do IEEE Std.519

Tensão no barramento do PAC	Harmônicos individual (%)	Distorção harmônica total - THD (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	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,

Usando a demanda de distorção total (DDT), é a relação do valor eficaz do conteúdo harmônico, considerando-se as harmônicas até de ordem 50 retirando as medições de inter-harmônicas, expresso em porcentagem de máxima corrente de demanda e é definido pela equação a seguir:

Figura 18 - índices de TDD do IEEE Std. 519

Distorção harmônica máxima em porcentagem da demanda máxima de corrente de carga (I_L)						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	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	4,5	4	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

I_{sc} = corrente máxima de curto-circuito no PAC; I_L = corrente de demanda máxima de carga no PAC.

Fonte: IEEE, 2014.

A tabela mostra os valores de distorção harmônica de corrente recomendado pelo IEEE Std. 519. Assim, podemos observar que para a análise $V_n < 69 \text{ kV}$ e $I_{sc}/I_L < 20$, a máxima TDD(DTD) é 5%.

2.7.3 IEC 61000

O Comitê Internacional de Eletrotécnicos (IEC) possui padrões que determinam a qualidade de energia, reunidas em uma categoria de Compatibilidade Eletromagnética (EMC). Assim os padrões da série 60000 são divididos em seis partes, nas quais quatro são sobre harmônicos e determinações de valores.

IEC 61000-3-2:2005

A IEC 61000-3-2:2005 estabelece exigências a respeito de harmônicas que devem ser respeitadas por equipamentos que consomem menos de 16 A por fase em rede com tensão de 220V a 415V. a tabela abaixo mostra os limites dos equipamentos com mais de 50 W devem cumprir, sendo que abaixo desta potência não há limites, a norma faz relação com base nos valores eficazes (rms) de cada harmônica.

Figura 19 - Índices de Distorção Harmônica pelo IEC

Harmônicos ímpares		Harmônicos pares	
Ordem h	Corrente (A)	Ordem h	Corrente (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	$8 \leq h \leq 40$	$0,23 \times 8/h$
11	0,33		
13	0,21		
$13 \leq h \leq 39$	$0,15 \times 15/h$		

Fonte: IEC, 2012.

IEC 61000-3-6

Esta norma estima o valor da distorção harmônica no PAC em usinas fotovoltaicas, devido a múltiplos inversores, a mesma orienta o procedimento da soma de distorções harmônicas de inversores.

Segundo Monteiro Júnior (2014), “harmônicos de altas ordem variam muito em magnitude e ângulo de fase”, fazendo com que se mitiguem quando possuem a mesma ordem.

IEC 61000-4-30:2008 e IEC 61000-4-7:2002

A IEC 61000-4-30:2008 e IEC 61000-4-7:2002 são as principais normas de medição de harmônicas para sistemas de potência. Ambas definem como realizar a medição, colocando parâmetros comparáveis para qualidade de energia elétrica, considerando harmônicas e inter-harmônicas, porém não definem limites.

3 INSTRUMENTAÇÃO MÉTODOLOGIA DE MEDIÇÃO E ESTUDO DE CASO

Este capítulo traz os materiais e métodos utilizados durante o processo da pesquisa, além da instrumentação utilizada na dissertação de Monteiro Júnior (2014), traz também os programas para análise de distorção.

3.1 Equipamentos

Para a coleta de dados na dissertação de Monteiro Júnior (2014), foram utilizados os analisadores de qualidade de energia elétrica Fluke 435 – Série II, suas características são:

- Classe de exatidão de 0,1% de tensão;
- Classe de exatidão de 0,5% de corrente;
- Taxa amostral de 500/ciclo;
- Conversor analógico de 16 bits;

Podendo registrar grandezas como: potência ativa, potência aparente, potência reativa, tensão, corrente, fator de potência, DHT-V, DHT-I, harmônicos de tensão e de corrente (chegando até 49ª ordem para ímpares e 14 para pares).

Na figura 20 apresenta o analisador de qualidade de energia elétrica da Fluke junto com os demais componentes, como transformador de corrente e potencial, além de uma bolsa para transporte.

Figura 20 - Analisador de qualidade de energia



Fonte: Fluke, 2019.

Este equipamento atende todos os requisitos previstos no módulo 8 da PRODIST, IEC 61000-4-7:2002, IEC 61000-4-30:2003 e recomendações do IEEE 519-2014.

3.2 Software

O *software* utilizado para realizar a análise de distorção harmônica neste trabalho, foi o *PowerLog 5.6v*, é um programa de PC (*Personal Computer*) para os equipamentos Fluke, em especial neste trabalho que foi utilizado. Projetado para a manipulação dos dados, como transferir dados registrados, gravando-os para um PC; gerar tabelas e planilhas; visualizar, imprimir e exportar diagramas temporais; gerar gráficos e relatórios completos e formatados, e exportar dados para outros formatos (.xml e .doc, por exemplo).

Os requisitos mínimos para o programa são apresentados na figura 21:

Figura 21 - Requisitos mínimos para o uso do *software PowerLog*

Componente	Necessário	Recomendado
Espaço livre no disco rígido	Acima de 2 GB	Acima de 20 GB durante o uso do Fluke 430-II
Unidade de CD-ROM	✓	
Monitor	1024 x 768 pixels	1280 x 1024 pixels
Interface serial USB ou RS-232, dependendo do instrumento	✓	
Impressora colorida		✓

Fonte: Manual Fluke, 2019.

O programa possui uma interface fácil de entender, com seus recursos visíveis e diretos, porém pela quantidade de dados coletados para realizar a análise foi utilizado também pacote Office, exportando os dados e assim manipulando de uma forma mais rápida.

3.3 Métodos de Medição

O PRODIST – módulo 8 traz procedimentos de medição na parte de distribuição e para a realização de análises de distorção harmônicas, presentes no item 9.2.1 da seção 8.1, que segue as normas vigentes da IEC 61000.

Os métodos utilizados para o trabalho buscaram uma análise detalhada da energia fornecida, segundo Monteiro Júnior (2014), diversos pontos foram escolhidos para realizar a medição, entre os dias de 19 á 25 de setembro de 2014. Para a realização da análise foi considerado as seguintes medições:

1. Em um inversor isolado, neste caso o inversor 85, dos demais do arranjo;
2. O arranjo STI-1 inteiro, com os 11 inversores;
3. Na SE SUL;
4. Na interligação do arranjo.

3.4 Estudo de Caso

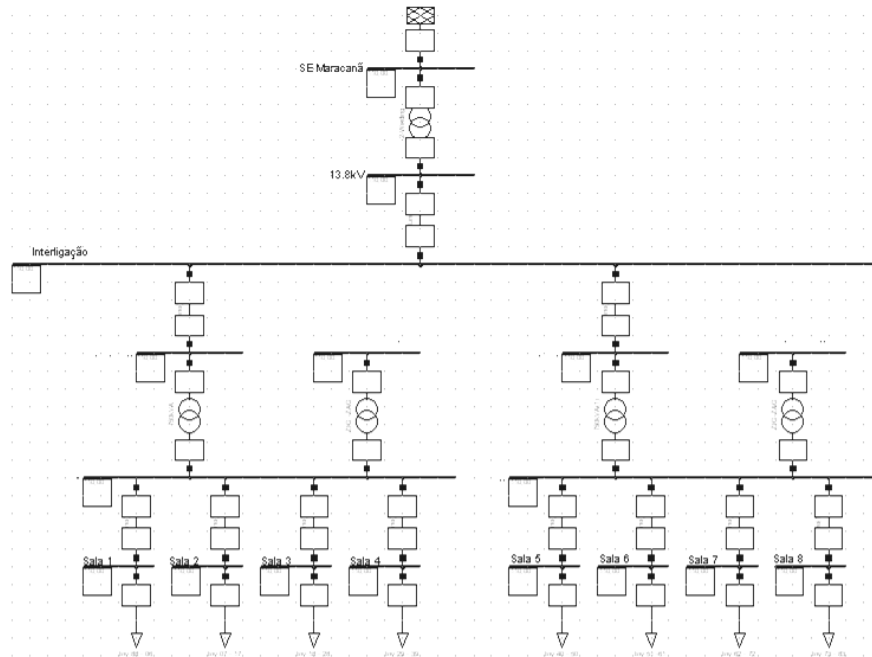
A Usina Solar Fotovoltaico Mineirão (Estádio Governador Magalhães Pinto) está situado no estado de Minas Gerais, na cidade de Belo Horizonte, no bairro da Pampulha, com uma previsão de geração de 1,32MW. As principais características, fornecidas na dissertação de Monteiro Júnior (2014), da Usina Solar Fotovoltaica do Mineirão:

- Potência Instalada: 1,42 MVA;
- Potência Gerada: 1,32MWp;
- Quantidade de módulos de silício policristalino: 5.910;
- Quantidade de inversores: 88;

As instalações possuem duas subestações elevadoras, compostas por 44 inversores *Ingecon Sun Smart* 15LT e um transformador elevador de 750kVA (380V/13,8kV) cada, conectados a rede de distribuição da CEMIG (concessionária de energia de Minas Gerais). O mesmo conta com dois alimentadores da CEMIG, SE BH Maracanã e BH Pampulha.

Com esta quantidade de potência instalada classifica a usina do Mineirão como minigeração. Na figura 22 mostra uma representação da USF-Mineirão:

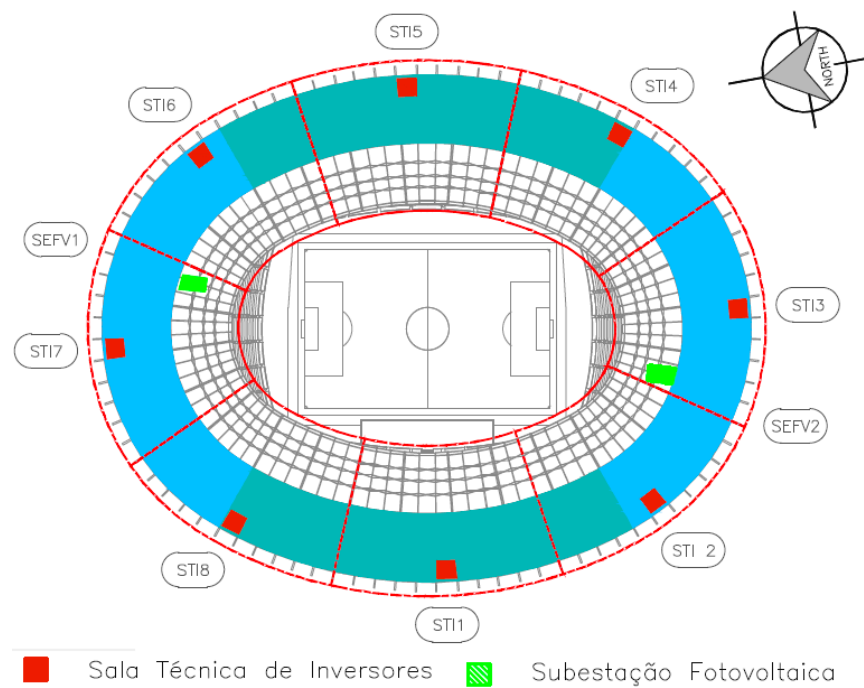
Figura 22 - Planta baixa da USF-Mineirão



Fonte: Monteiro Junior, 2014.

Na figura 23 mostra a planta baixa do estádio do Mineirão, onde os quadrados vermelhos são as salas onde ficam os inversores, cada uma com 11, e os quadrados verdes são as subestações elevadoras, elevando a tensão de quatro salas cada.

Figura 23 - Planta baixa de todas as STI's

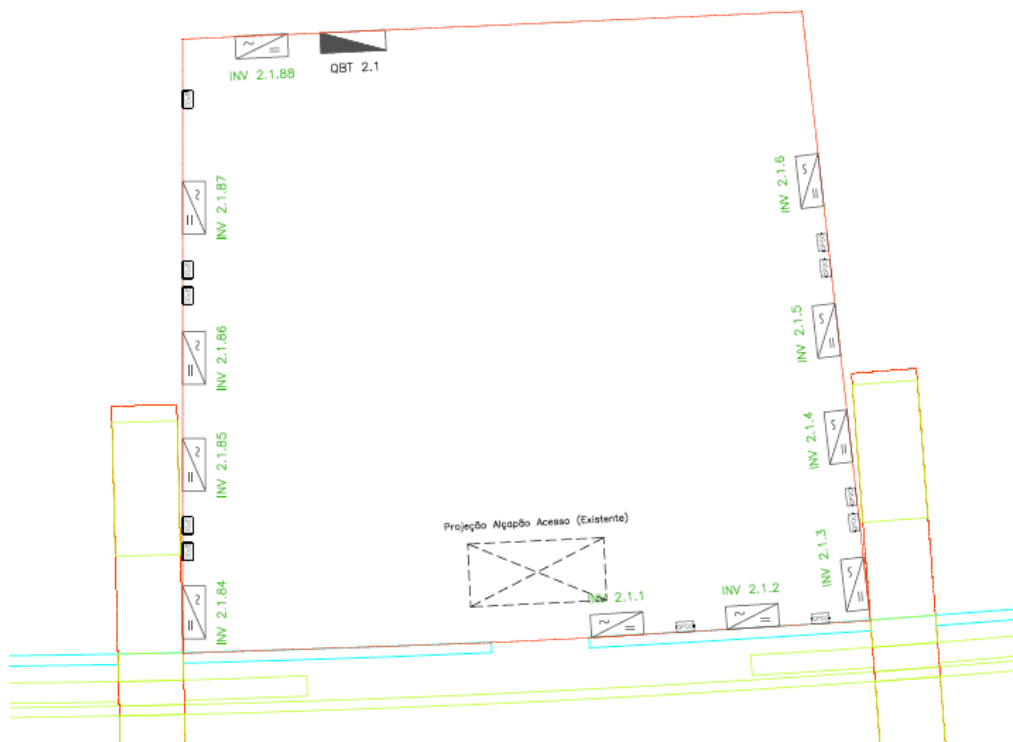


Fonte: Martifer, 2013

3.4.1 STI-1

Nesta sala técnica de inversores (STI) possui 11 inversores, figura 24, sendo todos os inversores equilibrados e desequilibrados (números de strings diferentes por fase), e neste trabalho vamos analisar separadamente o inversor 85, como base de comparação com os demais da instalação.

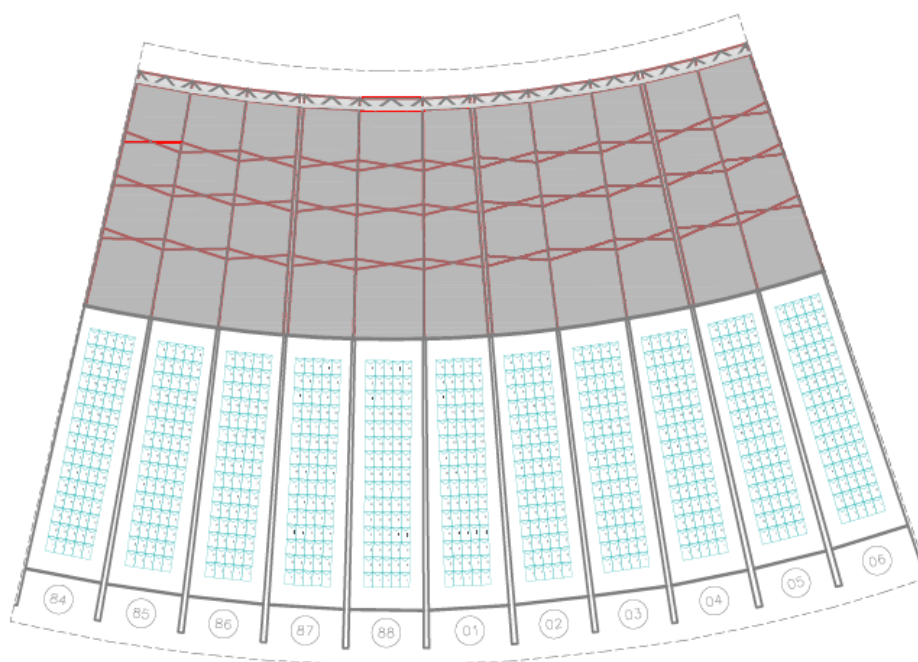
Figura 24 - STI-1



Fonte: Martifer, 2013

Além disso, a figura 25 mostra os *strings* de cada inversor que faz a geração total da STI-01, representados pelos números abaixo dos painéis.

Figura 25 - arranjos dos painéis fotovoltaicos de SDTI-1



Fonte: Martifer, 2013

3.4.2 Características da Usina

No estado de Minas Gerais, a concessionária, CEMIG, apela para exigências nas quais são normatizadas, para se obter o acesso a conexão de gerador de energia elétrica, assim deve-se atentar a Norma ND 5.31 - Requisitos para conexão de acessantes produtores de energia ao sistema de distribuição CEMIG – conexão em média tensão.

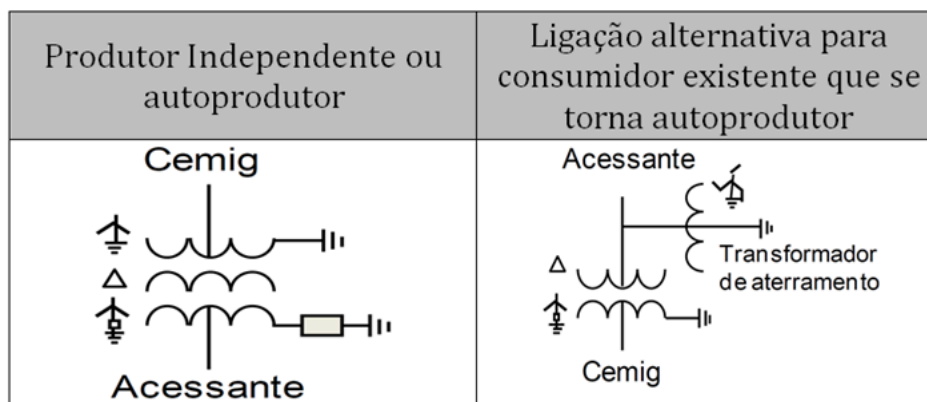
A norma estabelece que o gerador de energia deve colocar um referencial terra no lado da distribuição, estrela aterrada (Y_n), com o objetivo de evitar curtos-circuitos, e no lado da geração delta (D), atenuando componentes zero. O dimensionamento do Trafo de aterramento deve seguir os seguintes parâmetros:

“O transformador de aterramento garanta um sistema solidamente aterrado é necessário que a relação entre a reatância de sequência zero sobre a reatância de sequência positiva (X_0/X_+) seja maior que três.” (Monteiro Júnior, 2014).

“A reatância positiva (X_+) a ser considerada deve ser reatância vista no barramento de média tensão do acessante, considerando a interligação com a CEMIG D aberta.” (Junior, 2014)

Então foi substituído o transformador por três com enrolamentos de conexão Yn-D-Yn, a figura mostra o tipo de ligação que deve ser feito para esta usina. Na figura 25, demonstra um diagrama para realizar a substituição.

Figura 26 - Diagrama de conexão do trafo zig-zag



Fonte: CEMIG, 2011.

Foram utilizados dois transformadores zig-zag de 75 kVA em paralelo, com o objetivo de aterrar a usina. Segundo Monteiro Júnior (2014), o transformador do tipo zig-zag é reatância de alta impedância para a sequência positiva e negativa. Caso haja desequilíbrios, faltas, harmônicos de sequência zero, os transformadores são caminhos para a mitigação desses casos.

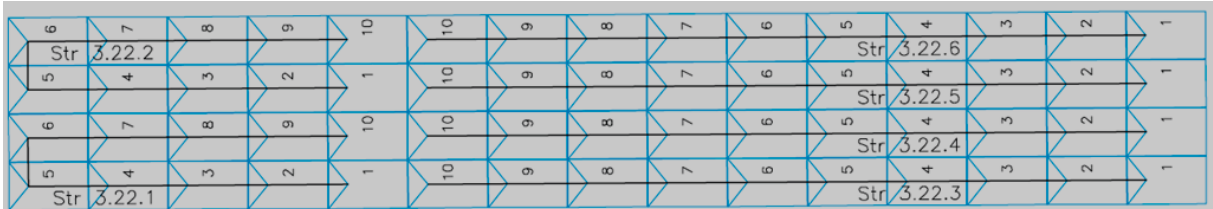
Os inversores escolhidos, *Ingecon Sun Smart 15LT*, para esta usina foram os do tipo *string inverters*, inversores de pequena potência que são normalmente utilizados em pequenas instalações, com o objetivo de maximizar a geração de energia solar. (Monteiro Júnior, 2014).

O inversor possui um modo, para esse desequilíbrio da geração, um rastreamento de máxima potência (*MPPT-maximum power point tracker*), assim podendo gerar com a máxima potência de cada fase, sendo que, mesmo assim, pode injetar corrente desequilibrada. As características deste modelo de inversor são:

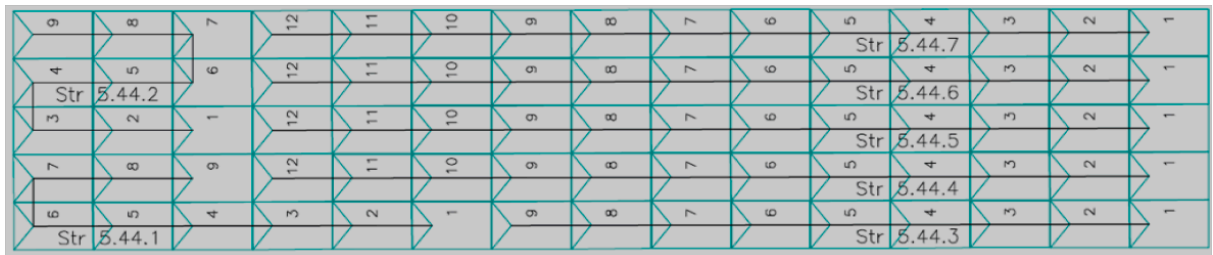
- Potência nominal: 15kW;
- Numero de MPPT: 3;
- Tecnologia do conversor: *transformerless*;
- Tipo de sistema: rede trifásica a quatro fios (necessita de neutro);

O inversor número 85 está desequilibrado. Como podemos observar a quantidade dos arranjos é o que determina se um inversor está desequilibrado ou equilibrado. Na figura, mostra os tipos arranjos nos inversores.

Figura 27 - arranjos dos módulos fotovoltaicos, em (a) são 60 modulos e em (b) são 75 modulos.



(a)



(b)

Fonte: Martifer, 2013

Sendo que em (a) são arranjos de 60 módulos fotovoltaicos e em (b) são arranjos de 75 módulos fotovoltaicos. Dentro da usina podemos observar diversos inversores tanto equilibrados, tipo (a), quanto desequilibrados, tipo (b), formando a usina.

4 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Neste capítulo mostra as análises das medições, sendo observada a potência total das fases, tensão, corrente e a taxa de distorção harmônica total (DHT), tanto de tensão e corrente.

Os dados coletados, para a realização deste trabalho, foram retirados de Monteiro Junior (2014), cujo trabalho é similar, análise de distorção harmônica, porém com uma complexidade muito maior, usando o *PowerLog 5.6v* e Microsoft Excel.

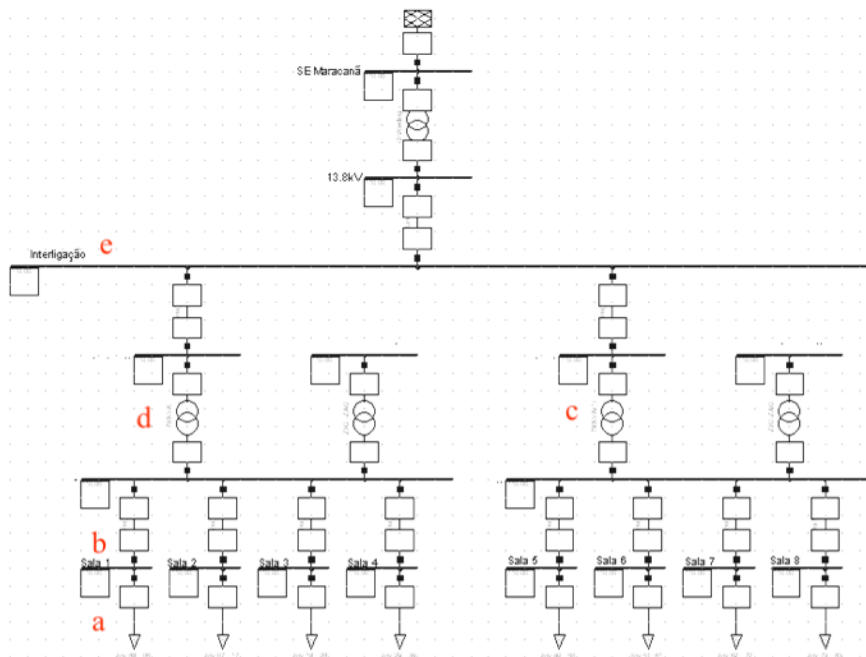
Os dados apresentados correspondem aos dias de 21 e 22 de setembro de 2014, onde os mesmos foram escolhidos dentre todos, por causa da potência gerada de cada um, sendo o dia 21 o de menor geração, e o dia 22 sendo a maior geração. Foram realizando medições simultâneas em cada lugar de medição.

Neste trabalho em específico, ficou com a análise da STI-1, com seus 11 inversores e a análise do inversor 85 (presente na STI-1), logo após análises dos seus efeitos nas subestações elevadoras e na interligação USF-Mineirão/CEMIG.

4.1 Ponto de Medições

Os locais de medição são ilustrados na figura, onde (a) inversor numero 85, (b) na STI-1, (c) na SE NORTE,(d) na SE SUL, (e) na interligação:

Figura 28 - Plata baixa, locais de medição



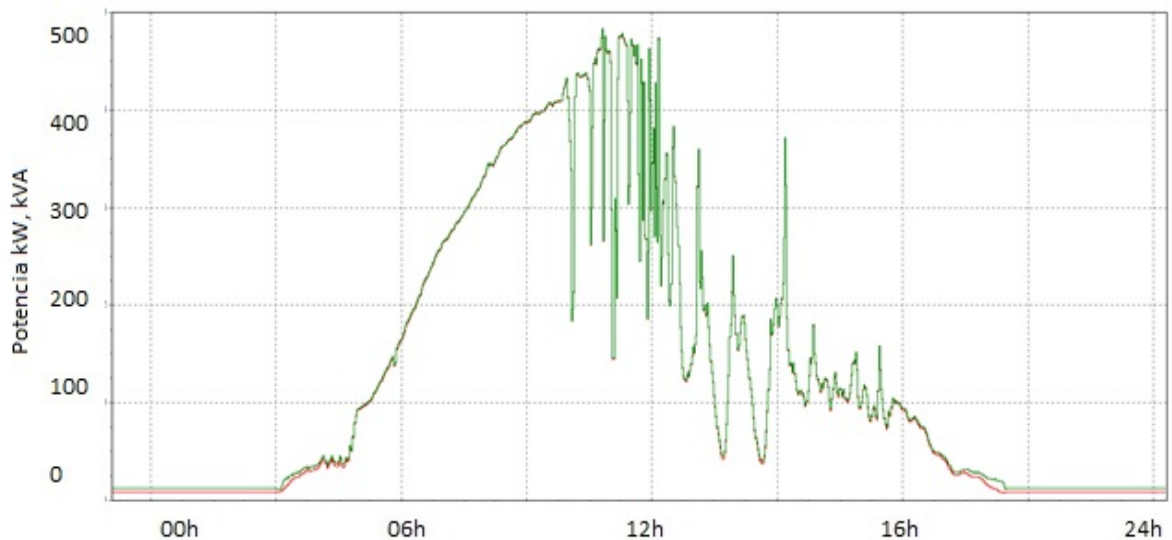
Fonte: Adaptado de Monteiro Júnior, 2014.

Durante as medições foram analisados os seguintes parâmetros:

- Tensão eficaz e fundamental;
- Corrente eficaz e fundamental;
- Ângulo de tensão;
- Ângulo de corrente;
- Potência ativa, reativa e aparente;
- Fator de potência;
- Flutuação de tensão;
- Distorção harmônica de tensão e corrente.

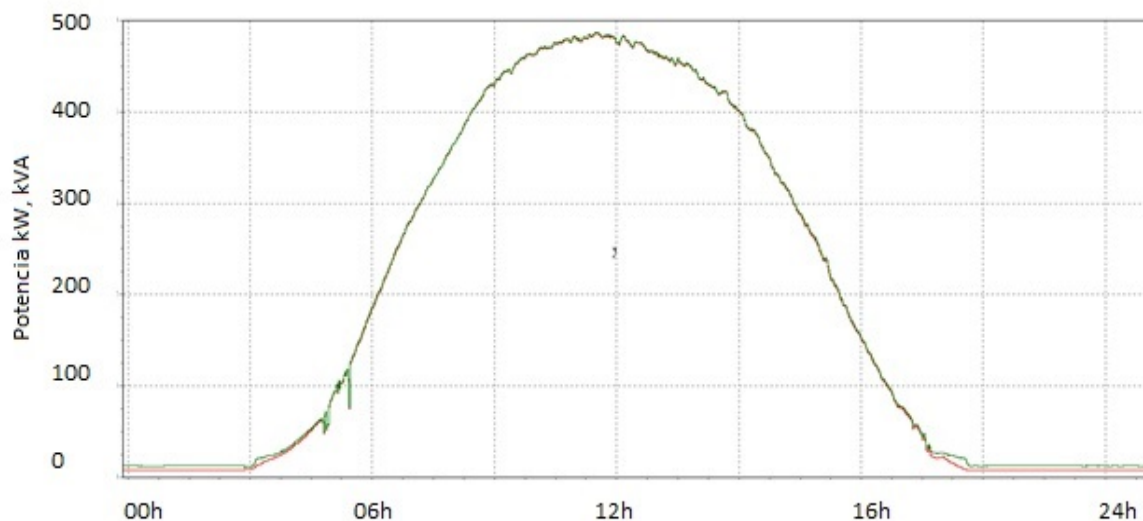
Antes de verificar as análises de distorção harmônica, podemos observar o comportamento da potência de geração ao longo do trabalho, observar figuras 29 e 30. Os dados dos dias 21 e 22 de setembro de 2014, em um período de 00:00 as 24:00, retirados diretamente do *PowerLog*.

Figura 29 - Potência Ativa e Aparente, dia 21 de setembro.



Fonte: Autor

Figura 30 - Potência Ativa e Aparente, dia 22 de setembro.



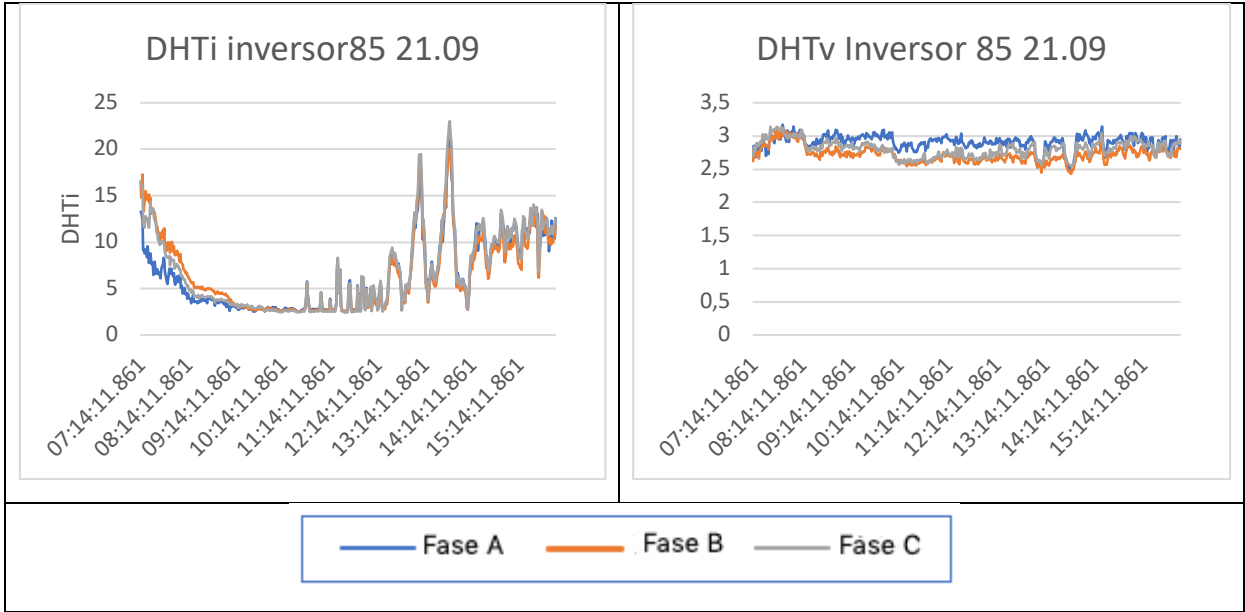
Fonte: Autor

No dia 21 pior dia de geração de energia, pode-se observar que aparecimento de nuvens faz com que a geração de energia elétrica caia, e no dia 22, melhor dia de geração, mostra um dia com poucas nuvens, fazendo com que a geração de energia elétrica seja alta.

4.2 Medições no Inversor

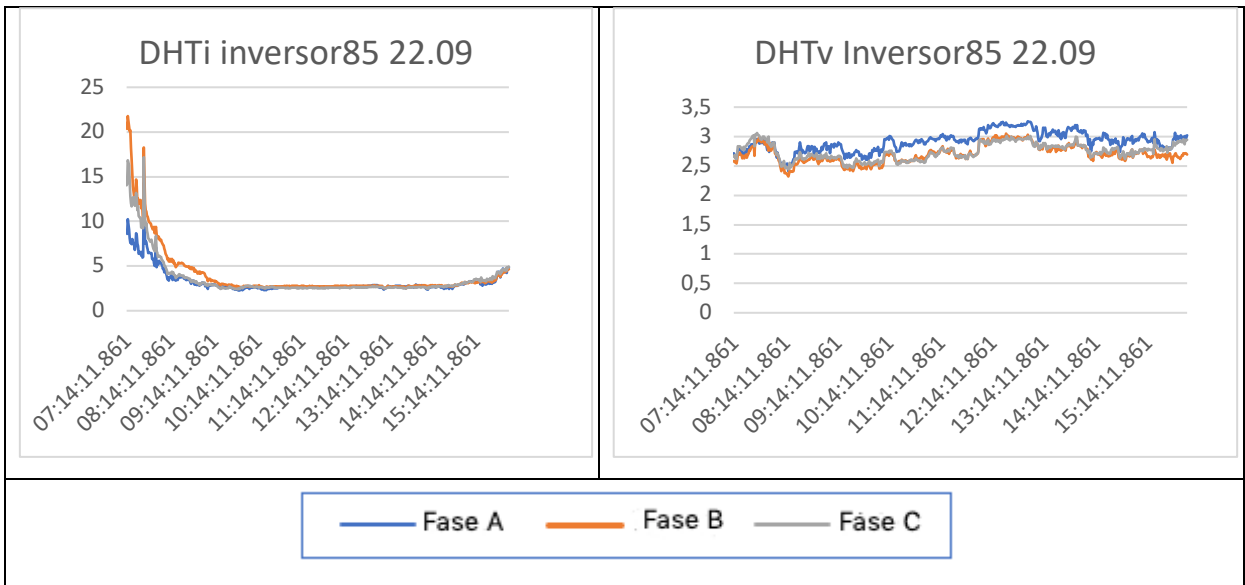
A análise do inversor foi feita no inversor n 85, localizado na STI-01, conectada na subestação elevadora sul, que agrega mais três STI's. Nas figuras 31 e 32, mostra os índices de DHTi e DHTv, inicialmente com o dia 21 e logo depois o do dia 22, dados tratados através do excel.

Figura 31 - DHTi e DHTv, no Inversor dia 21/09



Fonte: Autor

Figura 32 - DHTi e DHTv, no inversor no dia 22/09



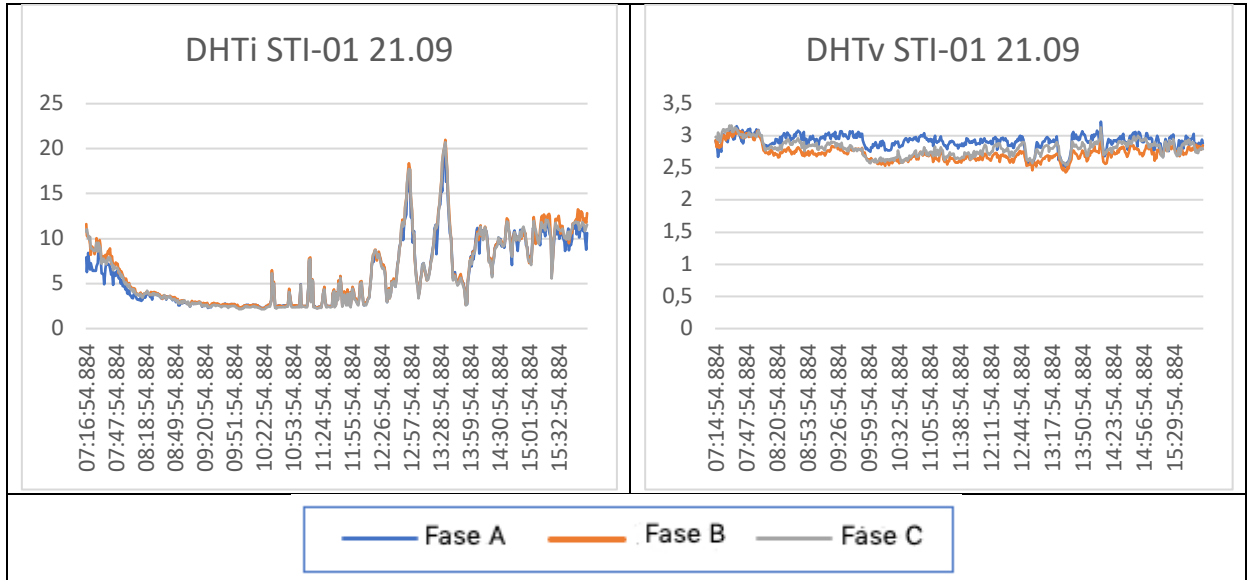
Fonte: Autor

Pode ser observado o DHT ao longo do dia, onde a DHTv chega próximo a 3,3% enquanto a DHTi varia de 3,4% a 2,2% em média na geração. Nos dois casos a DHT de tensão acompanha a potência de geração, enquanto a DHT de corrente diminui ao longo da geração.

4.3 Medições STI-01

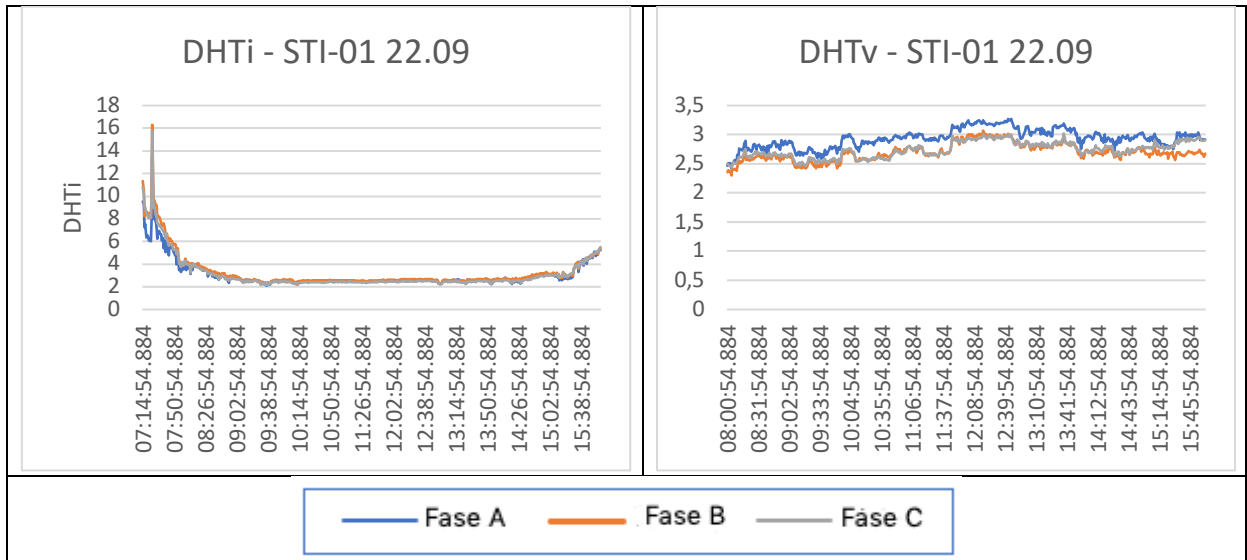
Na sala STI -01 mostra o arranjo de 11 inversores e como eles se comportam em conjunto, assim podemos observar a DHTv e DHTi nas figuras 33 e 34, nos dois dias, dados tratados através do excel.

Figura 33 - DHTi e DHTv, STI-1 no dia 21/09



Fonte: Autor.

Figura 34 - DHTi e DHTv, STI-1 no dia 22/09



Fonte: Autor.

Ao observar os resultados, mostra uma redução dos índices, tanto de corrente quanto de tensão, porém não significativa, como mostra a tabela 2:

Tabela 2 - Porcentagens de DHT, no dia 21 e 22, Inversor e STI-1

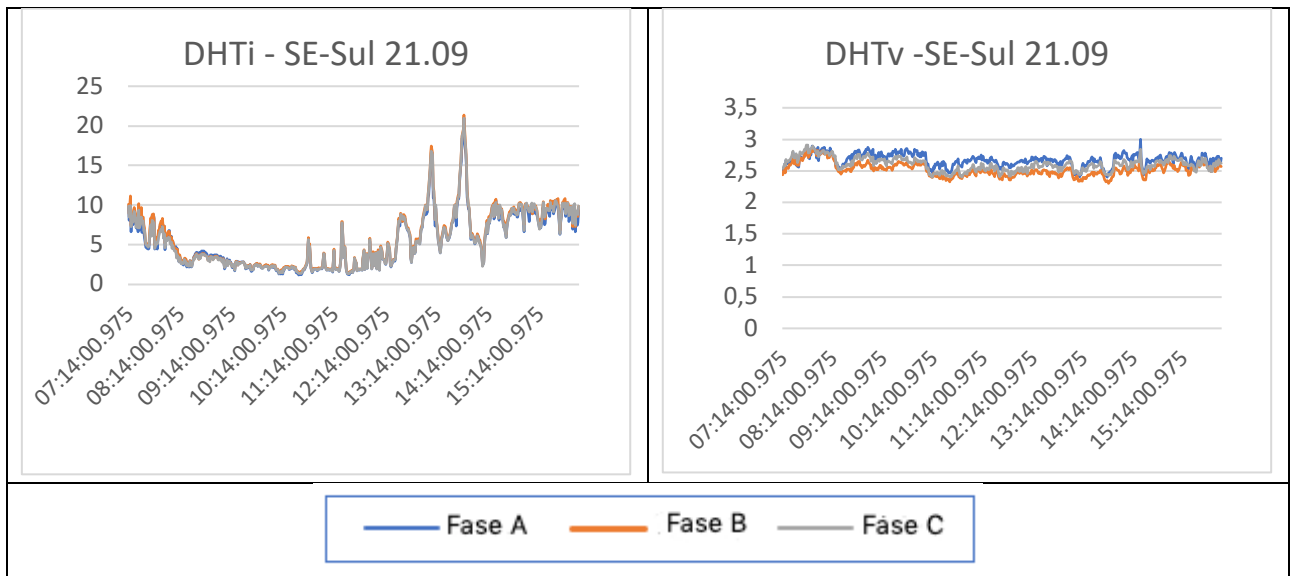
DATA	21/09		22/09	
Indicadores	DHTi	DHTv	DHTi	DHTv
Inversor 85	5,21%	2,81%	2,76%	2,78%
STI-01	4,94%	2,81%	2,61%	2,78%

Fonte: Autor

4.4 Medições SE Elevadora

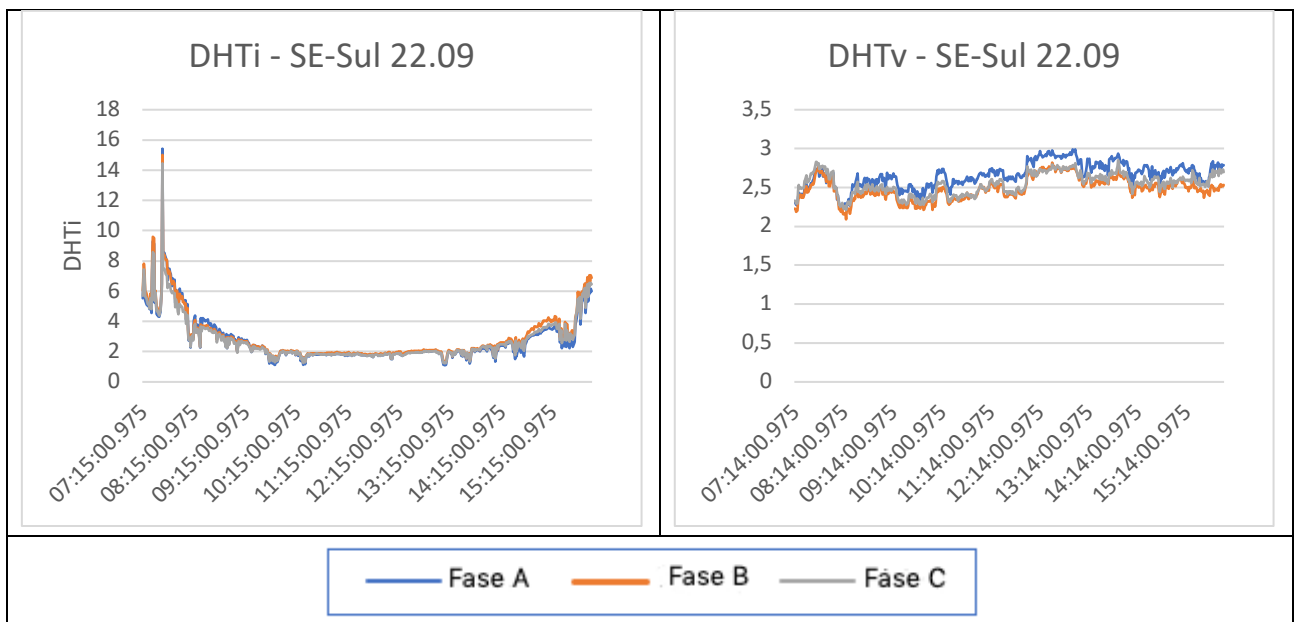
Na subestação elevadora sul possui quatro STI, onde cada uma possui 11 inversores cada. As figuras 35 e 36 mostram os indicadores de cada dia na subestação, dados tratados através do excel.

Figura 35 - DHTi e DHTv, SE - Sul no dia 21/09



Fonte: Autor

Figura 36 - DHTi e DHTv, SE - Sul no dia 22/09



Fonte: Autor

Podemos observar uma redução muito significativa em comparação com o inversor n 85, devido a junção de mais inversores, que neste caso os arranjos estão com 44 inversores, a tabela mostra a redução em comparação com a primeira medição.

Tabela 3 - Porcentagens de DHT, no dia 21 e 22, Inversor e SE-Sul

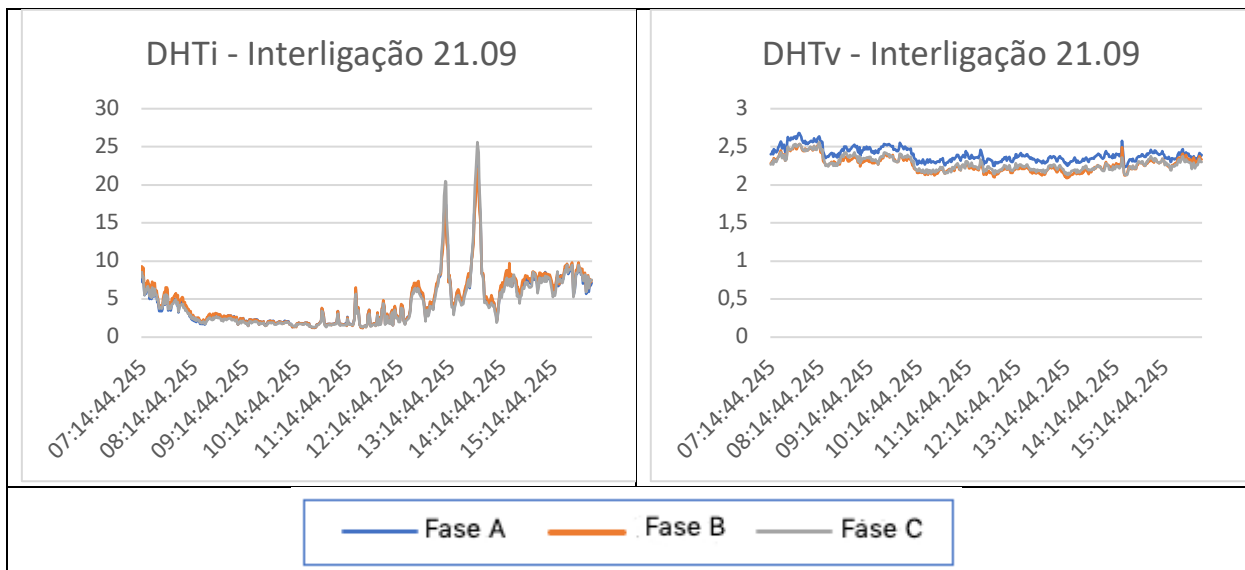
DATA	21/09		22/09	
Indicadores	DHTi	DHTv	DHTi	DHTv
Inversor 85	5,21%	2,81%	2,76%	2,78%
SE-SUL	4,65%	2,6%	2,56%	2,17%

Fonte: Autor

4.5 Medições na Interligação

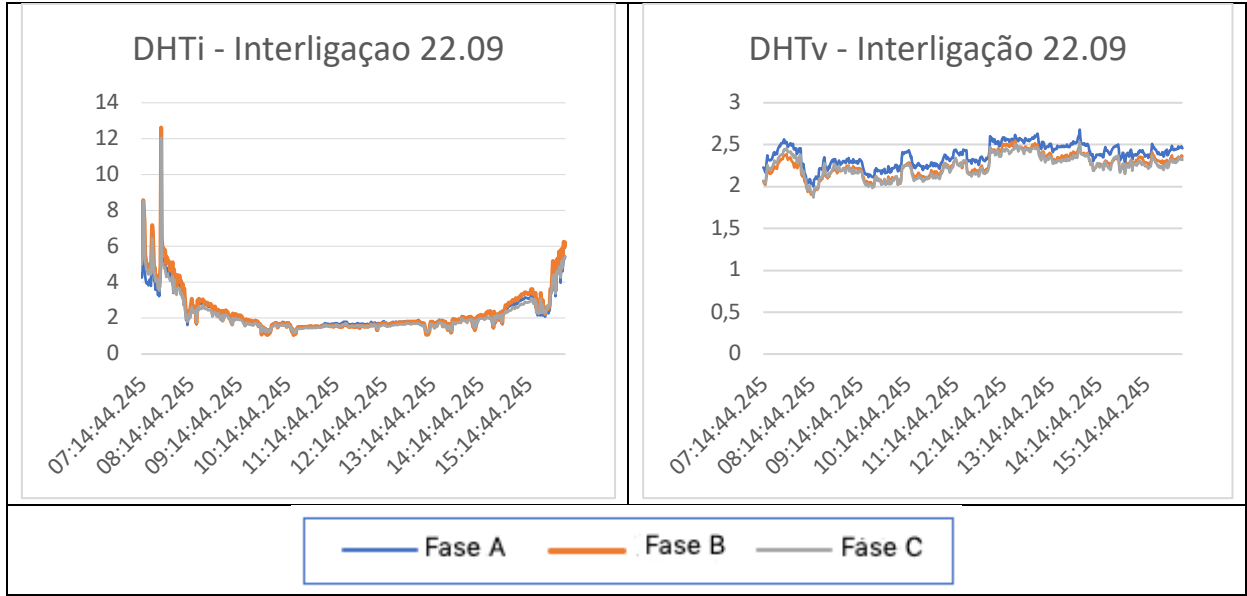
A interligação é o PAC, ponto de acoplamento comum, local onde podemos comparar com os índices que são tabelados nas normas. As figuras 37 e 38 mostram os indicadores de cada dia e a quantidade de distorção harmônica, dados tratados através do excel.

Figura 37 - DHTi e DHTv, Interligação (PAC) no dia 21/09



Fonte: Autor.

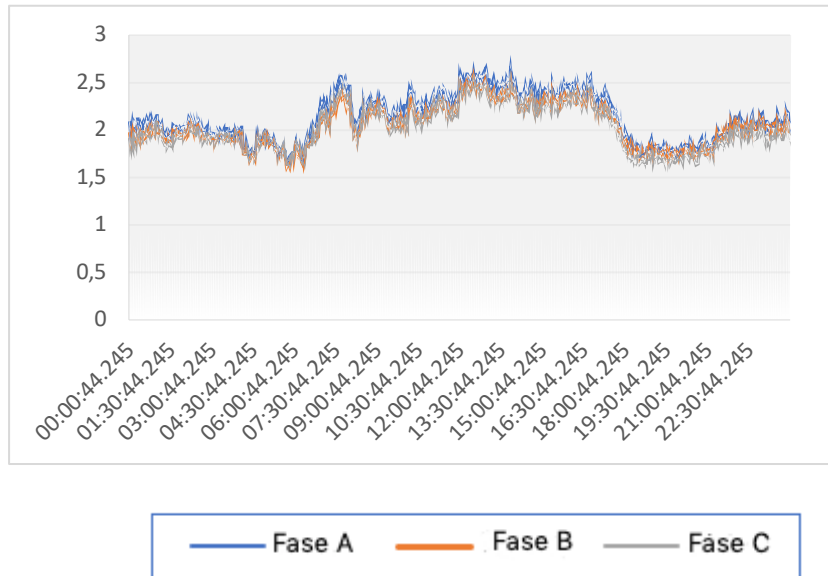
Figura 38 - DHTi e DHTv, Interligação (PAC) no dia 22/09



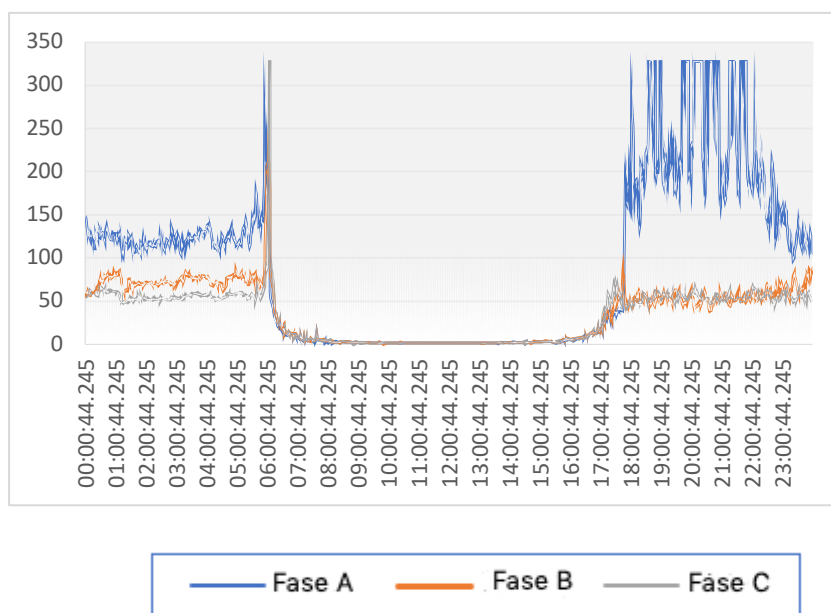
Fonte: Autor

Realizando a análise do PAC, mostra a redução muito grande em comparação com o inversor 85, com redução de 24,55% de DHTv e 31,86% de DHTi. Na figura 39 mostra o histograma ao longo do dia 22 na usina, são dados direto do PAC.

Figura 39 - Histograma de (a)DHTv e (b)DHTi, ao longo do dia 22/09



(a)



(b)

Fonte: Autor

Ao analisar o histograma da distorção, figura 39, podemos observar o fluxo do campo magnético no transformador alterando-se, devido à injeção de corrente da rede de média tensão, quando os picos são elevados a 350%. Isso mostra a rede com uma distorção harmônica.

Na tabela 4, mostra a média de cada local de medição pelos dias correspondentes. Observa-se que a redução dos índices é de 24,55% de DHT_v e 31,86% de DHT_i, quando comparamos os índices do inversor para a interligação.

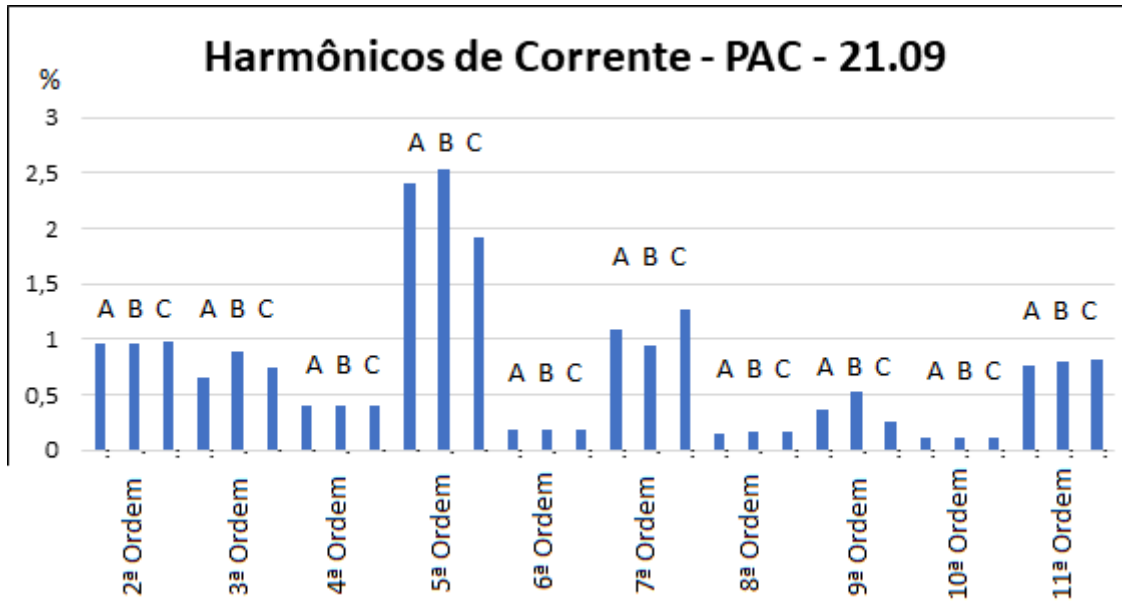
Tabela 4 - Porcentagens de DHT, no dia 21 e 22, Comparação Geral.

DATA	21/09		22/09	
	DHT _i	DHT _v	DHT _i	DHT _v
Inversor 85	5,21%	2,81%	2,76%	2,78%
STI-01	4,94%	2,81%	2,61%	2,78%
SE-SUL	4,65%	2,6%	2,56%	2,17%
Interligação (PAC)	3,55%	2,12%	2,29%	1,83%

Fonte: Autor.

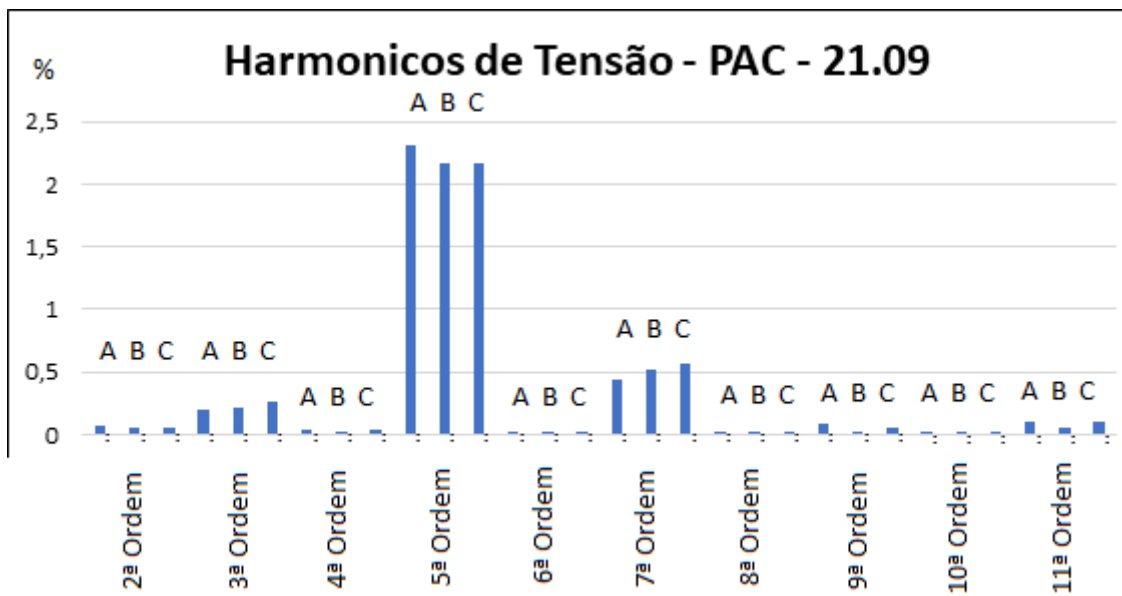
Nas Figuras 41, 42, 43 e 44 podemos observar cada componente de harmônica e seu percentual, além da presença da harmônica de quinta ordem em todos os casos.

Figura 40 - Harmônico de corrente de cada Ordem



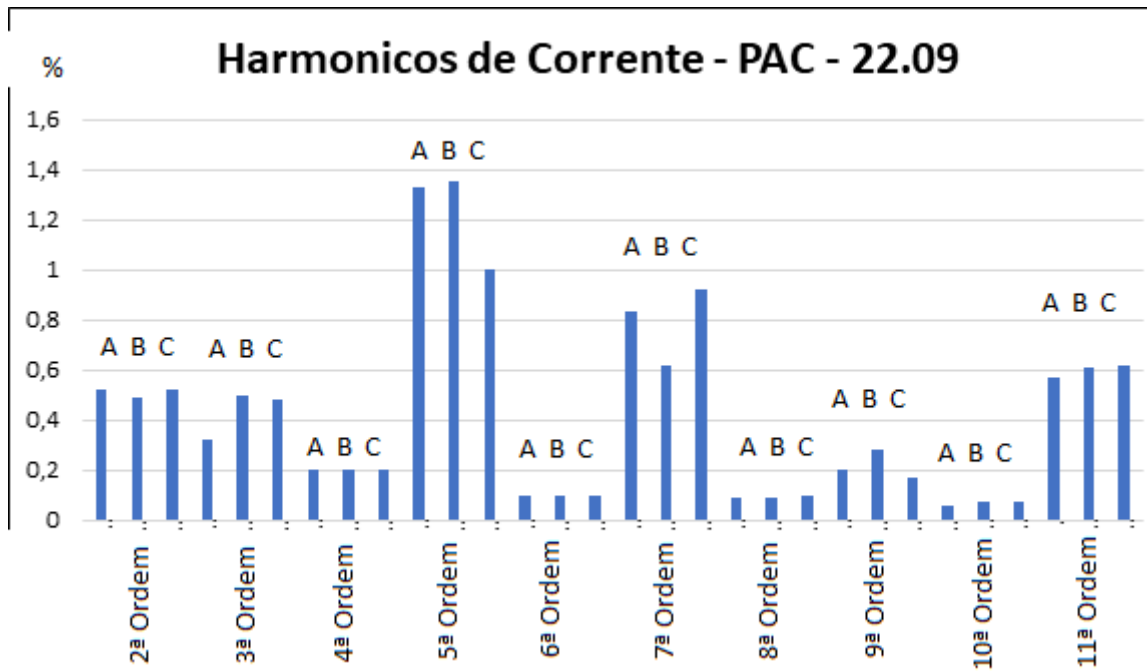
Fonte: Autor

Figura 41 - Harmônico de tensão de cada Ordem



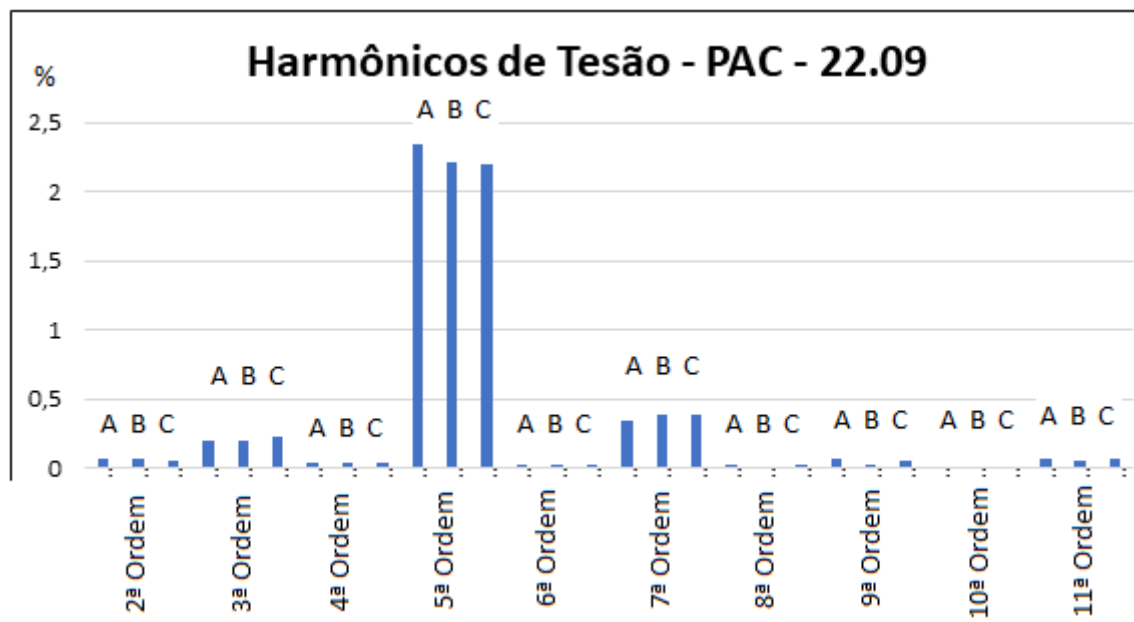
Fonte: Autor

Figura 42 - Harmônico de corrente de cada Ordem



Fonte: Autor

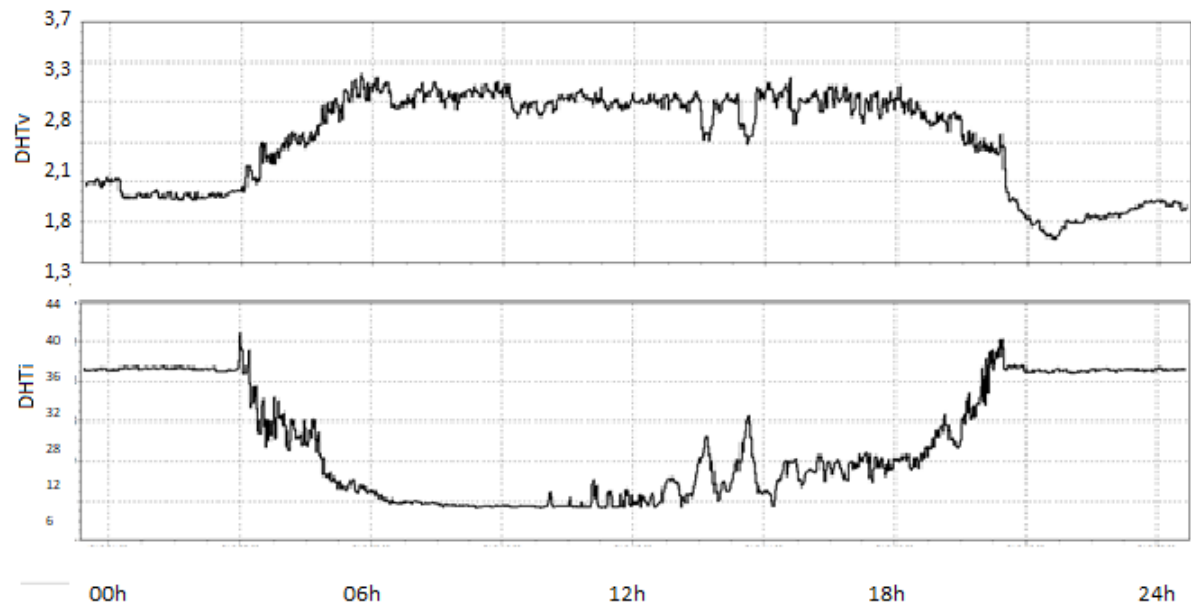
Figura 43 - Harmônico de tensão de cada Ordem



Fonte: Autor.

A presença da distorção harmônica, mesmo quando não há geração de energia, e observando o fluxo da potência em direção ao transformador, mostra que a geração não injeta altas taxas de harmônicos como mostra os histogramas ao longo do dia, figura 44, retirado do *PowerLog*.

Figura 44 – DHTv e DHTi, no PAC ao longo do dia



Fonte: Autor

Ao analisar a distorção harmônica alta, quando não há geração de energia, a corrente permanece em baixa, fazendo com que o DHT mesmo alto não seja significativo ao sistema geral.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A poluição do sinal de energia elétrica pode ser um problema muito sério para os equipamentos, podendo fazer com que não funcionem corretamente ou até danificá-los, ocasionado em explosões, como no caso de banco de capacitores. A qualidade de energia não é somente em níveis de tensão e frequência corretas, mas também com fator de potência, distorção harmônica, e demais indicadora para manter um produto com corretos fatores.

A distorção harmônica ocorre devido a presença de cargas não-lineares no sistema, como conversores, podem causar dentro da instalação sobreaquecimento nas máquinas elétricas, acionamento indevido nos dispositivos de proteção, redução da vida útil dos capacitores, dentre outros.

Os inversores fotovoltaicos são uma das principais fontes geradoras de distorções harmônicas em sistemas fotovoltaicos, mesmo com os seus controles sofisticados, como o de modulação de largura de pulso, produz mesmo reduzido o conteúdo.

Podendo acontecer ressonância no sistema causado pela propagação de inter-harmônicos e harmônicos de altas ordens. Devido as altas frequências de chaveamento dos inversores.

O uso do *software, PowerLog v5. 6*, na busca de manipulação de dado, se apresentou complexa, uma vez que o PC utilizado não conseguiu responder de forma satisfatória, usado somente para a geração de gráficos de potência e exportar dados. Então foram exportados os dados e manipulados diretamente com Microsoft Excel, facilitando a manipulação e a geração dos demais gráficos.

A inserção do transformador zig-zag, contemplado na ND 5.31, da CEMIG, mostra o confinamento dos harmônicos de ordem três, por causa de sua construção em Delta, como mostrados nos resultados.(Monteiro Júnior, 2014).

Durante o trabalho, pode-se notar que a DHT estava muito alta quando não havia geração de energia, período de 00h00minhs as 08h00minhs e 16h00minhs as 23h59minhs, onde a corrente se encontrava quase zero as DHTi são muito grandes, chegando aproximadamente 40% no PAC, podendo ser devido ao transformador se encontrar à vazio, interferência da própria rede de distribuição injetando esse harmônico.

Neste caso o a usina não está injetando energia na distribuição, mas está sendo consumida pelo transformador a vazio, com correntes baixíssimas. Quando a usina está

gerando energia e injetando na distribuição os índices de DHTi são baixos, onde são os dados que foram analisados para elaboração deste trabalho.

Diante dos resultados apresentados, os inversores estão injetando no Ponto de Acoplamento Comum uma porcentagem de DHTv entre 2,12% a 1,83%, sendo o máximo 5% , e de DHTi entre 3,55% a 2,29%, máximo de 8%, conclui-se que os inversores estão injetando harmônico dentro dos limites da norma, e estão em conformidade. Ainda, conforme o manual do fabricante, os inversores não chegam a mais 3% de DHTv.

O trabalho mostra que a cada local que foi realizado a medição, a mitigação das correntes harmônicas são muito visível, devido a múltiplos inversores. Assim, quanto mais a quantidade de inversores na instalação menor será os índices de harmônicos presentes na instalação e menor será a injeção da mesma na rede de média.

5.1 Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, podem ser identificadas umas possibilidades de trabalhos futuros, que possam dar continuidade a pesquisa, nas quais incluem:

- Análise dos outros fenômenos que cercam o PRODIST, na parte de qualidade de energia;
- Inserir filtros e observar o comportamento das distorções de altas ordem, com o objetivo de mitigar as distorções harmônicas;
- Verificar a integridade dos equipamentos que fazem parte da instalação elétrica da edificação, como transformadores, motores, etc.;
- Verificar outras marcas de inversores de geração fotovoltaicas, para verificar se estão corretamente gerando a quantidade prometida;
- Realizar análise em locais diferentes com uma quantidade de maquinas que podem ser usados durante dia e noite, e assim verificar a sua interferência na rede, como instalações de porte indústrias ou outras usinas.

REFERÊNCIAS

ANGOLA POWER SERVICES . **Ondas Harmônicas Origem e Causa**, 2012. Disponível em:<<http://angolapowerservices.blogspot.com/2012/10/ondas-harmonic-as-origem-causas-e.html>>. Acesso em: 15 maio de 2018.

BLUESOLAR, D. E. **Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**: Livro Digital de Introdução aos Sistemas Solares, São Paulo, 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**, 2017. Acesso em: 17 de Abril de 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**, 2017. Acesso em: 17 de Abril de 2018.

BRASIL. ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Capacidade de geração do Brasil - BIG** banco de informações de geração. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 24 de maio de 2018.

BRASIL. ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Geração distribuída**. Disponível em:< <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em 24 de maio de 2018.

BRASIL. ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 786/2017**. Brasília: ANEEL, 2017.

BRASIL. ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 687/2015**. Brasília: ANEEL, 2015.

BRASIL. ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 482/2012**. Brasília: ANEEL, 2012.

BRASIL. ANEEL, Cadernos Temáticos. Micro e Minigeração Distribuída. **Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação–Cedoc, 2014.**

CHAPMAN, D. **Harmônicas: Causas e Efeitos**, 2002. Disponível em <<http://procobre.org/media-center/pt-br/component/jdownloads/send/2-publicacoes/26-guia-3-1-harmonic-as-causas-e-efeitos.html>>. Acesso em: 24 de Maio de 2018.

COLAFERRO, L. **Energia Solar no Brasil: Um panorama para [Você] entender tudo.** Disponível em <<https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-no-brasil-panorama/>> julho de 2018.

DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H, Wayne, Electrical Power Systems Quality, 2. ed. McGraw-Hill Companies, 2004.

FITZGERAL, A. E.; JR., Charles K.; UMANS, Stephen D., **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**, 6. ed. McGraw-Hill Companies, 2008.

FLUKE CORPORATION, **Fluke434-II/435-II/437-II – Analisador de Qualidade de Energia**, Manual do Usuário, Disponível em <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umpor0100.pdf> janeiro de 2012.

FLUKE CORPORATION, **Power Log – PC Application Software**, Manual do Usuário, Disponível em <<https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/PowerLogumpor0300.pdf>> maio de 2007.

HALKOSAARI, T.; KUUSELA, K.; TUUSA, H. Effect of Non-Idealities on the Performance of the 3-Phase Current Source PWM Converter. **IEEE Power Electronics Specialists Conference – PESC**, Junho 2001.

IEC 61000-3-2. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 2: Limits for

Harmonic Current Emissions (Equipment input current < 16A per phase). **International Electrotechnical Commission - IEC**, 2005.

IEC 61000-3-4: “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A”. **International Electrotechnical Commission**, 2000.

IEEE Power and Energy Society. IEEE Std 519-2014, **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, New York, 27 mar. 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6826457>>. Acesso em: 28 agosto. de 2018.

IEEE. IEEE STD 519-2014 — **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. , 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6826457>>. Acesso em: 28 jul. de 2018.

INGETEAM ENERGY S.A. **Ingecon Sun Smart TL Installation manual**. Ingeteam Energy S.A. [S.l.], p. 64. 2012.

INGETEAM. <http://www.ingeteam.com>. <http://www.ingeteam.com>, 2013. ISSN PRD_798 Ingecon Sun Smart. Disponível em: <http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Productos/Documento/PRD_798_Archivo_ingecon-sun-smart-tl.pdf>. Acesso em: 7 setembro 2018.

INPE, Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ed. , 2017, Disponível em <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf > Acesso em: 7 setembro 2018.

LATHEEF, A. **Harmonic Impact of Photovoltaic Inverter Systems on Low and Medium Voltage Distribution Systems. Masters of Electrical Engineering**. University of Wollongong, Australia: [s.n.], 2006.

LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. **Harmônicas em Sistemas Elétricos**. 1. ed. Rio de

Janeiro: Elsevier, 2014.

MARTIFER SOLAR. **Usina Solar Fotovoltaica USF - Mineirão**. MARTIFER SOLAR. Belo Horizonte - MG, 2013.

MONTEIRO JÚNIOR, A. **Modelagem de Usina Fotovoltaica do Estádio do Mineirão para Estudos de Propagação Harmônica**, Belo Horizonte – MG, dezembro de 2014.

MORENO, H. **Harmônicas nas Instalações Elétricas**, 2001. Disponível em:<<http://procobre.org/pt/?download=5486>>. Acesso em: 15 maio de 2018.

NAHVI, Mahmood; EDIMINISTER, Joseph. **Circuitos Elétricos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**, 2017. Disponível em < <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor> >. Acessado em 3 de novembro de 2018.

PORTAL ELETRICISTA . **Correção de Fator de Potência**, 2014. Disponível em:< <http://www.portaleletricista.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/>>. Acesso em: 15 maio de 2018.

REUTERS. **Energia solar deve crescer 44% no Brasil em 2019 com impulso de geração distribuída**, 2019. Disponível em <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral/energia-solar-deve-crescer-44-no-brasil-em-2019-com-impulso-de-geracao-distribuida,70002683737>>
> Acesso em: 14 setembro 2018.

ROCHA, J. E., Apostila. **Qualidade de Energia Elétrica**– Departamento de Eletrotécnica da UTFPR, Curitiba,PR, Brasil, 2016.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. LABSOLAR, 2004. Disponível em: <<http://www.fotovoltaica.ufsc.br/conteudo/paginas/6/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf>>. Acesso em: 17 de setembro de 2016..

SANKARAN, C., **Power Quality**. 1. ed. Boca Raton – Florida: CRC Press, 2002.

WATANABE, E.; STEPHAN, R. **Potência ativa e reativa instantâneas em sistemas elétricos com fontes e cargas genéricas**. [S.l.], [1991 ou 1992]. Disponível em: <<http://www.sba.org.br/revista/volumes/v3n1/v3n1a02.pdf>>. Acesso em: 15 maio de 2018.