

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TAÍS MACHADO QUEIROZ

**ANÁLISE DOS INDICADORES DE QUALIDADE DA
ENERGIA EM UM SISTEMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICO DO IFMG CAMPUS FORMIGA**

FORMIGA – MG
2018

TAÍS MACHADO QUEIROZ

**ANÁLISE DOS INDICADORES DE QUALIDADE DA
ENERGIA EM UM SISTEMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICO DO IFMG CAMPUS FORMIGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura

FORMIGA – MG

2018

TAÍS MACHADO QUEIROZ

**ANÁLISE DOS INDICADORES DE QUALIDADE DA
ENERGIA EM UM SISTEMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICO DO IFMG CAMPUS FORMIGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal
de Minas Gerais como requisito para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Souza Moura – Orientador

Profa. Aline Fraga Silva

Prof. Dr. Paulo Dias Alecrim

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem o intuito de abordar conceitos utilizados nas análises das distorções de corrente e tensão nas instalações do IFMG Campus Formiga. Neste trabalho, pretende-se analisar o comportamento da qualidade da energia elétrica (QEE) devido à presença de um sistema de geração fotovoltaico no campus. Este sistema de geração fotovoltaico conta com a presença de um inversor de frequência que apresenta elementos que prejudicam a qualidade da energia elétrica. O emprego de inversores de frequência em ambientes industriais para melhor eficiência dos equipamentos e um melhor aproveitamento da energia elétrica para fins comerciais e até mesmo residenciais, tem sido uma opção muito utilizada. No entanto, o conteúdo harmônico gerado pelo inversor varia, assim, podendo causar danos. Deseja-se comparar os resultados obtidos utilizando o analisador de qualidade de energia Minipa® ET-5061C, com normas internacionalmente reconhecidas e verificar o enquadramento da qualidade de energia elétrica nestas normas, sem que haja utilização de qualquer tipo de sistema que venha minimizar a distorção gerada pelos inversores.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, Qualidade da Energia Elétrica, Analisador de Qualidade, Distorções Harmônicas e Energia Solar.

ABSTRACT

This final paper is intended to address concepts used in current and voltage distortion analysis at IFMG Campus Formiga facilities. In this work, we intend to analyze the behavior of electric power quality with the presence of a photovoltaic generation system on campus. This photovoltaic generation system has the presence of a frequency inverter that presents elements that impair the quality of the electric energy. The use of frequency inverters in industrial environments for better equipment efficiency and better use of electricity for commercial and even residential purposes has been a widely used option. However, the harmonic content generated by the inverter thus varies and can cause damage. It is desired to compare the results obtained using the energy quality analyzer Minipa® ET-5061C, with internationally recognized standards and to check the quality of electric energy framework in these standards, without using any type of system that will minimize the distortion generated by the inverters.

Keywords: Grid-connected Photovoltaic System, Electrical Power Quality and Quality Analyzer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema visual de Massa de Ar.	19
Figura 2.2 - Evolução da eficiência de células fotovoltaicas.	21
Figura 2.3 - Esquema de absorção de fótons pelo material semiconductor.	22
Figura 2.4 - Junção p-n de um material semiconductor extrínseco.	23
Figura 2.5 - Configuração de um SFI.	25
Figura 2.6 - Exemplo de configuração de um SFH.	26
Figura 2.7 - Configuração de um SFCR.	26
Figura 2.8 - Componentes de um módulo fotovoltaico.	28
Figura 2.9 - Curvas I-V e P-V para um módulo de potência nominal de 100 Wp.	29
Figura 2.10 - Influência da variação de temperatura e irradiância solar sobre a curva I-V.	30
Figura 2.11 - Influência da variação de irradiância solar sobre as curvas I-V e P-V.	30
Figura 3.1 - Forma de onda distorcida.	36
Figura 3.2 - Forma de onda distorcida e suas componentes harmônicas.	40
Figura 4.1 - Faixas de tensão em torno de TR.	48
Figura 5.1 - Tela de configuração do analisador de qualidade de energia para um sistema elétrico trifásico a quatro fios em estrela.	60
Figura 5.2 - Conexão do instrumento em sistemas trifásicos a quatro fios.	61
Figura 6.1 - Tensão em regime permanente da Fase 1.	63
Figura 6.2 - Tensão em regime permanente da fase 2.	64
Figura 6.3 - Tensão em regime permanente da fase 3.	64
Figura 6.4 - Fatores de potência medidos no quadro de distribuição de circuitos do Bloco B do IFMG - Campus Formiga.	65
Figura 6.5 - Fatores de potência medidos no quadro de distribuição de circuitos do Bloco B do IFMG - Campus Formiga em 2016.	66
Figura 6.6 - Distorção harmônica total da fase 1.	67
Figura 6.7 - Distorção harmônica total da fase 2.	67
Figura 6.8 - Distorção harmônica total da fase 3.	68
Figura 6.9 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes pares não múltiplas de três da fase 1.	68

Figura 6.10 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes pares não múltiplas de três da fase 2.	69
Figura 6.11 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes pares não múltiplas de três da fase 3.	69
Figura 6.12 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três da fase 1.....	70
Figura 6.13 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três da fase 2.....	70
Figura 6.14 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três da fase 3.....	71
Figura 6.15 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes múltiplas de três da fase 1.....	71
Figura 6.16 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes múltiplas de três da fase 2.....	72
Figura 6.17 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes múltiplas de três da fase 3.....	72
Figura 6.18 - Fator de equilíbrio de tensão.	73
Figura 6.19 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 3ª ordem da Fase 1 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).	74
Figura 6.20 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 5ª ordem da Fase 1 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).	75
Figura 6.21 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 3ª ordem da Fase 2 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).	75
Figura 6.22 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 5ª ordem da Fase 2 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).	76
Figura 6.23 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 3ª ordem da Fase 3 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).	76
Figura 6.24 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 5ª ordem da Fase 3 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros elétricos de um módulo, modelo CS6K-280P, da Canadian Solar....	28
Tabela 2.2 - Coeficientes de temperatura de um módulo, modelo CS6K-280P, da Canadian Solar.....	29
Tabela 3.1 - Distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica.	36
Tabela 4.1 - Terminologia das grandezas de harmônicos.	49
Tabela 4.2 - Limites de distorções harmônicas totais, em % da tensão fundamental.	50
Tabela 4.3 - Terminologia das grandezas de desequilíbrio de tensão.	50
Tabela 4.4 - Limites para os desequilíbrios de tensão.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM – *Air Mass* (Massa de Ar)

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ASD - *Adjustable speed drive* (Accionadores de Velocidade Ajustável)

BT – Baixa Tensão

DICRI - Duração da Interrupção Individual Ocorrida em Dia Crítico

DMIC - Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

EMC - *Electromagnetic Compatibility* (Compatibilidade Eletromagnética)

EVA - *Ethylene Vinyl Acetate* (Espuma Vinílica Acetinada)

GD – Geração Distribuída

IEC - *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)

IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (Instituto de engenheiros eletricitas e eletrônicos)

IFMG – Instituto Federal de Minas Gerais

IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transistor Bipolar de Porta Isolada)

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor)

MPPT - *Maximum Power Point Tracking* (Sistema de Seguidor do Ponto de Potência Máxima)

MT – Média Tensão

P - Potência Ativa

PLC – *Programmable Logic Controller* (Controladores Lógicos Programáveis)

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

Q - Potência Reativa

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

rms - *root mean square* (valor eficaz)

S - Potência Aparente

SCR - *Silicon Controlled Rectifier* (Retificador Controlado de Silício)

SFCR - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

SFH - Sistemas Fotovoltaicos Híbridos

SFI - Sistemas Fotovoltaicos Isolados

STC - Testes Sob as Condições Padrão de Ensaio

THD - Distorção Harmônica Total

TRIAC - *Triode for Alternating Current* (Triodo para Corrente Alternada)

Var - Volt-ampère-reativo

VA - Volt-ampère

W – *Watts*

Wp – *Watt-peack* (Watt-pico)

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	9
SUMÁRIO.....	11
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	14
1.1 INTRODUÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
CAPÍTULO 2 – SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	17
2.1 INTRODUÇÃO.....	17
2.2 ENERGIA SOLAR	18
2.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	20
2.3.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO	21
2.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	24
2.4.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE (SFCR'S)	26
2.4.1.1 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	27
2.4.1.2 INVERSORES	31
CAPÍTULO 3 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	33
3.1 INTRODUÇÃO.....	33
3.2 DISTÚRBIOS NA REDE ELÉTRICA.....	35
3.3 PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	39
3.3.1 HARMÔNICOS	39

3.3.2	FATOR DE POTÊNCIA.....	41
3.3.3	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	42
3.4	PROCEDIMENTOS E PADRÕES.....	43
CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO – PRODIST.....		45
4.1	INTRODUÇÃO.....	45
4.2	PRODIST MÓDULO 8 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	46
4.2.1	QUALIDADE DO PRODUTO.....	47
4.2.1.1	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE:.....	48
4.2.1.2	FATOR DE POTÊNCIA.....	49
4.2.1.3	HARMÔNICOS	49
4.2.1.4	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	50
4.2.2	INDICADORES DA QUALIDADE DO PRODUTO.....	51
4.2.3	QUALIDADE DO SERVIÇO	54
4.2.4	INDICADORES DE CONTINUIDADE DE SERVIÇO.....	54
CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA.....		59
5.1	INTRODUÇÃO.....	59
5.2	COLETA DOS DADOS	59
5.3	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.....	61
5.4	FATOR DE POTÊNCIA.....	61
5.5	DISTORÇÕES HARMÔNICAS	61
5.6	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	62
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES		63
6.1	INTRODUÇÃO.....	63
6.2	RESULTADOS PARA TENSÃO EM REGIME PERMANENTE	63
6.3	RESULTADOS PARA FATOR DE POTÊNCIA	65
6.4	RESULTADOS PARA DISTORÇÕES HAMÔNICAS	67

6.5	RESULTADOS PARA DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	72
6.6	RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS DADOS DE ANTES E DEPOIS DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	73
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES		78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		79

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A energia é um ingrediente fundamental para o desenvolvimento de um país. Segundo um estudo publicado em 1998 [1], na maioria dos países em que o consumo *per capita* de energia está abaixo de uma tonelada equivalente de petróleo (TEP) por ano, as taxas de alguns indicadores sociais, como analfabetismo e mortalidade, são altas. Por outro lado, a medida que este consumo de energia *per capita* aumenta, as condições sociais melhoram significativamente. O Brasil no ano de 2015, teve um consumo *per capita* de 1,43 toneladas de petróleo [2].

Entre a energia consumida no Brasil, a elétrica representou cerca de 18,57% em 2016, enquanto isso em 2007, a energia elétrica representava 17,63% da matriz energética do Brasil [3]. Embora haja um aumento na utilização de energia elétrica nos últimos anos no país, esse tipo de energia representa pouco na matriz energética brasileira.

A principal fonte de energia elétrica no Brasil é a hidráulica, representando 68,1% da geração de eletricidade, seguida do gás natural e da biomassa com participações de 9,1% e 8,2%, segundo dados mostrados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [3]. Se tratando dessas fontes energéticas tradicionais, embora algumas sejam fontes de energias renováveis, como é o caso das hidrelétricas e dos parques eólicos, suas implantações impactam significativamente os ecossistemas das regiões em torno delas.

As várias discussões entre as vantagens e desvantagens das fontes de geração de eletricidade tradicionais dividem opiniões em vários setores e se arrastam por anos. Fato disso é que o cenário da infraestrutura energética do país vem sendo alterado a cada ano com a busca por soluções mais sustentáveis.

Dentre as fontes renováveis, destaca-se o crescimento da geração distribuída (GD) de energia fotovoltaica. Esses parâmetros apresentados pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) mostram que no ano de 2016 obteve-se um crescimento de 300% no setor de energia fotovoltaica [4]. No entanto, o aumento da disseminação de GD no sistema elétrico pode gerar impactos negativos na qualidade da energia elétrica destes sistemas.

Vários documentos de órgãos internacionais de padronização já foram, e ainda estão sendo, criados com recomendações a fim de orientar e padronizar aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos. No Brasil, a ANEEL vem desenvolvendo trabalhos neste setor para também orientar a conexão destes sistemas nas redes de distribuição do sistema elétrico nacional.

Neste sentido, este trabalho visa analisar a qualidade da energia elétrica das instalações elétricas do Instituto Federal de Minas Gerais, IFMG, campus Formiga, o qual possui uma usina de geração distribuída fotovoltaica. Os objetivos deste trabalho são enumerados a seguir.

1.2 OBJETIVOS

Considerando o contexto descrito, os objetivos principais deste trabalho são:

- realizar o levantamento dos problemas de QEE relacionados à distorção harmônica na rede elétrica do IFMG campus Formiga causados pelo sistema de geração distribuída fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição da concessionária;
- confrontar os resultados obtidos da análise dos dados coletados com o módulo 8 dos PRODIST, relacionado à QEE;
- verificar o enquadramento da QEE das instalações do IFMG campus Formiga conforme esta norma.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em sete capítulos. Neste primeiro capítulo foi abordada a situação atual da demanda por eletricidade no mundo e no Brasil, ressaltando a inserção de fontes renováveis, principalmente a fotovoltaica, na matriz energética mundial. Foram abordados também os objetivos deste trabalho.

O segundo capítulo oferece uma apresentação dos sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica com ênfase nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, contemplando suas características e principais componentes, além das variáveis que impactam a geração de energia elétrica através da radiação solar.

No terceiro capítulo é realizado uma síntese sobre as questões que envolvem a qualidade da energia elétrica, com definições e conceitos dos distúrbios causados na rede elétrica proveniente dos problemas relacionados ao tema deste trabalho, bem como uma breve apresentação de normas e padrões relacionadas com a QEE.

No quarto capítulo se realiza um aprofundamento em recomendações presentes em documentos de órgãos brasileiros a respeito da QEE em sistemas de distribuição, com ênfase nos distúrbios relacionados ao tema deste trabalho.

O quinto capítulo demonstra a metodologia aplicada para o levantamento dos distúrbios provocados pela presença de um SFCR e a análise dos dados aferidos em campo.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos da coleta de informações acerca da QEE presente nas instalações elétricas do IFMG campus Formiga, bem como a discussão destes resultados.

Por fim, o sétimo capítulo apresenta as conclusões do presente trabalho.

CAPÍTULO 2 – SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Não é mais novidade que o modelo energético adotado pelos países no mundo todo, baseado em combustíveis não renováveis e poluentes, está passando por uma crise devido ao risco de escassez de suas reservas e a grande pressão para que as emissões de gases poluentes sejam reduzidas. Neste sentido, a busca por novas fontes energéticas, renováveis, não poluentes e, acima disso, viáveis tem sido a preocupação de pesquisadores em todo o mundo.

O Sol é a fonte de energia mais abundante na Terra [5]. Fonte inesgotável é grande responsável pela manutenção da vida e sua radiação leva uma enorme quantidade de energia que pode ser convertida para outras formas. A energia elétrica fotovoltaica, obtida pela conversão direta da luz solar em eletricidade, é uma fonte não poluente, renovável e muito promissora. As células fotovoltaicas, dispositivos constituídos de materiais semicondutores, é a unidade fundamental para a realização dessa conversão de luz em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico [5].

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839, por Edmond Becquerel, ao perceber que ao iluminar placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas em uma solução ácida, surgia uma diferença de potencial elétrico entre eletrodos imersos nessa solução [6, 5]. Em 1877, W. G. Adams e R. E. Day, dois inventores norte-americanos, perceberam efeito similar em um dispositivo sólido feito de selênio, o qual apresentava uma eficiência de conversão da ordem de 0,5% [6, 5].

A primeira célula fotovoltaica foi produzida nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, em 1953 [6], 110 anos depois da descoberta de Becquerel, as quais apresentaram uma eficiência de 6% [7]. Isso só foi possível graças às descobertas científicas da primeira metade do século XX [6].

Com o começo da crise energética mundial na década de 1970, muitos trabalhos foram desenvolvidos na área de energia fotovoltaica, principalmente no intuito de se aumentar a eficiência de conversão das células, que era próxima de 10% [7] e atualmente se encontra em 26,7% para células de silício cristalino obtida em testes segundo o IEC 60904-3 [8].

Outra grande evolução que tem acontecido desde a produção em escala industrial de módulos fotovoltaicos é a redução do preço do watt pico (Wp). Em 1970, o Wp nos Estados

Unidos custava cerca de US\$ 150,00 [5]. No entanto, já em 2006, o preço do Wp era de US\$ 3,50 ,em 2016, passou para US\$ 0,72 [9].

Os subtítulos a seguir deste capítulo serão destinados a descrever sobre a tecnologia das células fotovoltaicas, sua aplicação na produção de energia elétrica, as topologias dos sistemas de geração fotovoltaica e os impactos desse tipo de geração distribuída nas redes elétricas de distribuição.

2.2 ENERGIA SOLAR

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano, sendo o Sol responsável pelo nascimento de outras fontes de energia na Terra [5].

A energia solar consiste na energia obtida do Sol que chega à superfície terrestre como ondas eletromagnéticas, de maneira direta ou difusa, que vem da fusão atômica que ocorre em seu núcleo. Estima-se que este processo de fusão termonuclear converte cerca de 650 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio por segundo [10].

De acordo com o relatório publicado pelo IPCC sobre Fontes Renováveis de Energia e Mitigação da Mudança Climática, a energia solar direta é dividida em cinco grandes blocos [5]:

- 1) energia solar passiva, onde se insere a arquitetura bioclimática;
- 2) energia solar ativa, onde se inserem o aquecimento e a refrigeração solares;
- 3) energia solar fotovoltaica, destinada à produção de eletricidade;
- 4) energia solar fotovoltaica com concentradores solares térmicos para altas temperaturas;
- 5) processo similar ao da fotossíntese, o qual produz hidrogênio, oxigênio e monóxido de carbono.

Dentre os tipos de energia solar mencionados, será abordado neste trabalho a utilização da energia solar destinada à produção de energia elétrica sem a utilização de concentradores.

A partir das informações passadas, nota-se que, uma grande quantidade de radiação solar atinge a atmosfera terrestre que vem das reações solares que carregam consigo diferentes formas de energia solar. O termo “radiação solar” é usado de forma genérica se referindo em termos de fluxo de potência, por exemplo. Neste caso, o termo específico para o fluxo de potência é denominado de irradiância solar ou, então, de irradiação solar se tratando de fluxo de energia [5].

O valor médio de irradiância solar que atinge a atmosfera terrestre é 1367 W/m^2 , aproximadamente, quantidade conhecida como constante solar [5]. Ao chegar na atmosfera terrestre, parte dessa irradiação é refletida, outra parte é absorvida em forma de calor e o restante atinge a superfície [10]. A radiação solar que atinge a superfície terrestre é formada por uma componente direta, que vem diretamente da direção do Sol e produz sombras nítidas, e por uma componente difusa, que vem de todas as direções e que atinge a superfície terrestre após sofrer espalhamento pela atmosfera [5].

Durante o caminho pela atmosfera terrestre até chegar no solo, as características da radiação solar são afetadas por interações com a atmosfera ocasionando perdas, as quais variam conforme a quantidade de atmosfera que ela percorre. O termo relacionado a esta quantidade de atmosfera é denominado Massa de Ar (AM). Ao penetrar perpendicularmente o plano da superfície externa da atmosfera, a radiação percorrerá a menor distância possível até atingir a Terra. Neste caso, o valor da Massa de Ar é igual a um (AM1,0). A Figura 2.1 ilustra o conceito de Massa de Ar.

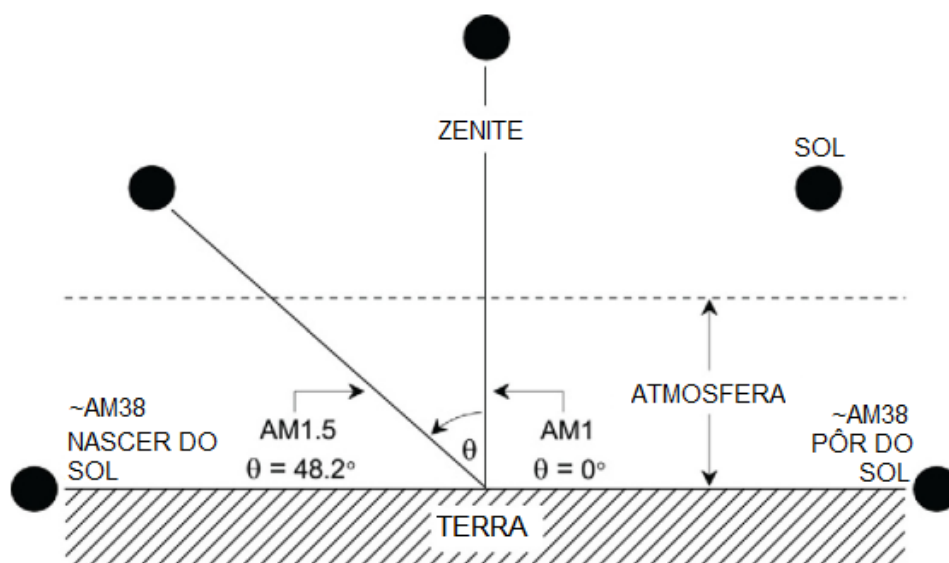


Figura 2.1 - Esquema visual de Massa de Ar.
Fonte: Figura adaptada de [11].

Ao atingir a atmosfera em um ângulo de aproximadamente 48° , a irradiância incidente sofre cerca de 27% de perdas e tem o valor de 1000 W/m^2 , o qual é adotado como padrão. Nesta situação, a Massa de Ar tem espessura igual a 1,5 (AM1,5), o que significa que o percurso percorrido foi equivalente à 1,5 vezes a espessura da atmosfera [5]. Ao atingir uma superfície geradora de eletricidade, essa radiação é convertida em eletricidade, processo realizado pelas células fotovoltaicas.

2.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E O EFEITO FOTOVOLTAICO

O principal componente gerador fotovoltaico de eletricidade são as células fotovoltaicas. É nelas que ocorre a conversão direta da radiação solar em eletricidade de corrente contínua, sem poluição acústica ou química durante o processo, através do efeito fotovoltaico descoberto por Becquerel em 1839. No entanto, foi a partir da descoberta dos semicondutores que as células fotovoltaicas começaram a ser fabricadas industrialmente, sendo que diversas tecnologias de fabricação foram desenvolvidas a partir da segunda metade do século XX [5].

As células fabricadas utilizam lâminas consideravelmente espessa de silício cristalino (mono ou policristalino) e dominam o mercado mundial atualmente, representando mais de 90% deste mercado. Essa tecnologia de fabricação é dita como a primeira geração de células fotovoltaicas e produz módulos fotovoltaicos com eficiência de conversão entre 11% e 18% [12].

A segunda geração é dita por alguns setores da indústria fotovoltaica como sendo a baseada em filmes finos inorgânicos: telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), silício microcristalino ($\mu\text{-Si}$) e silício crescido em fitas (Si-fitas) [5, 12].

A terceira geração de células fotovoltaicas ainda mostra ambiguidade em relação à sua definição pois as tecnologias de fabricação incluem tecnologias ainda em fase de pesquisa, assim como as tecnologias: orgânicas (OPV), ponto quente (PQ), células multijunção (MJ), células de portadores quentes (*hot carriers*), células sensíveis por corantes (DSSC) e tecnologia de *upconversion* [12].

De modo geral, uma explicação para a terceira geração seria que as células devem ser altamente eficientes, permitindo uma utilização mais eficiente da luz solar, possuir baixo

custo e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade [12]. A Figura 2.2 mostra o progresso em eficiências confirmadas de células fotovoltaicas ao longo de 25 anos.

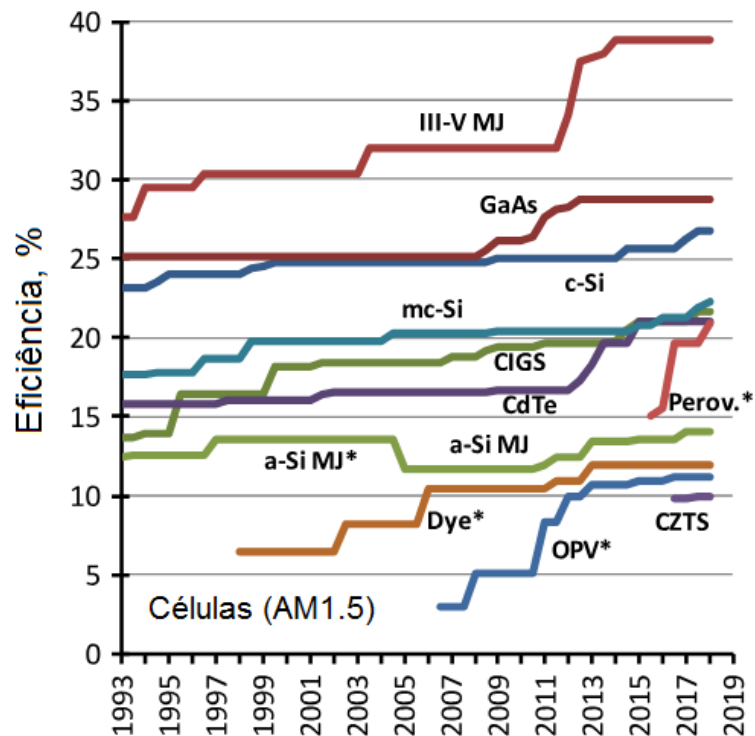


Figura 2.2 - Evolução da eficiência de células fotovoltaicas.
Fonte: Figura adaptada de [8].

2.3.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO

Semicondutores são materiais compostos por elementos que possuem átomos tetravalentes (4 elétrons na camada de valência), ou seja, possuem a banda de valência totalmente preenchida e a banda de condução “vazia” à temperatura de 0K. A separação entre as bandas de valência e de condução, que são bandas de energia, é denominada de banda proibida, ou *gap*, representada por E_g e pode atingir a energia de 3 eV [5].

O efeito fotovoltaico é baseado na absorção de partículas elementares denominadas *fótons* as quais induzem a formação de pares de elétron-lacuna, processo denominado de fotogeração, seguido da separação de cargas com a ajuda da junção p-n [7]. Os elétrons e as lacunas são denominados de portadores de carga, sendo os elétrons cargas negativas e as lacunas cargas positivas. Para a fabricação de células fotovoltaicas, portanto, é explorado o processo de incidência de *fótons*, provenientes da radiação solar, com energia superior à E_g para gerar estes pares elétron-lacunas em materiais semicondutores [5].

A característica inerente neste processo é que para um elétron sair da banda de valência e ir para a banda de condução, formando assim o par elétron-lacuna, deve-se fornecer a ele energia suficiente para que possa vencer a banda proibida. Quando um *fóton* com energia superior ao *gap* atinge o material semiconductor, ocorre, portanto, a formação de um par elétron-lacuna. Este par elétron-lacuna pode se mover dentro do material, aumentando assim sua condutividade, efeito este conhecido como fotocondutivo [5].

A Figura 2.3 ilustra o processo de absorção de *fótons* no material semiconductor, onde $h\nu_i$ representa a energia de um *fóton*, E_V é o nível máximo da banda de valência, E_C é o nível inferior de energia da banda de condução e E_{fe} é o nível de Fermi, que é o nível médio de energia dos portadores de carga.

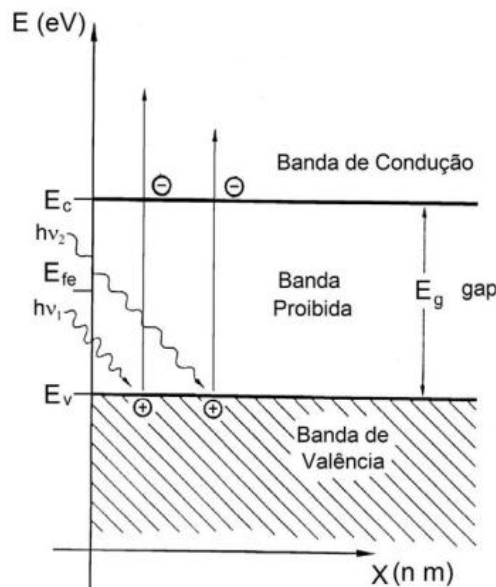


Figura 2.3 - Esquema de absorção de *fótons* pelo material semiconductor.
Fonte: Figura adaptada de [5].

Contudo, para o aproveitamento de corrente e tensão elétricas é necessário formar no material semiconductor uma junção p-n a partir da aplicação de um campo elétrico a fim de se separar os portadores de cargas. A formação da junção p-n é feita a partir de materiais semicondutores extrínsecos que são dopados ou com elementos trivalentes ou quintovaletes.

Assim, os materiais dopados possuem portadores de carga em quantidades diferentes: os materiais dopados com elementos trivalentes são materiais tipo p, por apresentarem lacunas como portadores majoritários, e, por sua vez, materiais dopados com elementos quintovaletes são materiais tipo n, por apresentarem elétrons como portadores majoritários.

Ao dopar uma metade de um semiconductor intrínseco (puro) com dopante tipo p e a outra metade com dopante tipo n, cria-se uma junção p-n. Através dessa junção no escuro (sem tensão externa de polarização), se estabelece uma corrente de portadores que pode ser dividida em duas partes.

Na primeira parte, os portadores de carga se movem das regiões em que são minoritários para regiões em que são majoritários por efeito do campo elétrico formado na junção, estabelecendo uma corrente de deriva (I_D). Na segunda parte, elétrons do material tipo n fluem para o material tipo p, enquanto que lacunas do material tipo p fluem para o material tipo n, combinando-se com as cargas minoritárias e criando-se uma corrente de difusão (I_d).

O equilíbrio da corrente de difusão acontece devido ao nível de Fermi dos dois lados se igualarem e à diferença de potencial que surge na junção devido ao excesso de portadores de cargas nos materiais dopados, impedindo estes portadores de se unirem. Na junção entre os materiais surge uma região chamada zona de depleção na qual gera-se uma barreira de potencial.

A Figura 2.4 ilustra a formação da junção p-n de um material semiconductor extrínseco.

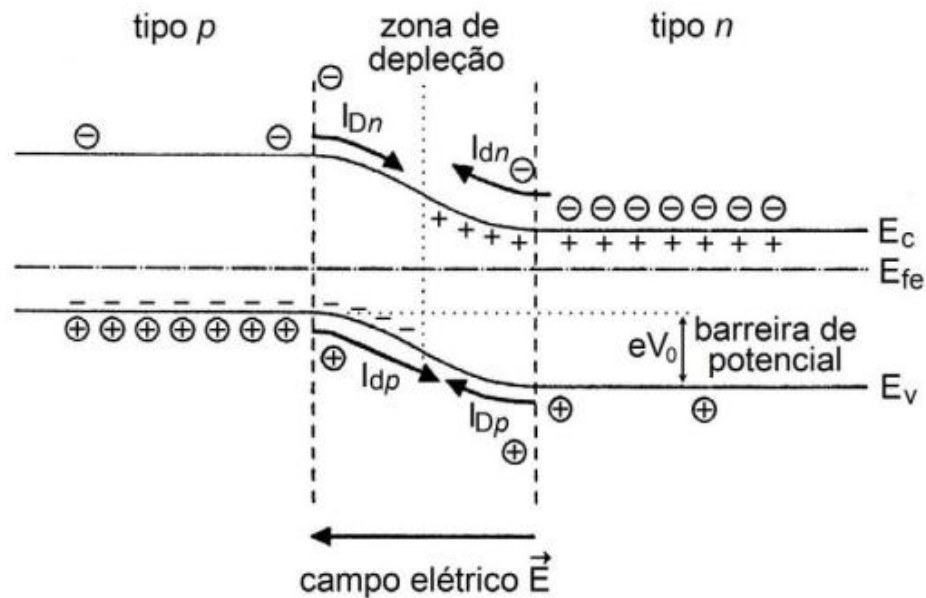


Figura 2.4 - Junção p-n de um material semiconductor extrínseco.
Fonte: Figura extraída de [5].

O efeito fotovoltaico, portanto, é originado na junção p-n criada a partir da separação de portadores de carga em materiais semicondutores extrínsecos e é definido como a

conversão de energia luminosa em energia elétrica associada a uma corrente elétrica e uma diferença de potencial [5].

2.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos, basicamente, por um bloco de geração de eletricidade, um bloco de condicionamento de potência dessa energia gerada e, opcionalmente, um bloco de armazenamento de energia [5], embora que a sua composição pode variar em função da aplicação desejada: eletrificação de regiões remotas, sistemas de microgeração distribuída, usinas solares, bombeamento de água para reservatórios, dispositivos autônomos, entre outras.

O bloco de geração é composto pelos módulos fotovoltaicos, reunião de células fotovoltaicas conectadas eletricamente, organizados em arranjos fotovoltaicos em diversas associações, pelo cabeamento elétrico para interligação dos módulos e pelas estruturas mecânicas de sustentação. O bloco de condicionamento de potência é composto por elementos de interface que realizam a conexão entre as cargas e o gerador fotovoltaico, tais como: conversores c.c.-c.c., seguidores do ponto de potência máxima (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), inversores, controladores de carga e dispositivos de proteção, supervisão e controle. O bloco de armazenamento é constituído por acumuladores de energia, como baterias.

Se tratando da aplicação de sistemas fotovoltaicos para microgeração de eletricidade, existem três tipos de sistemas:

- i. Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI)
- ii. Sistemas Fotovoltaicos Híbridos (SFH)
- iii. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)

Os SFI's são aplicados em locais onde não há presença de rede elétrica de distribuição disponível pelas concessionárias de energia, como em locais remotos, e podem ser individuais ou em minirredes. No primeiro caso, a geração é destinada para o uso exclusivo de uma única unidade consumidora, enquanto que no segundo caso, é destinada a atender um pequeno grupo de unidades consumidoras próximas geograficamente. Estes tipos de sistemas são regulamentados pela REN N° 493/2012 da ANEEL [13].

Como regra geral, estes sistemas isolados devem possuir um acumulador de energia, que é comumente feito por bancos de baterias, além do gerador fotovoltaico. No entanto, para se obter uma boa adaptação entre as características do banco de baterias e o gerador fotovoltaico, é necessário a instalação de um controlador de carga no circuito entre gerador e acumulador. Assim, é possível aumentar o rendimento do conjunto e prolongar a vida útil do acumulador por se evitar cargas e descargas excessivas. A Figura 2.5 ilustra uma configuração básica de um SFI, no qual o acumulador de energia é composto por um banco de baterias.

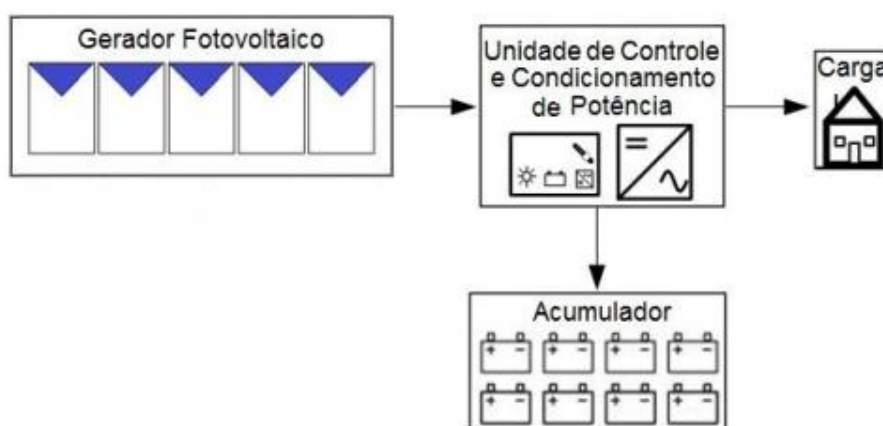


Figura 2.5 - Configuração de um SFI.
Fonte: Figura extraída de [5].

Os SFH's são aqueles em que, além do gerador fotovoltaico presente no sistema, existe outra fonte de geração de energia, como por exemplo grupos geradores de energia e aerogeradores. Por serem sistemas mais complexos, eles necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores e otimizar suas operações. A Figura 2.6 ilustra uma possível configuração de um SFH.

Os SFCR's são sistemas em que o gerador fotovoltaico está conectado à rede elétrica da concessionária, no qual o excedente de potência elétrica gerada por ele é injetado na rede elétrica, dispensando assim a utilização de acumuladores de energia. A Figura 2.7 ilustra a configuração básica dos SFCR's. Mais detalhes desse tipo de sistema será apresentado no subtítulo a seguir.

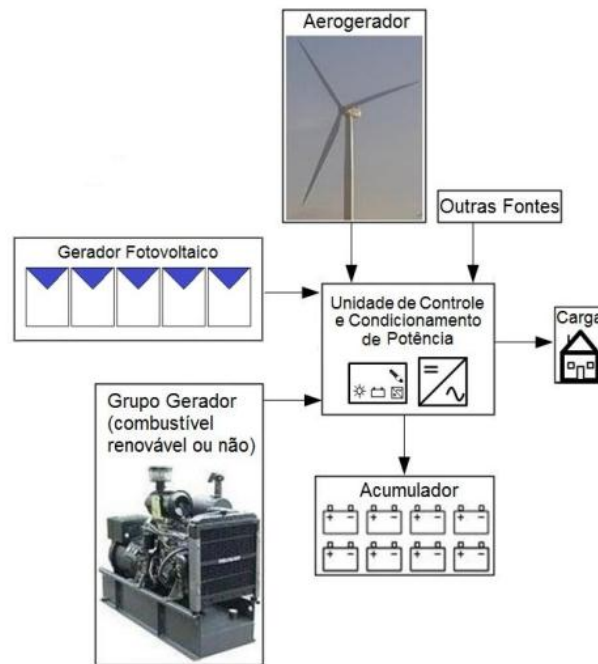


Figura 2.6 - Exemplo de configuração de um SFH.
 Fonte: Figura extraída de [5].

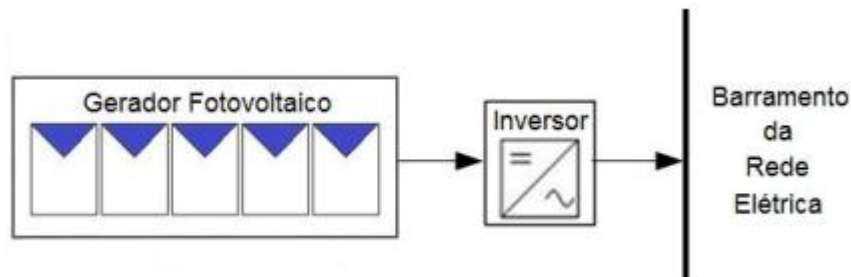


Figura 2.7 - Configuração de um SFCR.
 Fonte: Figura extraída de [5].

2.4.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE (SFCR'S)

Instalações de SFCR's como geração distribuída vêm se tornando cada vez mais populares no mundo, mais recentemente no Brasil. Atualmente, existem 28726 usinas de geração fotovoltaica distribuída no Brasil, totalizando uma potência instalada de 262,549 MW [14]. No entanto, isso equivale a apenas 0,035% do número de unidades consumidoras do país.

Esse cenário mostra que a energia fotovoltaica como geração distribuída é muito promissora no país. No entanto, a alta carga tributária federal sobre os principais componentes e equipamentos de um sistema fotovoltaico, tornando seu valor de aquisição alto, aliado à

falta de acesso a créditos e financiamentos específicos para esses empreendimentos dificultam a disseminação de sua implantação em escala.

Assim como já mencionado, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica são compostos basicamente pelo gerador fotovoltaico, constituídos por arranjos de módulos, e pelo conversor eletrônico responsável pelo comissionamento da energia gerada aos padrões da energia da rede elétrica. Como conversor eletrônico, são utilizados inversores que realizam a conversão da energia elétrica em corrente contínua para energia elétrica em corrente alternada. Os detalhes pertinentes a estes componentes de um SFCR são apresentados a seguir.

2.4.1.1 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A célula fotovoltaica é a principal estrutura de um sistema fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos, por sua vez, reúnem as células fotovoltaicas, ligadas em série que, a partir dessa ligação entre elas, fornecem a tensão global do módulo, visto que cada célula individualmente fornece tensão muito baixa (entre 0,5 e 0,8 para c-Si). Além disso, o arranjo das células em módulos fotovoltaicos lhes oferece proteção mecânica contra intempéries, visto sua fragilidade [5]. A quantidade de células presentes em um módulo varia em função da aplicação. Para SFCR's, os módulos são compostos, tipicamente, por 60 ou 72 células.

O encapsulamento das células fotovoltaicas é constituído de vidro temperado de alta transparência, uma camada de EVA estabilizado para a radiação ultravioleta, as células fotovoltaicas, EVA estabilizado e um filme posterior isolante, como ilustra a Figura 2.8. O processo de laminação é feito a temperaturas entre 120° e 150° C para que o EVA se torne líquido e as bolhas de ar sejam eliminadas. Ao final desse processo, coloca-o em moldura de alumínio anodizado e finaliza com a caixa de conexões elétricas [5].

Além das características construtivas, as características elétricas são as especificações mais importantes ao se dimensionar o gerador de um sistema fotovoltaico. Geralmente, um módulo é identificado por sua potência elétrica de pico, dada em Wp, mas uma série de outros parâmetros deve ser observado. Estes parâmetros são especificados a partir de testes realizados em condições padrão de ensaio (STC – *Standard Test Conditions*), considerando irradiância de incidência com o valor de 1000 W/m², sob uma distribuição espectral padrão para AM 1,5 e temperatura da célula fotovoltaica de 25° C [5].

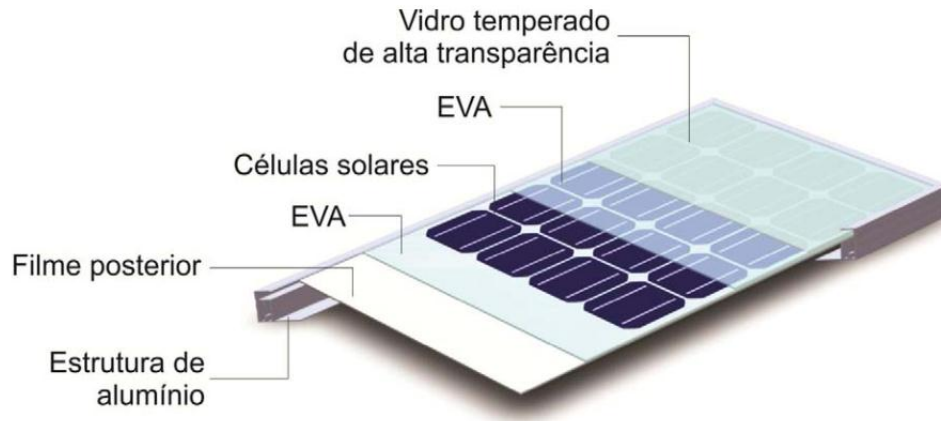


Figura 2.8 - Componentes de um módulo fotovoltaico.
 Fonte: Figura extraída de [5].

Os parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico são mostrados na Tabela 2.1, onde P_{MP} é o ponto de máxima potência, V_{OC} é a tensão de circuito aberto, V_{MP} é a tensão no ponto de máxima potência, I_{SC} é a corrente de curto-circuito, I_{MP} é a corrente no ponto de máxima potência e η é a eficiência do módulo.

Tabela 2.1 - Parâmetros elétricos de um módulo, modelo CS6K-280P, da Canadian Solar.
 Fonte: [15]

Parâmetro	Valor Nominal
P_{MP}	280 [Wp]
V_{MP}	31.3 [V]
I_{MP}	8.95 [A]
V_{OC}	38.2 [V]
I_{SC}	9.52 [A]
η	17.11 [%]

Um dos ensaios mais completos para se determinar os parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaicos é o traçado de sua curva característica I-V e da curva de potência P-V. Através de testes sob as condições padrão de ensaio (STC), se realiza uma varredura da tensão sobre o módulo e registram-se pares de dados de tensão e corrente, traçando-se assim a curva I-V do módulo. Para cada ponto da curva I-V, o produto corrente-tensão representa a potência gerada pelo módulo. Dessa forma, é possível traçar a curva de potência P-V, onde se encontra o ponto de máxima potência do módulo. A Figura 2.9 ilustra a curva característica I-V e a curva de potência P-V.

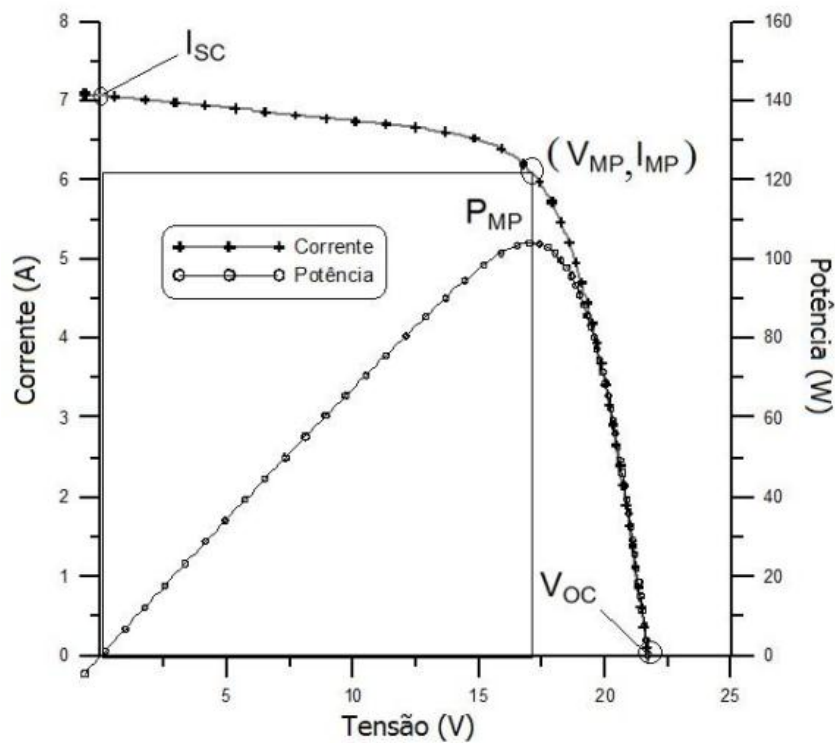


Figura 2.9 - Curvas I-V e P-V para um módulo de potência nominal de 100 Wp.
Fonte: Figura extraída de [5].

Os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos são impactados pelas condições ambientais do local onde estão localizados, principalmente pela temperatura de operação e pela irradiância solar incidente. Dessa forma, para condições de operações dos módulos fora da STC, os valores dos parâmetros especificados pelos fabricantes dos módulos irão alterar, conforme for a variação das condições de operação. Por isso, alguns coeficientes relacionados à temperatura de operação dos módulos são especificados pelos fabricantes, os quais permitem quantificar os parâmetros elétricos dos módulos em função de sua temperatura ambiente de operação.

A Tabela 2.2 dispõe os coeficientes relacionados à temperatura de operação de um módulo comercial, em relação à STC, onde cada um deles impacta um parâmetro do módulo.

Tabela 2.2 - Coeficientes de temperatura de um módulo, modelo CS6K-280P, da Canadian Solar.
Fonte: [32].

Especificação	Valor
Coeficiente de temperatura para P_{max}	-0.40 % / °C
Coeficiente de temperatura para	-0.31 % / °C
Coeficiente de temperatura para	0.05 % / °C

A Figura 2.10 ilustra os impactos causados pela variação da irradiância solar incidente e da temperatura sob a curva I-V e a Figura 2.11 ilustra os impactos causados pela variação da irradiância solar incidente sob as curvas I-V e P-V, ambas de um módulo comercial.

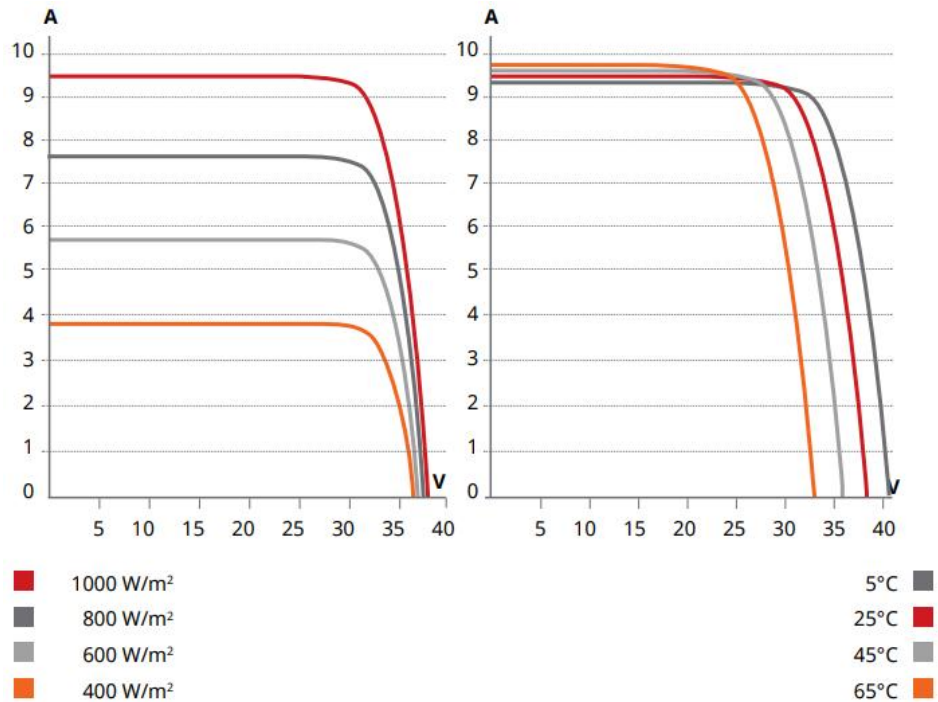


Figura 2.10 - Influência da variação de temperatura e irradiância solar sobre a curva I-V.
Fonte: Figura extraída de [15].

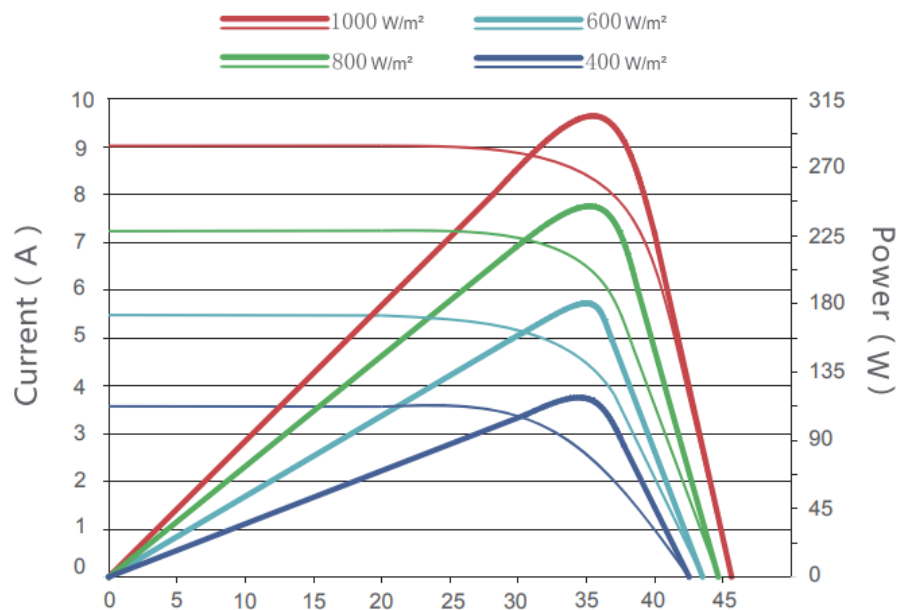


Figura 2.11 - Influência da variação de irradiância solar sobre as curvas I-V e P-V.
Fonte: Figura extraída de [16].

2.4.1.2 INVERSORES

A tensão gerada pelos módulos fotovoltaicos que compõe o gerador fotovoltaico de um SFCR deve ser condicionada antes de o sistema ser conectado à rede elétrica da concessionária. Essa tarefa é realizada pelos inversores, que funcionam como uma interface de conexão entre o sistema geração fotovoltaico e a rede elétrica. Portanto, os inversores realizam o comissionamento da tensão gerada em corrente contínua pelos módulos de modo a obter uma tensão alternada compatível em magnitude, ângulo e frequência com a tensão da rede elétrica de distribuição [17].

Os inversores para SFCR's compartilham dos mesmos princípios de funcionamento que os inversores para SFI's, mas com características específicas para atender as exigências das concessionárias de distribuição em termos de segurança e qualidade da energia injetada na rede. Como exemplo, os inversores para SFCR's devem ter tensão c.a. de saída com amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequada à rede elétrica, além de possuir algoritmos para sincronizar a tensão de saída com a tensão da rede [5].

Os inversores empregados em sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em dois grandes grupos: os comutados pela rede, os quais apresentam comutação natural, e os autocomutáveis, apresentando comutação forçada. Os inversores comutados pela rede utilizam tiristores (SCR, TRIAC), em que o processo de troca do estado de condução para o estado de corte é controlado pela fase e frequência da tensão da rede. Já os inversores autocomutáveis possuem como elementos de chaveamento IGBT's e MOSFET's, os quais podem ser postos em condução ou em corte em qualquer instante do ciclo por meio de circuitos de controle [5, 17].

Além disso, há a possibilidade de os inversores terem um ou dois estágios. Inversores com um estágio não possuem transformadores de acoplamento nem na entrada c.c., nem na saída c.a., apresentando mais robustez e alta eficiência. No entanto, não apresentam isolamento galvânica e necessita de um valor mínimo de tensão de entrada relativamente alto [5, 17].

Já os inversores com dois estágios apresentam isolamento galvânica, mas sua eficiência é reduzida e seu preço é maior. Estes inversores possuem um conversor c.c.-c.c. interno onde ocorre o aumento da tensão de entrada por meio do transformador, fornecendo uma tensão adequada ao conversor c.c.-c.a. Além disso, é no conversor c.c.-c.c. interno dos inversores que está o sistema de seguidor do ponto de potência máxima (MPPT) [5, 17].

Devido à elevada frequência de chaveamento para a formação dos pulsos PWM nos inversores, grandes impactos podem ser causados pela comutação interna dos componentes eletrônicos dos inversores conectados à rede elétrica. Neste sentido, existem várias normas técnicas voltadas para a conexão de geradores distribuídos no sistema de distribuição de energia elétrica, como é o caso da norma IEEE 1547, que apresenta seções com recomendações voltadas tanto para a conexão em tensão primária, quanto em tensão secundária da rede de distribuição [18], e a IEC 61727, que tem o objetivo de padronizar a interligação de geradores fotovoltaicos em paralelo com o sistema de distribuição [19].

No Brasil, a ANEEL, por meio de suas recomendações presentes nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), em seu módulo número três - Acesso ao Sistema de Distribuição e pela Resolução Normativa N° 482/2012, regulariza o acesso de geradores distribuídos ao sistema de distribuição e elenca diversos requisitos a serem atendidos, e em seu módulo oito – Qualidade da Energia Elétrica, que referencia padrões de qualidade da energia elétrica a serem atendidos pelas gerações distribuídas conectadas a rede elétrica, o qual ainda será detalhado neste trabalho [20, 38]. Além disso, os inversores comercializados no Brasil devem possuir registro do Inmetro e a respectiva etiqueta afixada no produto.

De fato, os impactos causados pela má qualidade da energia elétrica dos sistemas de distribuição geram grandes prejuízos às concessionárias e aos consumidores, principalmente prejuízos financeiros. Portanto, o monitoramento da qualidade da energia injetada pelos sistemas fotovoltaicos na rede elétrica deve ser uma prática recorrente a fim de se identificar previamente causas de possíveis distúrbios provocados na rede elétrica. O capítulo seguinte discutirá sobre definições sobre a qualidade da energia elétrica.

CAPÍTULO 3 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

3.1 INTRODUÇÃO

Idealmente, os sistemas de distribuição de energia elétrica devem fornecer a seus clientes um fluxo contínuo de energia elétrica a uma tensão senoidal no nível de magnitude e frequência contratado. No entanto, na prática, os sistemas de energia têm diferentes tipos de cargas que afetam significativamente a qualidade da energia fornecida pelas fontes de geração e, conseqüentemente, a pureza da forma de onda fornecida por elas é perdida [21].

Além dos vários tipos de carga, alguns eventos do sistema, tanto usuais (comutação de capacitores, partida de motores, etc.), quanto incomuns (falhas de equipamentos da rede) também podem causar problemas de qualidade de energia elétrica [21].

O termo qualidade de energia elétrica é um dos tópicos mais discutidos e preocupantes no setor elétrico, o qual vem sendo causa de estudos há várias décadas, desde o final dos anos de 1980, e que abrange vários de tipos de distúrbios individuais dos sistemas elétricos já conhecidos por engenheiros, muito antes do termo se popularizar [22]. O que mudou foi o modo com que estes problemas passaram a ser tratados: de forma conjunta, utilizando uma abordagem de sistema, e não mais de forma individual.

Segundo [22], existem quatro razões principais para o aumento da preocupação com a qualidade da energia elétrica:

- 1) a utilização de equipamentos com controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos de potência, que são mais sensíveis às variações de qualidade de energia do que os equipamentos utilizados no passado;
- 2) a crescente ênfase na eficiência geral do sistema de potência provocada pelo crescimento contínuo na aplicação de dispositivos que resultam no aumento dos níveis de harmônicos injetados nos sistemas de energia;
- 3) a maior conscientização, por parte dos usuários finais, sobre problemas de qualidade de energia, os quais têm se tornando mais bem informados e estão desafiando as concessionárias a melhorar a qualidade da energia fornecida;

4) a crescente utilização de equipamentos interconectados em redes de processos integrados, significando que a falha de qualquer componente tem consequências muito mais importantes, pois afeta o sistema em geral.

As áreas mais sensíveis à qualidade da energia elétrica são as indústrias de processos contínuos e os serviços de tecnologia da informação [21]. Os efeitos da má qualidade da energia elétrica fornecida pelas concessionárias podem custar muito caro para seus clientes e causar danos aos equipamentos. Portanto, as concessionárias de energia elétrica e os usuários finais de suas redes estão, a cada dia, mais preocupados com a qualidade da energia elétrica devido ao interesse financeiro.

Os avanços tecnológicos ocorridos a partir do meio do século XX caminharam juntamente com a evolução da organização da economia mundial para a globalização e o consequente aumento de competitividade nos mercados a nível mundial, levando empresas a terem margens de lucros cada vez menores. O aumento da sensibilidade da grande maioria dos processos a problemas de qualidade de energia elétrica tornou a disponibilidade de energia elétrica com qualidade um fator crucial para a competitividade em todos os setores de atividade [21].

O conceito de qualidade de energia elétrica pode ser definido como o grau de qualquer desvio dos valores nominais da magnitude e frequência da tensão, ou, ainda, como o grau em que tanto a utilização, quanto a entrega de energia elétrica, afeta o desempenho de equipamentos elétricos [23]. Do ponto de vista do cliente, um problema de qualidade de energia elétrica é definido como qualquer problema de energia manifestado em desvios de tensão, corrente ou frequência que resultam em faltas de energia ou falha na operação de seus equipamentos [22, 24].

Embora se trate como qualidade da energia elétrica disponível para os consumidores, os sistemas de energia elétrica que operam em corrente alternada são projetados para operar a uma tensão senoidal de determinada magnitude e frequência (tipicamente 50 ou 60 hertz [Hz]) e só podem controlar a qualidade da tensão. Não há controle sobre as correntes que cargas específicas podem drenar da fonte. Portanto, os padrões na área de qualidade de energia são dedicados a manter a tensão de alimentação dentro de certos limites [22].

Alguns acontecimentos nas redes de distribuição dos sistemas de energia elétrica são vistos como perturbações pelas cargas elétricas conectadas a elas por alterarem a forma padrão da tensão de alimentação e ou sua disponibilidade, os quais podem se propagar para

demais locais do sistema. No próximo subitem, serão expostos os principais distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica.

3.2 DISTÚRBIOS NA REDE ELÉTRICA

Grande parte dos problemas que surgem nos sistemas elétricos são originados pela excessiva distorção da tensão e da corrente elétrica que suprem a demanda dos consumidores finais [6]. Como já foi mencionado anteriormente, o aumento da utilização de equipamentos baseados em microprocessadores de alta tecnologia e em eletrônica de potência em aplicações industriais, como equipamentos de tecnologia da informação, acionadores de velocidade ajustável (ASD), controladores lógicos programáveis (PLC), levou a uma mudança completa na natureza das cargas elétricas.

A partir da evolução dos dispositivos eletrônicos, tanto de baixa potência quanto de alta potência, graças ao aumento de tecnologia empregada no desenvolvimento dos semicondutores, a energia demanda pelos consumidores não é mais a mesma de quando se predominava as cargas resistivas. A presença de fontes de alimentação com circuitos retificadores à suas entradas e circuitos conversores comutados por chaves eletrônicas atribui às cargas conectadas à rede uma característica intrínseca de não linearidade, ou seja, elas não demandam corrente elétrica constantemente, mas apenas picos de energia em determinados instantes.

Dependendo da topologia do conversor eletrônico empregado, picos da corrente de entrada são demandados apenas em determinado período ou ângulo da onda senoidal. Com isto, as cargas eletrônicas acabam por distorcer a forma de onda da tensão e da corrente e geram uma "poluição" na rede elétrica de distribuição. A Figura 3.1 exemplifica essa distorção da forma de onda da corrente da rede devido tipicamente à presença de ASD de motores.

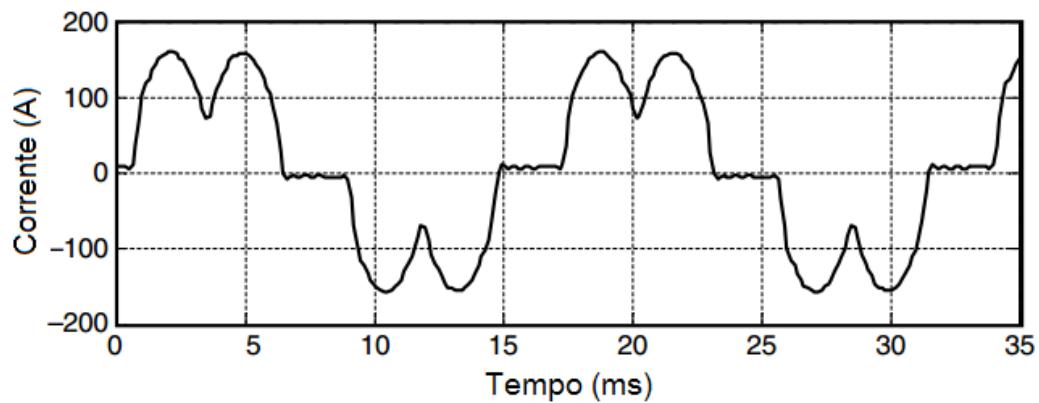


Figura 3.1 - Forma de onda distorcida.
Fonte: Figura adaptada de [22].

A poluição presente na rede elétrica provoca o mau funcionamento de dispositivos e equipamentos sensíveis a variações de energia, como os circuitos eletrônicos de controle empregados na indústria. Portanto, essas cargas comandadas eletronicamente são simultaneamente as principais causadoras e as principais vítimas de problemas de qualidade de energia [26, 27]. Esta poluição é traduzida por diversos tipos de problemas ou distúrbios na rede elétrica, os quais serão descritos neste capítulo e que devem ser analisados sempre de forma sistemática, não isolados.

A crescente busca por termos e explicações que pudessem descrever os fenômenos que provocavam o mau funcionamento de equipamentos de consumidores exigiu a padronização de termos de forma consistente para se evitar confusões entre os tipos de distúrbios presentes na rede elétrica. A partir da correta identificação das causas da má qualidade da energia da rede é que se pode adotar medidas a fim de restaurar a energia aos padrões de referência.

Os distúrbios são originados de fenômenos eletromagnéticos ocorridos na rede elétrica e podem ser categorizados para descrever claramente qual perturbação eletromagnética é a causa do problema de qualidade de energia [22]. A Tabela 3.1 fornece informações relativas aos tipos mais comuns de problemas de qualidade de energia elétrica.

Tabela 3.1 - Distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica.
Fonte: [23].

<p>Queda de tensão (Sags)</p>	<p>Descrição: Diminuição do nível de tensão normal entre 10 e 90% da tensão rms nominal na frequência de potência, com durações de 0,5 ciclo a 1 minuto.</p> <p>Causas: Falhas na rede de transmissão ou distribuição (na maioria das vezes em alimentadores paralelos). Falhas na instalação do consumidor. Conexão de cargas pesadas e</p>
-----------------------------------	--

	<p>partida de motores de grande porte.</p> <p>Consequências: Mau funcionamento do equipamento de tecnologia da informação, sistemas de controle baseados em microprocessador (PLC's, ASD's, etc.) que podem levar a uma paralisação do processo. <i>Trip</i> de contatores e relés eletromecânicos. Desconexão e perda de eficiência em máquinas elétricas rotativas.</p>
Aumento de tensão (<i>Swell</i>)	<p>Descrição: Aumento momentâneo da tensão ou da frequência, potência fora das tolerâncias normais, com duração entre mais de um ciclo e, normalmente, menos de alguns segundos.</p> <p>Causas: Partida / parada de cargas pesadas, fontes de energia mal dimensionadas, transformadores mal regulados (principalmente fora do horário de pico).</p> <p>Consequências: Perda de dados, cintilação de iluminação e telas, paralisação ou danos de equipamentos sensíveis, se os valores de tensão forem muito altos.</p>
Pico de tensão	<p>Descrição: Variação muito rápida do valor de tensão para durações de vários microssegundos a alguns milissegundos. Essas variações podem atingir milhares de volts, mesmo em baixa tensão.</p> <p>Causas: relâmpago, chaveamento de linhas ou capacitores de correção do fator de potência, desconexão de cargas pesadas.</p> <p>Consequências: Destruição de componentes (particularmente componentes eletrônicos) e de materiais de isolamento, erros de processamento de dados ou perda de dados, interferência eletromagnética.</p>
Flutuação de tensão	<p>Descrição: Oscilação do valor da tensão, amplitude modulada por um sinal com frequência de 0 a 30 Hz.</p> <p>Causas: fornos de arco, partida / parada frequente de motores elétricos (por exemplo, elevadores), cargas oscilantes.</p> <p>Consequências: Na maioria das consequências é comum as subtensões. A consequência mais perceptível é a oscilação da iluminação e de telas, dando a impressão de instabilidade da percepção visual.</p>
Desequilíbrio de tensão	<p>Descrição: Uma variação de tensão em um sistema trifásico no qual as três magnitudes de tensão ou as diferenças de ângulo de fase entre elas não são iguais.</p> <p>Causas: Grandes cargas monofásicas (fornos de indução, cargas de tração), distribuição incorreta de todas as cargas monofásicas pelas três fases do sistema (isso também pode ser devido a uma falha).</p> <p>Consequências: Sistemas desequilibrados implicam a existência de uma corrente de sequência negativa, que é prejudicial a todas as cargas trifásicas. As cargas mais afetadas são as máquinas de indução trifásicas.</p>
Interrupções de muito curta duração	<p>Descrição: Interrupção total da alimentação elétrica por um período de alguns milissegundos a um ou dois segundos.</p> <p>Causas: Principalmente devido à abertura e religamento automático dos dispositivos de proteção para descomissionar uma seção defeituosa da rede. As principais causas de falha são a falha de isolamento, o relâmpago e o <i>flashover</i> do isolador.</p>

	<p>Consequências: Disparo de dispositivos de proteção, perda de informações e mau funcionamento do equipamento de processamento de dados. Parada de equipamentos sensíveis, como ASD's, e PLC's, se estes não estiverem protegidos contra essa situação.</p>
Interrupções de longa duração	<p>Descrição: Interrupção total da alimentação elétrica por duração maior que 1 a 2 segundos.</p> <p>Causas: Falha do equipamento na rede do sistema de energia, tempestades e objetos (árvores, carros, etc.), golpes de linhas ou postes, incêndio, erro humano, má coordenação ou falha dos dispositivos de proteção.</p> <p>Consequências: Parada de todos os equipamentos.</p>
Ruído	<p>Descrição: Sobreposição de sinais de alta frequência na forma de onda da frequência do sistema de potência.</p> <p>Causas: Interferências eletromagnéticas provocadas por ondas de equipamentos como micro-ondas, difusão de televisão e radiação devido a máquinas de solda, fornos a arco e equipamentos eletrônicos. Aterramento inadequado também pode ser uma causa.</p> <p>Consequências: Distúrbios em equipamentos eletrônicos sensíveis, geralmente não destrutivos. Pode causar erros de processamento de dados e perda de dados.</p>
Distorção harmônica	<p>Descrição: As formas de onda de tensão ou corrente assumem uma forma não senoidal. A forma de onda corresponde à soma de diferentes ondas senoidais com diferentes magnitude e fase, com frequências múltiplas da frequência do sistema de potência.</p> <p>Causas: Fontes clássicas: fornos a arco, máquinas de solda, retificadores e motores de escova CC. Fontes modernas: Todas as cargas não lineares, como equipamentos eletrônicos de potência, incluindo ASD's, fontes de alimentação comutadas, equipamentos de processamento de dados, iluminação de alta eficiência.</p> <p>Consequências: Maior probabilidade de ocorrência de ressonância, sobrecarga do neutro em sistemas trifásicos, superaquecimento de todos os cabos e equipamentos, perda de eficiência em máquinas elétricas, interferência eletromagnética em sistemas de comunicação, erros em medidas ao usar medidores médios de leitura, <i>trip</i> incômodo de proteções térmicas.</p>

Como mencionado no capítulo 2, os distúrbios na rede elétrica relacionados à presença de geração distribuída na rede, tendo módulos fotovoltaicos como geradores, estão relacionados à presença de inversores como interface de conexão entre o gerador e a rede elétrica de baixa tensão da concessionária. Além disso, devido à sua característica intermitente de geração provocada pelas variações bruscas de irradiação solar incidente nos módulos fotovoltaicos, problemas do ponto de vista da qualidade da energia elétrica podem ser significativos aos sistemas de distribuição, visto sua sensibilidade a flutuações de tensão [28].

Neste sentido, os parâmetros e seus respectivos valores de referências utilizados neste trabalho para identificar e quantificar possíveis problemas na qualidade da energia elétrica foram: tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica e fator de potência. Estes problemas serão descritos mais a fundo nos tópicos a seguir.

3.3 PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

3.3.1 HARMÔNICOS

O problema de distorção da forma de onda é definido como um desvio de estado estacionário de uma onda senoidal pura na frequência da rede elétrica, caracterizada principalmente pelo conteúdo espectral de desvio [22].

Os harmônicos, um dos principais tipos de deformação da forma de onda, são tensões e ou correntes senoidais que possuem frequência múltipla da frequência fundamental, definida como a frequência de operação projetada para o sistema elétrico (60 Hz, no caso do sistema elétrico brasileiro) [22].

A definição de harmônicos é baseada na aplicação da Transformada de Fourier e na superposição formas de onda de tensões e corrente [29], ou seja, qualquer forma de onda periódica pode ser representada pela soma de senóides através da Transformada de Fourier, conforme ilustrado pela Figura 3.2 em que a senóide fundamental é representada pelo múltiplo 1 da frequência fundamental ($h = 1$) e seus harmônicos, pelos múltiplos inteiros maiores que 1 da frequência fundamental ($h = 3, 5, 7, 9, \dots$).

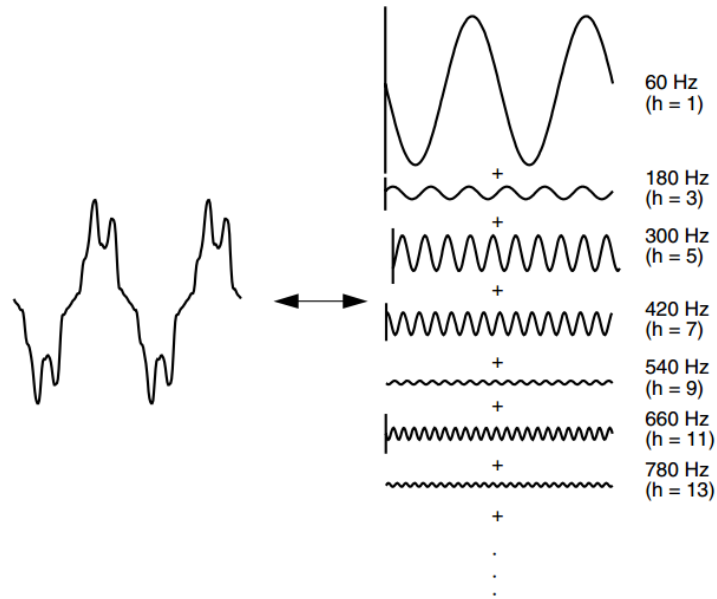


Figura 3.2 - Forma de onda distorcida e suas componentes harmônicas.
Fonte: Figura extraída de [22].

Geralmente, o que provoca a injeção de harmônicos na rede elétrica é a presença de elementos não lineares conectados à rede, como lâmpadas fluorescentes de alta eficiência, cargas eletrônicas que apresentam chaveamento em conversores e motores e transformadores cujos núcleos ferromagnéticos estão sujeitos a saturação [29, 30]. Estes dispositivos acabam injetando harmônicos na corrente da rede elétrica que resultam em distorções na forma de onda da tensão.

Os níveis de distorção harmônica são descritos pelo espectro harmônico completo com magnitudes e ângulos de fase de cada componente harmônico individual. Também é comum usar uma única quantidade, a distorção harmônica total (THD), como uma medida do valor efetivo da distorção harmônica [22]. Ele pode ser calculado tanto pela corrente, quanto pela tensão, e é definido por:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (3.1)$$

onde M_h é o valor rms do componente harmônico h da grandeza M , que pode ser tanto a tensão, quanto a corrente. A THD é relacionada com o valor rms da forma de onda pela Equação (3.2) seguinte:

$$RMS = \sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \quad (3.2)$$

3.3.2 FATOR DE POTÊNCIA

Em sistemas elétricos de corrente alternada, existe três quantidades relacionadas à potência: a potência ativa (P), potência reativa (Q) e a potência aparente (S). Estas potências são aplicadas a circuitos de corrente alternada em regime permanente nos quais as tensões e correntes podem, ou não, ser puramente senoidais.

A potência ativa é expressa em watts [W] e é representada como a potência útil gasta por cargas elétricas para realizar trabalho, ou seja, para converter energia elétrica em outras formas de energia. Já a potência reativa é expressa em volt-ampère-reactivo [VAr] e não realiza nenhum trabalho útil, estando associada a elementos reativos, como indutores e capacitores. A soma da parcela de potência útil convertida em trabalho com a parcela que não realiza trabalho é a potência aparente e é expressa em volt-ampère [VA]. A taxa de potência ativa pela potência aparente fornecida à uma carga é denominada como fator de potência, definido por:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \theta \quad (3.3)$$

em que o ângulo é o ângulo de fase da corrente em relação ao ângulo de fase da tensão [22].

Em outras palavras, o fator de potência mede a quantidade percentual de energia gasta para o uso pretendido e ele pode variar de 0 até a unidade. Quanto mais próximo o valor da potência ativa for da potência aparente, maior o fator de potência da carga. Para cargas puramente resistivas, toda a energia demanda por elas é convertida em trabalho e a potência ativa é igual à potência aparente, ou seja, seu fator de potência é unitário.

Como os componentes harmônicos influenciam na quantidade de potência fornecida à uma carga elétrica conectada à rede, a Equação (3.3) representa o fator de potência de deslocamento, o qual considera apenas a componente na frequência fundamental da tensão e

da corrente. Para tensão e corrente rms composta pela componente fundamental e seus harmônicos, tem-se o fator de potência verdadeiro, definido por:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3.4)$$

em que são considerados toda a contribuição dos componentes do espectro harmônico da tensão e da corrente [22].

O fator de potência pode ainda ser definido em função da THD [22]:

$$FP = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (3.5)$$

3.3.3 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Um sistema trifásico equilibrado é aquele que apresenta tensões de fase com a mesma magnitude de referência e com defasagem angulares de 120° entre elas. Qualquer sistema, portanto, que apresente características diferentes estão desequilibrados.

Desequilíbrio de tensão é definido como o desvio máximo em relação à média das tensões de fase de um sistema trifásico, dividido pela média das tensões de fase do sistema trifásico e expresso em porcentagem [22, 31], definido por:

$$\%DT = \frac{\text{máx. desvio tensões de fase} - \text{tensão de fase média}}{\text{tensão de fase média}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

Outra maneira de se definir sistemas trifásicos desequilibrados é por meio das componentes simétricas, em que a taxa da componente de sequência negativa (-) pela componente de sequência positiva (+) especifica o desequilíbrio percentual entre as tensões de fase do sistema [22, 31], conforme a equação 3.7 para o fator de desequilíbrio (FD):

$$\%FD = \frac{\text{componente de seq. } (-), \text{ tensão de fase}}{\text{componente de seq. } (+), \text{ tensão de fase}} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

As causas do desequilíbrio de tensão incluem cargas trifásicas com impedâncias desequilibradas conectadas à rede, distribuição desigual de cargas monofásicas e bifásicas entre as fases da rede e fusíveis queimados em uma fase de banco de capacitores trifásicos [22, 30]. Com a crescente difusão de geração distribuída com inclusão de geradores fotovoltaicos conectados à rede elétrica por meio de inversores tem-se aumentado os desequilíbrios do sistema de distribuição devido as características intermitentes de geração destes sistemas [32].

Sistemas trifásicos desequilibrados podem impactar diferentes tipos de cargas conectadas a eles. Por exemplo, componentes de sequência positiva produzem em motores torque útil, enquanto que componentes de sequência negativa produzem torque de frenagem. Componentes de sequência zero, por sua vez, provocam interferência entre linhas de transmissão de energia elétrica e de telecomunicações [33].

3.4 PROCEDIMENTOS E PADRÕES

Para manter a qualidade da energia elétrica em níveis aceitáveis sem prejuízos tanto para os sistemas elétricos, quanto para os consumidores finais que utilizam essa energia, órgãos internacionais há anos têm desenvolvido procedimentos para manter os padrões de qualidade de energia sempre atualizados e coordenados entre eles, como é o caso dos padrões do *Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE* e *International Electrotechnical Commission – IEC*.

O principal conjunto de padrões internacionais a respeito de qualidade de energia elétrica é encontrado nos documentos do IEC sobre Compatibilidade Eletromagnética: IEC 61000, o qual consiste de seis partes, cada uma sendo dividida em uma ou mais seções [34], e o IEC SC 77A, sobre EMC para fenômenos de baixa frequência, divididos em cinco partes [35]. Além dos padrões do IEC, outro muito perceptível é o documento acerca de características de tensão publicado pela Cenelec, o padrão europeu EN 50160 [34].

O IEEE publicou, e ainda publica, um número vasto de documentos de padronização sobre qualidade de energia, como o padrão sobre harmônicos IEEE 519/1992, um dos mais importantes e utilizados sobre o tema, e o padrão IEEE 1159/1995 sobre práticas

recomendadas para monitoramento da qualidade de energia, entre tantos outros documentos [34].

Todos estes documentos servem como base para que cada país adote seus procedimentos padrões a fim de estabelecer uma documentação sólida a respeito da qualidade de energia.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, criou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) estabelecem critérios relacionadas aos procedimentos a serem adotados nos sistemas elétricos de distribuição do país [36]. O módulo oito do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e serviço prestado pelas concessionárias de energia elétrica. As características do módulo oito do PRODIST serão descritas no capítulo a seguir.

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO – PRODIST

4.1 INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, criou por meio da Resolução Normativa N° 345 em 16 de dezembro de 2008, a primeira versão dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), constituída atualmente por 11 módulos que estabelecem critérios relacionadas aos procedimentos a serem adotados nos sistemas elétricos de distribuição do país [36].

Os Procedimentos de Distribuição são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica [37], cujos objetivos são:

- a) garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- b) propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- c) disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;
- d) estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- e) assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;
- f) disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede.

Os módulos que constituem o PRODIST são [38]:

- I. Módulo 1: Introdução
- II. Módulo 2: Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
- III. Módulo 3: Acesso ao Sistema de Distribuição

- IV. Módulo 4: Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
- V. Módulo 5: Sistemas de Medição
- VI. Módulo 6: Informações Requeridas e Obrigações
- VII. Módulo 7: Cálculo de Perdas de Distribuição
- VIII. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica
- IX. Módulo 9: Ressarcimento de Danos Elétricos
- X. Módulo 10: Sistema de Informação Geográfica Regulatório
- XI. Módulo 11: Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares

4.2 PRODIST MÓDULO 8 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O módulo oito da PRODIST tem como objetivo, como já mencionado, estabelecer os procedimentos relacionados à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto, do serviço prestado e do tratamento de reclamações [39].

Para a qualidade do produto, este módulo [39]:

- define terminologia e indicadores;
- caracteriza os fenômenos;
- estabelece os limites ou valores de referência;
- estabelece a metodologia de medição;
- estabelece a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição.

Para a qualidade do serviço, o módulo 8 estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definido padrões e responsabilidades, e para a qualidade do tratamento de reclamações, estabelece a metodologia de cálculo dos limites do indicador de qualidade comercial da FER – Frequência Equivalente de Reclamação [39].

Os procedimentos de qualidade de energia elétrica definidos neste módulo devem ser observados por [39]:

- a) consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- b) centrais geradoras;
- c) distribuidoras;
- d) agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- e) transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT;
- f) Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

4.2.1 QUALIDADE DO PRODUTO

São caracterizados nesta seção os fenômenos da qualidade do produto “energia elétrica” em:

- a) **regime permanente:**
 - i. tensão em regime permanente: são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição e de registro e os prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores;
 - ii. fator de potência: razão entre a energia ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados da energia ativa e da energia reativa, medidas em um mesmo período de tempo;
 - iii. harmônicos: são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.
 - iv. desequilíbrios de tensão: é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.
 - v. flutuação de tensão: é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea.

- vi. variação de frequência: O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

b) **transitório**:

- i. variações de tensão de curta duração – VTCD: são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos.

Os valores de referência para estes parâmetros servem como padrões a serem seguidos para quantificar a qualidade do produto entregue pelo sistema elétrico. Nos subtítulos a seguir, serão abordadas as características dos principais fenômenos de qualidade da energia presentes no módulo oito dos PRODIST relevantes para os estudos realizados neste trabalho.

4.2.1.1 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE:

A tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em baixa tensão (BT) deve ser a tensão nominal do sistema. A tensão de atendimento associada às leituras deve ser classificada segundo faixas em torno da tensão de referência (T_R) conforme a Figura 4.1 a seguir. Para fornecimento em BT, T_R é a tensão nominal contratada [39].

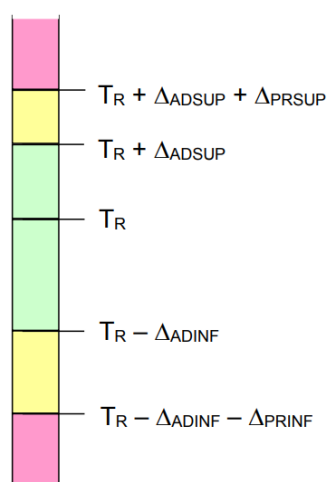


Figura 4.1 - Faixas de tensão em torno de T_R .
Fonte: Figura extraída de [39].

Na Figura acima, as faixas de tensão são classificadas como:

- a) Faixa Adequada de Tensão ($T_R - \Delta_{ADINF}$ à $T_R + \Delta_{ADSUP}$);
- b) Faixas Precárias de Tensão ($T_R + \Delta_{ADSUP}$ à $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $T_R - \Delta_{ADINF}$ à $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$);
- c) Faixas Críticas de Tensão ($> T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $< T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$).

4.2.1.2 FATOR DE POTÊNCIA

O controle do fator de potência deve ser efetuado por medição individual permanente e facultativa para unidades consumidoras atendidas pelo sistema de distribuição em baixa tensão [39].

Os valores de referência do fator de potência no ponto de conexão é entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 0,92 e 1,00 capacitivo.

4.2.1.3 HARMÔNICOS

A Tabela 4.1 reúne as grandezas e suas terminologias relacionadas à distorção harmônica, definidas no módulo oito dos PRODIST, enquanto que a Tabela 4.2 reúne os limites para as distorções harmônicas totais no ponto de conexão para os tipos de indicadores [39].

Tabela 4.1 - Terminologia das grandezas de harmônicos.

Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_P\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_I\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h máx
Ordem harmônica mínima	h mín
Tensão fundamental medida	V_1

Grandeza	Símbolo
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT95%
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT _P 95%
Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT _I 95%
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT ₃ 95%

Tabela 4.2 - Limites de distorções harmônicas totais, em % da tensão fundamental.

Indicador	Tensão Nominal		
	V_n ≤ 1,0 kV	1,0 kV < V_n < 69 kV	69 kv ≤ V_n < 230 kV
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _P 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _I 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

4.2.1.4 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

A Tabela 4.3 reúne as grandezas e suas terminologias relacionadas ao desequilíbrio de tensão, definidas no módulo oito dos PRODIST, enquanto que a Tabela 4.4 reúne os limites para os desequilíbrios de tensão no ponto de conexão para os tipos de indicadores [39].

Tabela 4.3 - Terminologia das grandezas de desequilíbrio de tensão.

Grandeza	Símbolo
Fator de desequilíbrio de tensão	FD
Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental	V-
Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental	V+
Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental	V _{ab} , V _{bc} , V _{ca}
Valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	FD95%

Tabela 4.4 - Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão Nominal	
	V_n ≤ 1,0 kV	1,0 kv ≤ V_n < 230 kV
FD95%	3,0%	2,0%

4.2.2 INDICADORES DA QUALIDADE DO PRODUTO

Os indicadores da qualidade do produto dispostos no módulo oito dos PRODIST fornecem dados utilizados para indicar a qualidade da energia do sistema elétrico. Dentre os índices e indicadores presentes no módulo, serão abordados apenas os mais relevantes para os estudos realizados neste trabalho, presentes no módulo oito dos PRODIST.

A partir das leituras dos valores da tensão de atendimento da(s) unidade(s) consumidora(s), são gerados os indicadores individuais e coletivos.

O conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deve compreender o registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada. No intuito de se obter 1008 leituras válidas, devem ser agregados intervalos consecutivamente.

a) Indicadores referentes à tensão em regime permanente:

Após a obtenção do conjunto de leituras válidas, quando de medições oriundas por reclamação ou amostrais, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o para tensão crítica (DRC), como indicadores individuais, e o Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica (ICC), como indicador coletivos, de acordo com as seguintes expressões:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (4.1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (4.2)$$

$$ICC = \frac{N_C}{N_L} \cdot 100[\%] \quad (4.3)$$

$$DRP_E = \sum \frac{DRP_i}{N_L} [\%] \quad (4.4)$$

$$DRC_E = \sum \frac{DRC_E}{N_L} [\%] \quad (4.5)$$

sendo:

nlp o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na Faixa Precária de Tensão;

nlc o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na Faixa Crítica de Tensão;

N_C = total de unidades consumidoras com DRC, não nulo;

N_L = total de unidades consumidoras objeto de medição;

DRP_i = duração relativa de transgressão de tensão precária individual da unidade consumidora (i);

DRC_i = duração relativa de transgressão de tensão crítica individual da unidade consumidora (i);

DRP_E = duração relativa de transgressão de tensão precária equivalente;

DRC_E = duração relativa de transgressão de tensão crítica equivalente.

Os limites para os indicadores DRP e DRC são, respectivamente, 3% e 0,5% [39].

b) Indicadores referentes à distorção harmônica:

Após a obtenção do conjunto de leituras válidas, quando de medições oriundas por reclamação ou amostrais, devem ser calculadas as grandezas $DIT_h\%$, $DTT\%$, $DTT_P\%$, $DTT_i\%$ e $DTT_3\%$, de acordo com as seguintes expressões:

$$DTI_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100[\%] \quad (4.6)$$

sendo:

h = ordem harmônica individual.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \text{ máx}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100[\%] \quad (4.7)$$

sendo:

h = todas as ordens harmônicas de 2 até $h \text{ máx}$;

$h \text{ máx}$ = conforme método de medição Classe A ou S (IEC 61000-4-30).

$$DTT_P \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_P} V_h^2}}{V_1} \cdot 100[\%] \quad (4.8)$$

sendo:

h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, \dots$);

h_P = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \cdot 100[\%] \quad (4.9)$$

sendo:

h = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, \dots$);

h_i = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \cdot 100[\%] \quad (4.10)$$

sendo:

h = todas as ordens harmônicas pares múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, \dots$);

h_3 = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

c) Indicadores referentes ao desequilíbrio de tensão:

A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100[\%] \quad (4.11)$$

Alternativamente, pode-se utilizar a expressão a seguir, que conduz a resultados consonantes:

$$FD\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} [\%] \quad (4.12)$$

sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (4.13)$$

4.2.3 QUALIDADE DO SERVIÇO

Esta seção do módulo oito do PRODIST tem como objetivos [39]:

- i. estabelecer procedimentos relativos à qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores, centrais geradoras e distribuidoras acessantes.
- ii. estabelecer procedimentos relativos à qualidade do serviço prestado pelas transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT aos acessantes e distribuidoras.
- iii. definir indicadores e padrões de qualidade de serviço de forma a:
 - a) fornecer mecanismos para acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras e das transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão - DIT;
 - b) fornecer subsídios para os planos de reforma, melhoramento e expansão da infraestrutura das distribuidoras;
 - c) oferecer aos consumidores e centrais geradoras parâmetros para avaliação do serviço prestado pela distribuidora.

4.2.4 INDICADORES DE CONTINUIDADE DE SERVIÇO

Os indicadores de continuidade de serviço de distribuição de energia elétrica informam quanto à duração e a frequência de interrupção do fornecimento de energia elétrica. Após a realização do controle de interrupções do fornecimento de energia elétrica aos consumidores, do cálculo e da divulgação dos indicadores de continuidade de serviço, as

distribuidoras, os consumidores, e a ANEEL podem avaliar a qualidade do serviço prestado e o desempenho do sistema elétrico.

Estes indicadores devem ser calculados para períodos de apuração mensais, trimestrais e anuais, salvo a exceção do indicador *DICRI*, que deverá ser apurado por interrupção em dia crítico [39].

Para melhor distinção entre os indicadores de continuidade, eles são separados entre os indicadores de continuidade individuais, que são apurados para cada unidade consumidora ou por ponto de conexão, e os indicadores de continuidade por conjunto de unidades consumidoras, que são apurados para cada conjunto de unidades consumidoras.

Os indicadores de continuidade individuais são [39]:

- a) Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DIC), utilizando a seguinte fórmula:

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (4.14)$$

- b) Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (FIC), utilizando a seguinte fórmula:

$$FIC = n \quad (4.15)$$

- c) Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DMIC), utilizando a seguinte fórmula:

$$DMIC = t(i) \max \quad (4.16)$$

- d) Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DICRI), utilizando a seguinte fórmula:

$$DICRI = t_{crítico} \quad (4.17)$$

onde:

DIC = duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

FIC = frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em número de interrupções;

$DMIC$ = duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

$DICRI$ = duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

i = índice de interrupções da unidade consumidora ou por ponto de conexão no período de apuração, variando de 1 a n ;

n = número de interrupções da unidade consumidora ou por ponto de conexão considerado, no período de apuração;

$t(i)$ = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada ou do ponto de conexão, no período de apuração;

$t(i)_{max}$ = valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção contínua (i), no período de apuração, verificada na unidade consumidora ou no ponto de conexão considerado, expresso em horas e centésimos de horas;

$t_{crítico}$ = duração da interrupção ocorrida em Dia Crítico.

Os indicadores de continuidade por conjunto de unidades consumidoras são [39]:

- a) Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), utilizando a seguinte fórmula:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC(i)}{Cc} \quad (4.18)$$

- b) Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (FIC), utilizando a seguinte fórmula:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC(i)}{Cc} \quad (4.19)$$

onde:

DEC = duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;

FEC = frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções;

i = índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto;

C_c = número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT;

$DIC(i)$ = Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, excluindo-se as centrais geradoras;

$FIC(i)$ = Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, excluindo-se as centrais geradoras.

Após o cálculo dos indicadores de continuidade, estes deverão ser apurados considerando as interrupções de longa duração, que é toda interrupção do sistema elétrico com duração igual ou maior que 3 (três) minutos [39].

Para a apuração dos indicadores de continuidade por conjunto de unidades consumidoras DEC e FEC , são consideradas todos os tipos de interrupção de longa duração, exceto:

- i. falha nas instalações da unidade consumidora que não provoque interrupção em instalações de terceiros;
- ii. interrupção decorrente de obras de interesse exclusivo do consumidor e que afete somente a unidade consumidora do mesmo;
- iii. Interrupção em Situação de Emergência;
- iv. suspensão por inadimplemento do consumidor ou por deficiência técnica e/ou de segurança das instalações da unidade consumidora que não provoque interrupção em instalações de terceiros, previstas em regulamentação;
- v. vinculadas a programas de racionamento instituídos pela União;
- vi. ocorridas em Dia Crítico;
- vii. oriundas de atuação de Esquema Regional de Alívio de Carga estabelecido pelo ONS.

Para a apuração dos indicadores de continuidade individuais *DIC* e *FIC*, são consideradas todos os tipos de interrupção de longa duração, exceto:

- i. falha nas instalações da unidade consumidora ou da central geradora que não provoque interrupção em instalações de terceiros;
- ii. interrupção decorrente de obras de interesse exclusivo do consumidor ou da central geradora e que afete somente a unidade consumidora do mesmo;
- iii. Interrupção em Situação de Emergência;
- iv. suspensão por inadimplemento do consumidor ou da central geradora ou por deficiência técnica e/ou de segurança das instalações da unidade consumidora ou da central geradora que não provoque interrupção em instalações de terceiros, previstas em regulamentação;
- v. vinculadas a programas de racionamento instituídos pela União;
- vi. ocorridas em Dia Crítico;
- vii. oriundas de atuação de Esquema Regional de Alívio de Carga estabelecido pelo ONS.

Na apuração do indicador *DMIC*, além das interrupções referidas acima, também não deverão ser consideradas aquelas oriundas de desligamentos programados, desde que sejam atendidas as seguintes condições:

- a) os consumidores e centrais geradoras sejam devidamente avisados;
- b) o início e o fim da interrupção estejam compreendidos no intervalo programado.

Na apuração do indicador *DICRI* não serão consideradas as exceções de interrupções previstas anteriormente, com exceção do inciso vi.

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA

5.1 INTRODUÇÃO

O objetivo desta seção é apresentar a forma como os dados para avaliação foram colhidos e processados. Os fenômenos da qualidade do produto que foram analisados, de acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, foram tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão.

5.2 COLETA DOS DADOS

Anteriormente à instalação do sistema fotovoltaico, foram coletados dados de fatores de potência, tensões de fase e tensões de linha no quadro de distribuição da guarita de entrada do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga utilizando o analisador de energia Minipa® ET-5061C. O analisador coletou dados do dia 20 de abril de 2016, às 10h21 min, até o dia 29 de abril de 2016, às 09h31min. No próximo capítulo será discutido a manipulação de seus dados e comparações com os dados coletados após a instalação do sistema fotovoltaico.

A operação do sistema fotovoltaico no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga teve início no dia 31 de agosto de 2016. Os módulos solares utilizados são do modelo CS6P, da empresa *Canadian Solar* fundada em 2001 no Canadá. Os mesmos possuem eficiência superior 15%, funcionam com potência máxima de 255 W e tem tensão operacional de 30,2 V. Eles são do tipo silício policristalino e têm 60 células.

Após a instalação do sistema fotovoltaico, foram colhidos dados utilizando também o analisador de qualidade de energia Minipa® ET-5061C. Os parâmetros coletados foram fatores de potência, tensões de fase, tensões de linha e os 40 primeiros harmônicos de tensão do sistema trifásico.

O analisador de qualidade de energia foi instalado no quadro de distribuição de circuitos do Bloco B do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

– *Campus Formiga* no dia 12 de abril de 2018, às 14h25 min. O mesmo permaneceu instalado até o dia 24 de abril de 2018, às 14h45min.

O instrumento foi configurado para realizar a gravação de dados de um sistema elétrico trifásico a quatro fios em estrela (trifásico + neutro + terra), conforme mostrado na Figura 5.1. As pontas de prova de tensão e as garras de corrente transdutoras foram conectadas nos cabos das fases L1, L2 e L3, do neutro e do terra conforme indicado na Figura 5.2. O período de integração, ou seja, o intervalo de tempo entre dois registros consecutivos, foi configurado para 10 minutos. Devido à presença de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), o parâmetro cogeração foi configurado como “ON” para a correta medição dos fatores de potência.

No total, foram colhidos 1731 dados de cada parâmetro anteriormente mencionado, dos quais 723 foram expurgados devido a não necessidade de sua utilização, segundo a PRODIST. Assim, foram utilizados exatos 1008 dados de cada parâmetro.

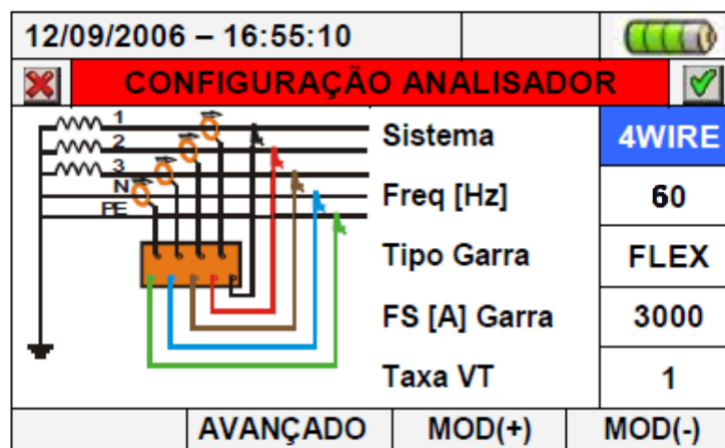


Figura 5.1 - Tela de configuração do analisador de qualidade de energia para um sistema elétrico trifásico a quatro fios em estrela.

Fonte: Figura extraída de [40].

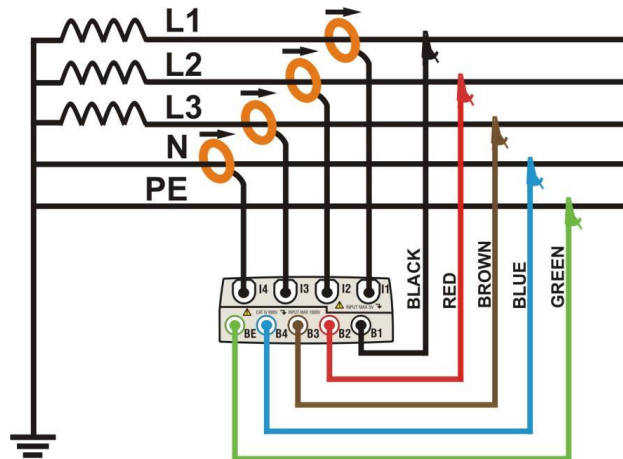


Figura 5.2 - Conexão do instrumento em sistemas trifásicos a quatro fios.
Fonte: Figura extraída de [40].

5.3 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Foram analisados os valores de tensão em regime permanente por fase, a qual cada fase foi comparada à tensão de referência, que se refere à tensão nominal ou contratada, no caso, 127 V. De acordo com a norma PRODIST, as leituras associadas para cada tensão de referência classificam-se nas categorias: adequadas, precárias ou críticas. Essas categorias se baseiam no quão longe está o valor da tensão de leitura em relação à tensão de referência. Para análise dessas categorias, a faixa de variação da tensão nominal igual ou inferior a 1 kV, encontra-se na tabela 4 do Anexo I presente em [39].

5.4 FATOR DE POTÊNCIA

Os valores de fatores de potência global colhidos foram comparados com o disposto no art. 95 da Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. Para os valores que não se enquadraram nos limites da REN nº 414, geram demandas de potência reativa excedentes e, conseqüentemente, cobranças adicionais no faturamento regular da unidade consumidora. O cálculo dos valores correspondentes à energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes não são apurados neste trabalho, pois não fazem parte do objetivo do mesmo.

5.5 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções harmônicas foram calculadas de acordo com expressões matemáticas que identificam: a distorção harmônica total de tensão (DTT%), a distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTTp%), a distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTTi%), a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT3%), o valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas (DTT95%), o valor do indicador DTTp% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas (DTT95%), o valor do indicador DTTi% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas (DTTi95%), o valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas (DTT395%). Os limites para as distorções harmônicas totais encontram-se na Tabela 2 presente em [39].

5.6 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O fator desequilíbrio de tensão foi obtido através de uma expressão matemática que analisa a relação entre as magnitudes das tensões eficazes de linha das três fases presente na Equação (4.12). Para a análise do limite para os desequilíbrios de tensão, é utilizado apenas o fator de desequilíbrio de tensão que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas, ou seja, as 5% maiores. O indicador de limite de desequilíbrio de tensão está apresentado na Tabela 4 presente em [39].

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é mostrar a aplicação da metodologia utilizada no capítulo anterior. Para a manipulação dos dados coletados, utilizou-se o *software* EXCEL e para a simulação dos gráficos foi utilizado o *software* MATLAB R2014a.

6.2 RESULTADOS PARA TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Após a obtenção dos valores de tensão por meio de medição apropriada, foi feita a manipulação dos dados e simulação computacional do comportamento de cada uma das três fases. Os valores resultantes foram comparados de acordo com a Tabela 4 do Anexo I da PRODIST presente em [39].

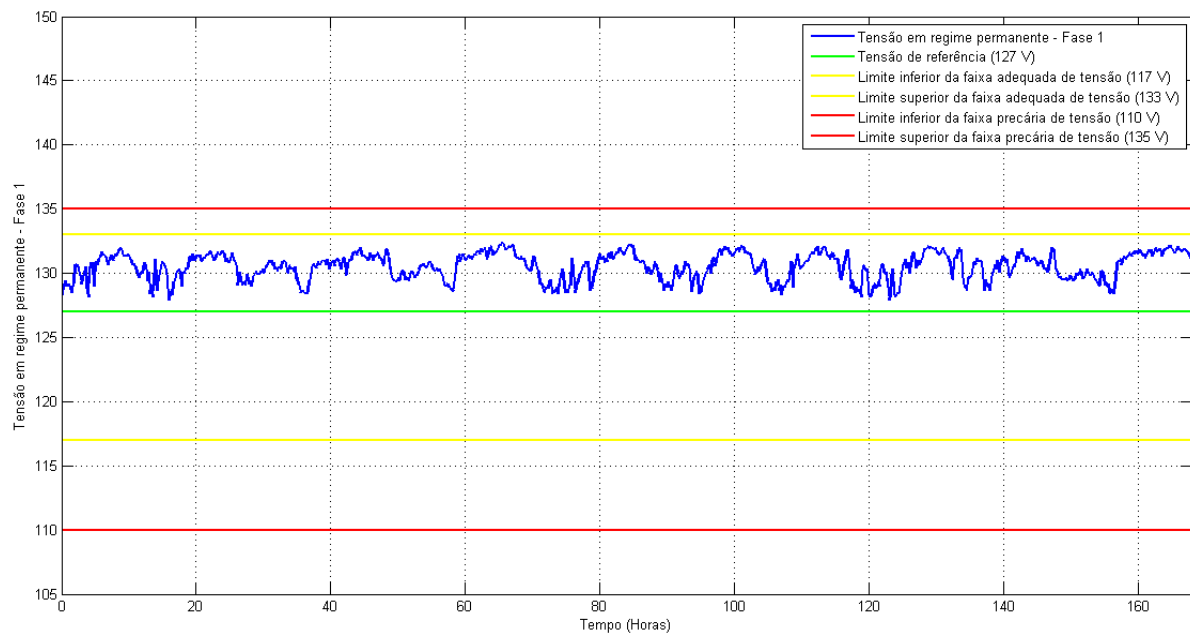


Figura 6.1 - Tensão em regime permanente da Fase 1.

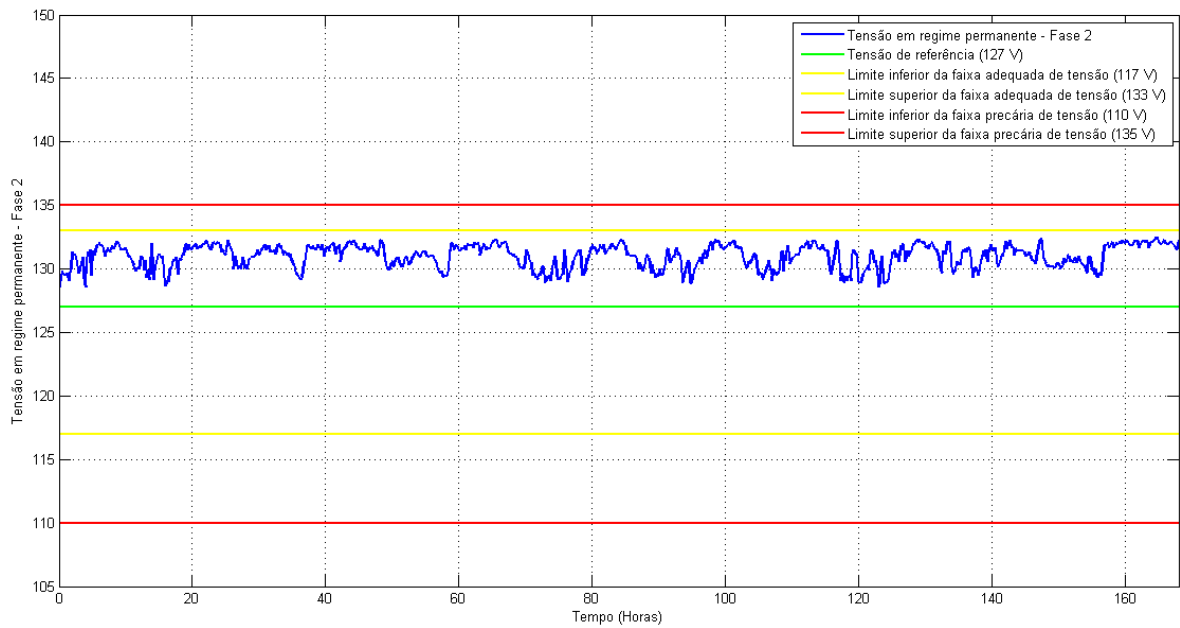


Figura 6.2 - Tensão em regime permanente da fase 2.

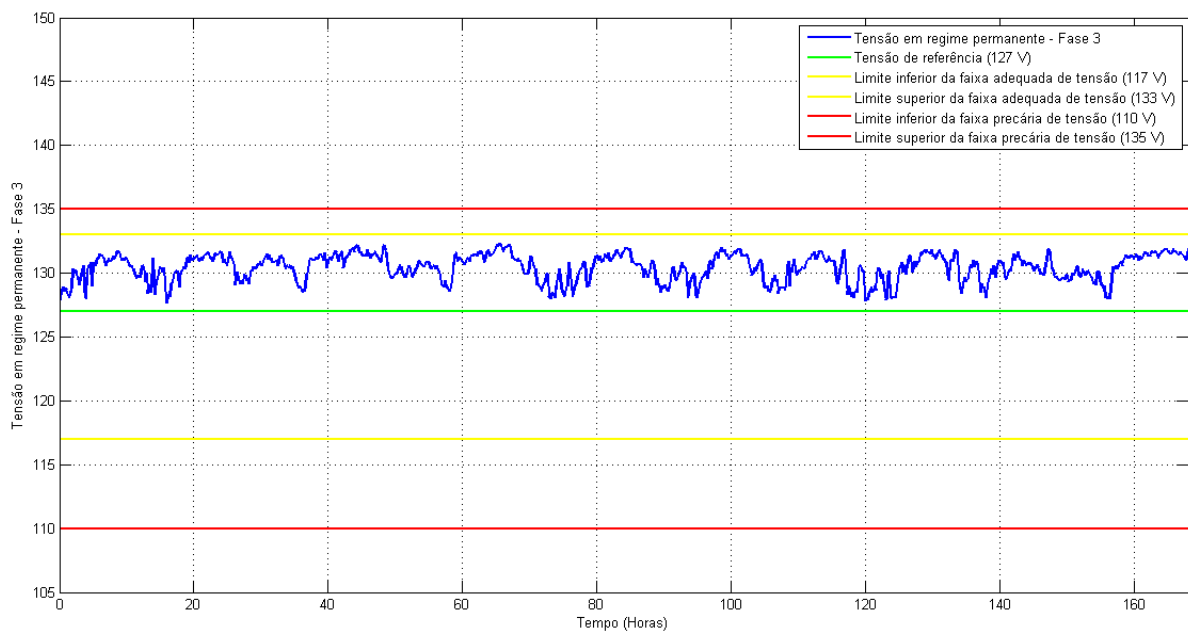


Figura 6.3 - Tensão em regime permanente da fase 3.

Sendo conhecidos os limites superiores e inferiores de tensão nos quais a tensão em regime permanente não deveria ultrapassar, foi constatado que a mesma permaneceu na faixa de valores adequados (entre 117 V e 133 V) nas três fases. Em nenhum momento das leituras nas três fases, houve ultrapassagem de valores para as faixas precárias (entre 110 V e 135 V) ou críticas (acima de 135 V ou abaixo de 110 V) de tensão.

6.3 RESULTADOS PARA FATOR DE POTÊNCIA

A Figura 6.4 mostra os valores do fator de potência medidos no quadro de distribuição de circuitos do Bloco B do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Formiga* entre os dias 12 de abril de 2018 e 24 de abril de 2018. Por convenção, os valores de fator de potência capacitivo foram considerados positivos e os valores de fator de potência indutivo negativos.

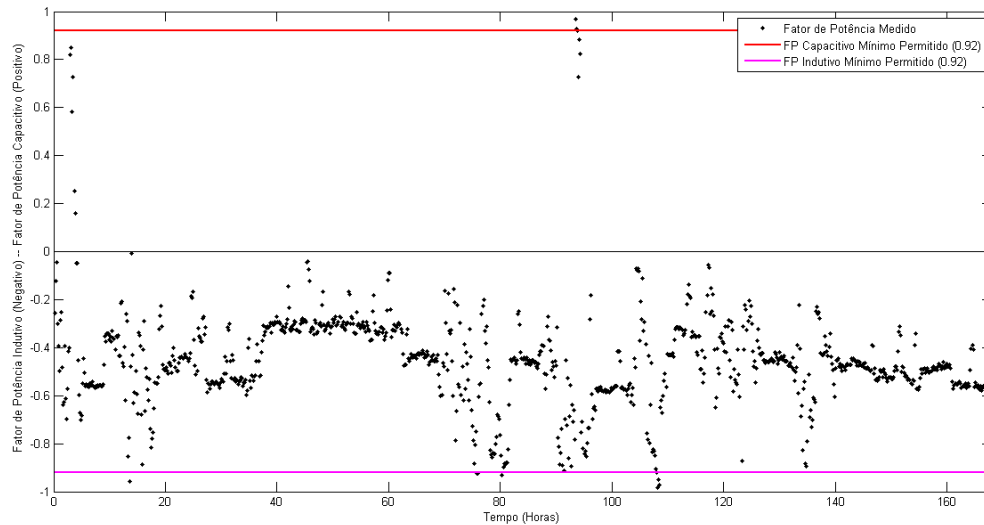


Figura 6.4 - Fatores de potência medidos no quadro de distribuição de circuitos do Bloco B do IFMG - Campus Formiga.

Os valores compreendidos entre as linhas vermelha (limite de fator de potência capacitivo – 0,92) e magenta (limite de fator de potência indutivo – 0,92) correspondem aos valores de fatores de potência que não estão em consonância com a Resolução Normativa nº 414, ou seja, valores que geram cobrança adicional no faturamento regular da unidade consumidora.

A Figura 6.4 mostra que a maioria dos valores de fator de potência da instalação estão fora dos limites permitidos pela Resolução Normativa e que grande parte dos valores correspondem a um fator de potência indutivo. Dos 1.008 valores analisados, 996 possuem valor inferior a 0,92 capacitivo ou 0,92 indutivo, ou seja, aproximadamente 98,809% dos valores medidos excedem o limite permitido pela Resolução Normativa nº 414.

Em contrapartida, a Figura 6.5 mostra os valores coletados entre os dias 20 de abril de 2016 e 29 de abril do mesmo ano. Por convenção, os valores de fator de potência capacitivo também foram considerados positivos e os valores de fator de potência indutivo negativos.

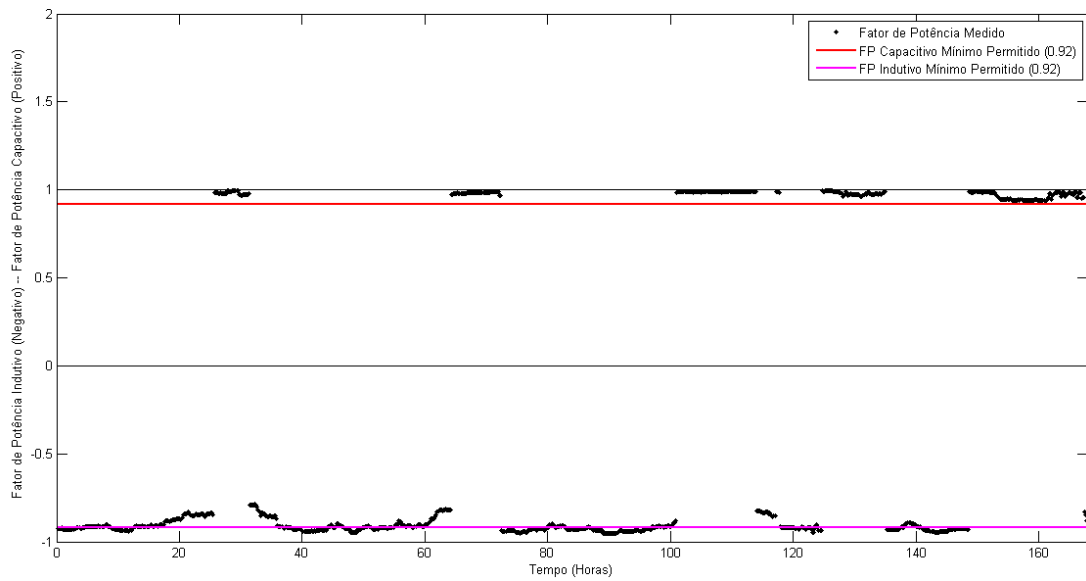


Figura 6.5 - Fatores de potência medidos no quadro de distribuição de circuitos do Bloco B do IFMG - Campus Formiga em 2016.

Comparando as Figura 6.4 e 6.5 é possível perceber que, atualmente, o IFMG – *Campus* Formiga paga um valor muito maior de excedentes reativos do que pagava em 2016, devido à maior quantidade de fatores de potência que não estão de acordo com os limites dispostos nas normas vigentes.

6.4 RESULTADOS PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Os resultados obtidos das manipulações dos dados coletados e suas simulações para os cálculos das terminologias relacionadas à distorção harmônica definidas no Módulo 8 do PRODIST (mostradas na Tabela 4.1), estão dispostos a seguir.

As distorções harmônicas totais, de cada uma das três fases, são mostradas nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8.

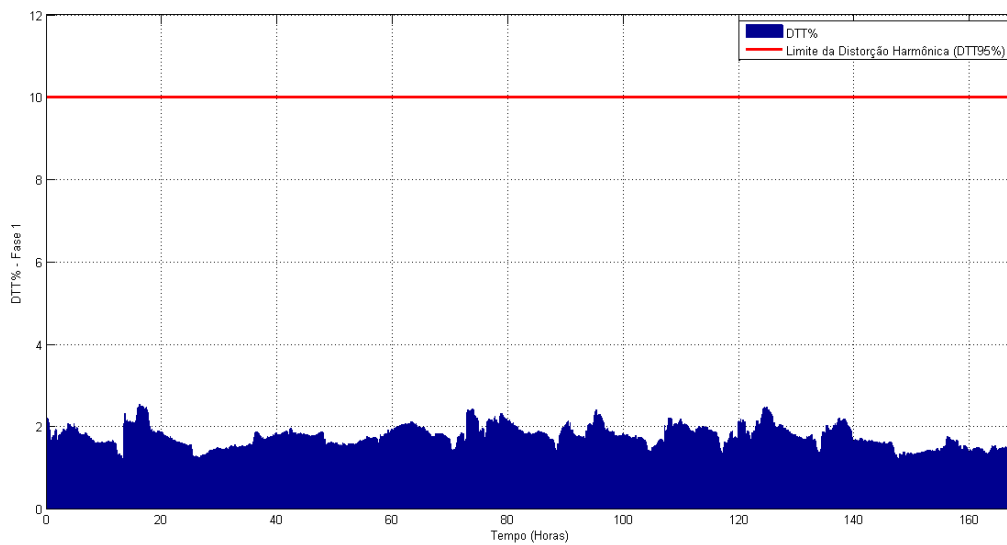


Figura 6.6 - Distorção harmônica total da fase 1.

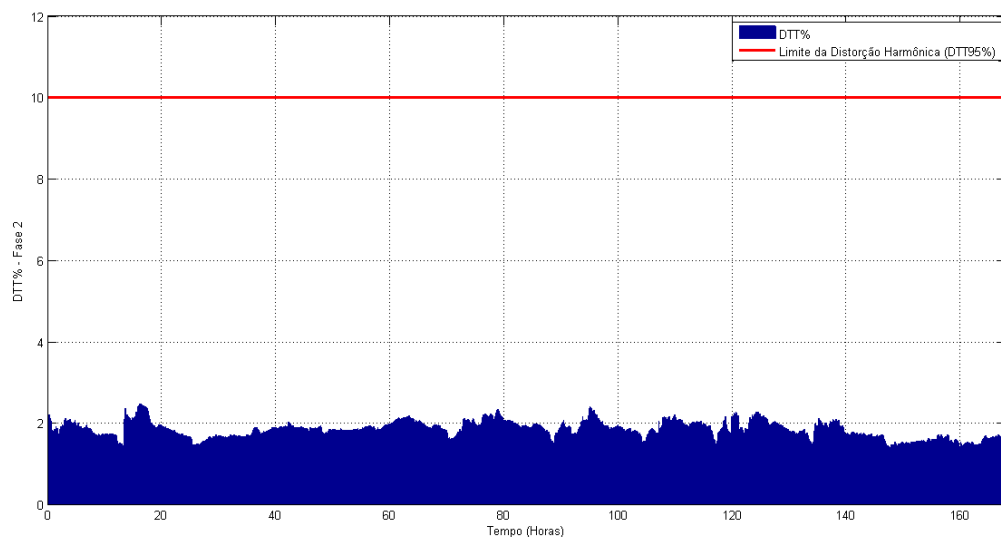


Figura 6.7 - Distorção harmônica total da fase 2.

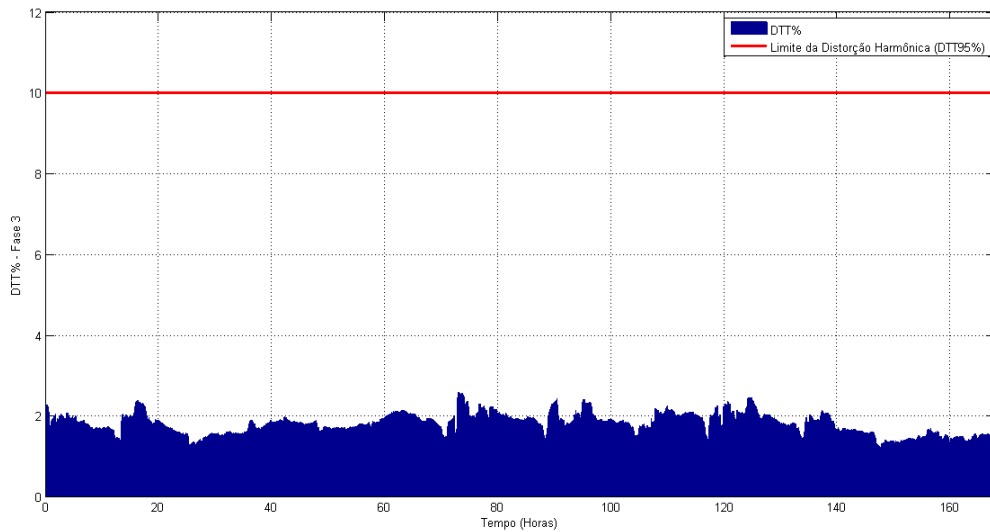


Figura 6.8 - Distorção harmônica total da fase 3.

De acordo com a Tabela 4.2, nas análises de limites de distorção harmônica total em cada fase, os dados a serem analisados são os 5% maiores valores da leitura. Foi observado que em nenhuma das três fases, os dados totais de leitura ultrapassaram e também não se aproximaram do limite de 10% estabelecido pela norma.

As distorções harmônicas totais de tensão para as componentes pares não múltiplas de três, de cada uma das três fases, são mostradas nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11.

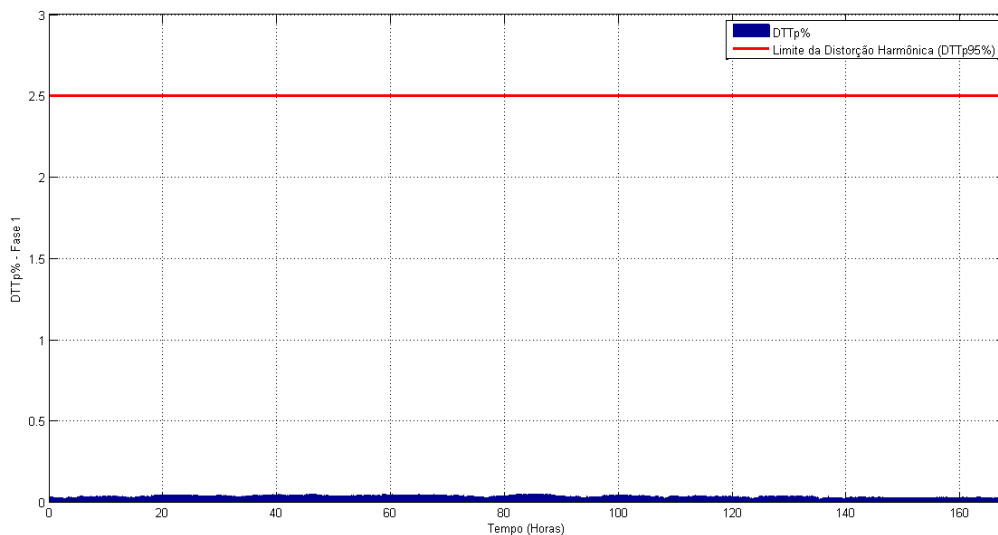


Figura 6.9 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes pares não múltiplas de três da fase 1.

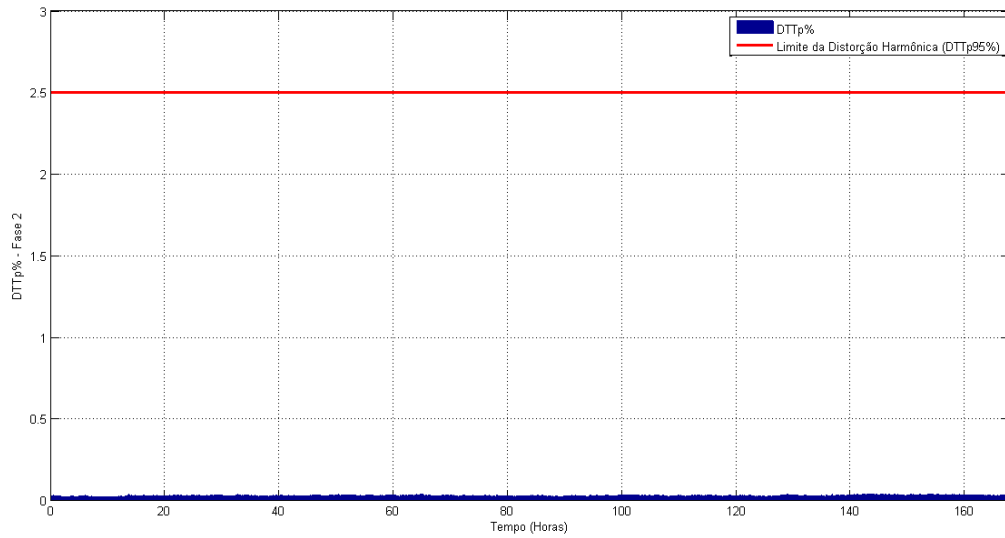


Figura 6.10 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes pares não múltiplas de três da fase 2.

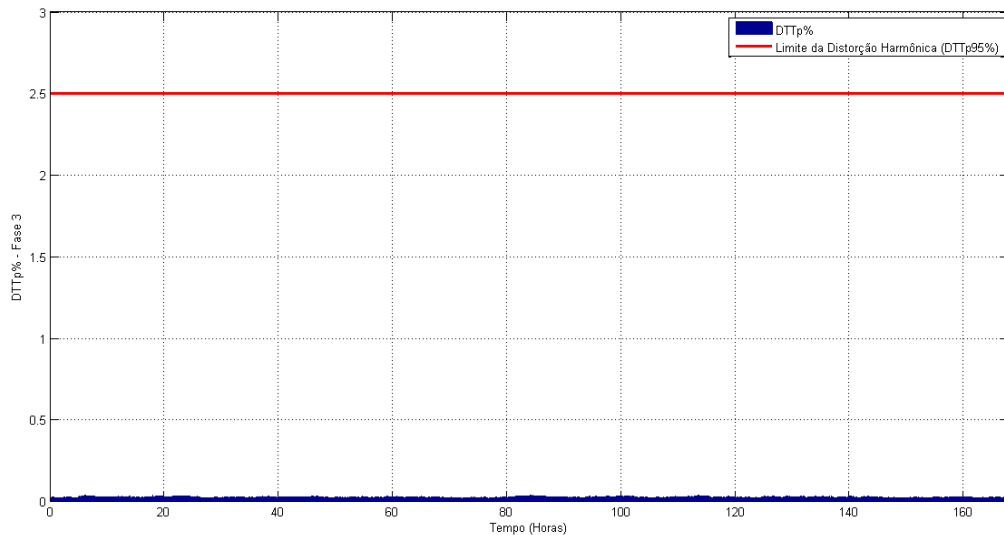


Figura 6.11 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes pares não múltiplas de três da fase 3.

De acordo com a Tabela 4.2, nas análises de limites de distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de três, em cada fase, os dados a serem analisados são os 5% maiores valores da leitura. Foi observado que em nenhuma das três fases, os dados totais de leitura ultrapassaram e também não se aproximaram do limite de 2,5% estabelecido pela norma.

As distorções harmônicas totais de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três, de cada uma das três fases, são mostradas na Figura 6.12, Figura 6.13, e Figura 6.14.

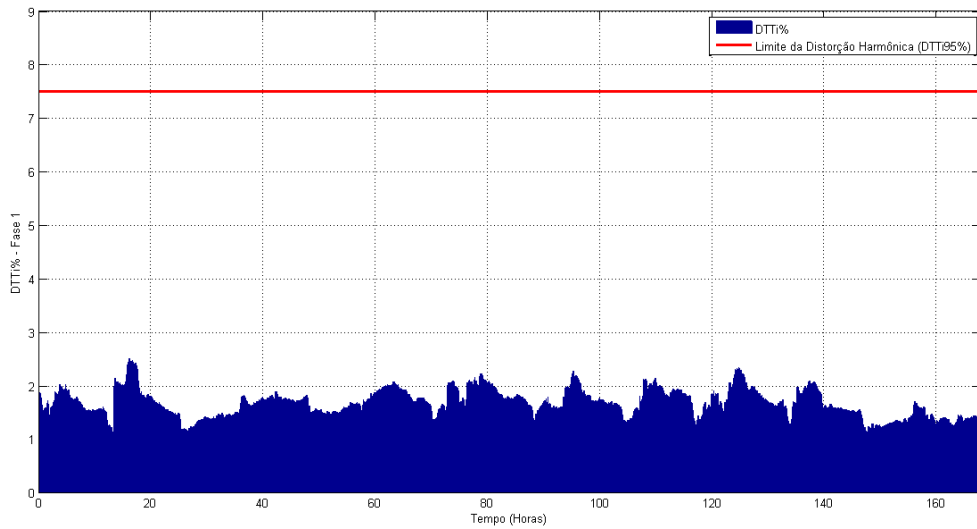


Figura 6.12 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três da fase 1.

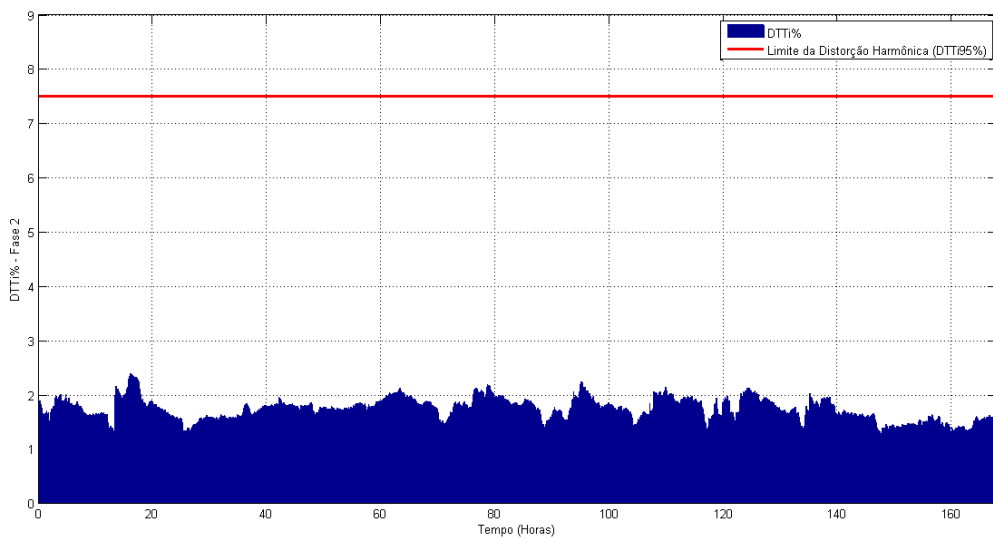


Figura 6.13 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três da fase 2.

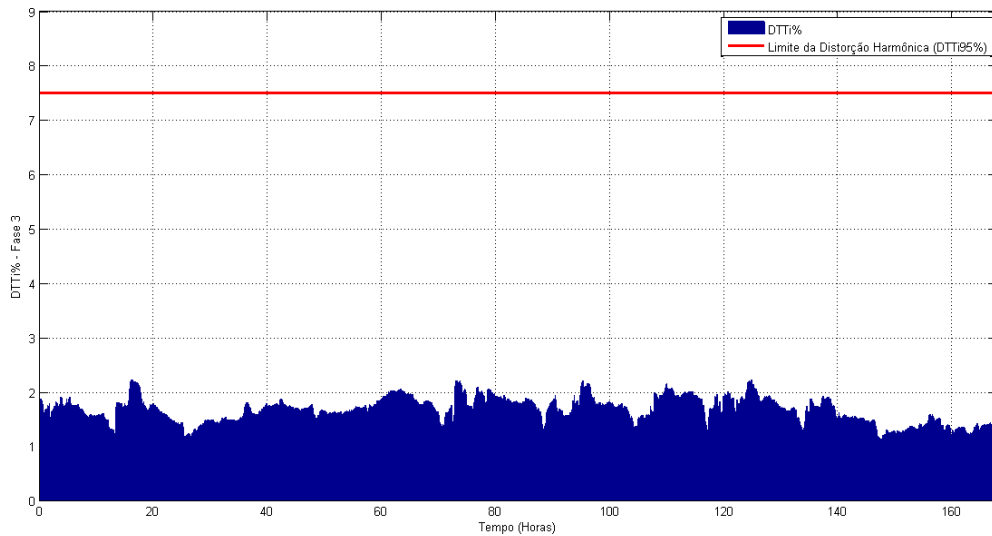


Figura 6.14 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três da fase 3.

Ainda de acordo com a Tabela 4.2, nas análises de limites de distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três, em cada fase, os dados analisados foram os 5% maiores valores da leitura. Foi observado que em nenhuma das três fases, os dados totais de leitura ultrapassaram e também não se aproximaram do limite de 7,5% estabelecido pela norma.

As distorções harmônicas totais de tensão para as componentes múltiplas de três, de cada uma das três fases, são mostradas nas Figuras 6.15, 6.16 e 6.17.

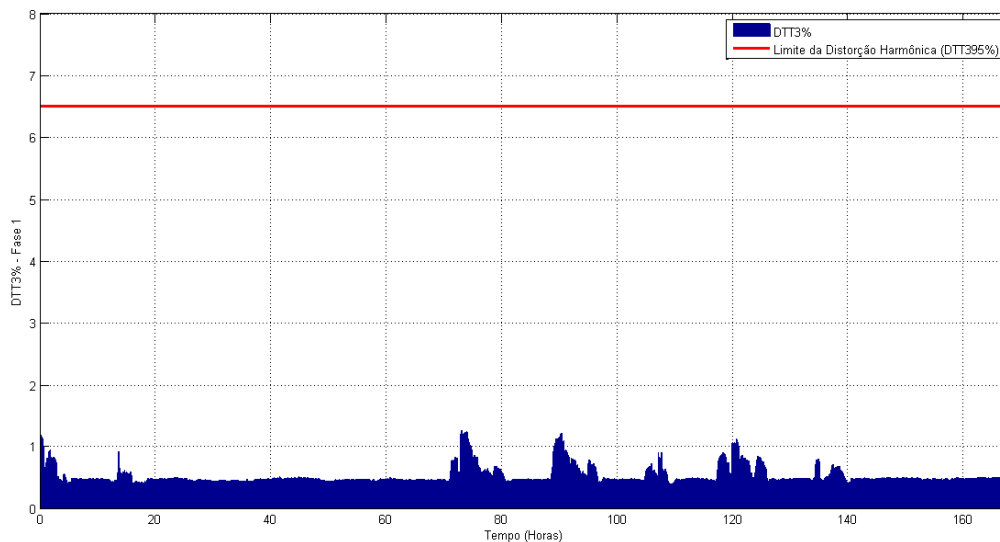


Figura 6.15 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes múltiplas de três da fase 1.

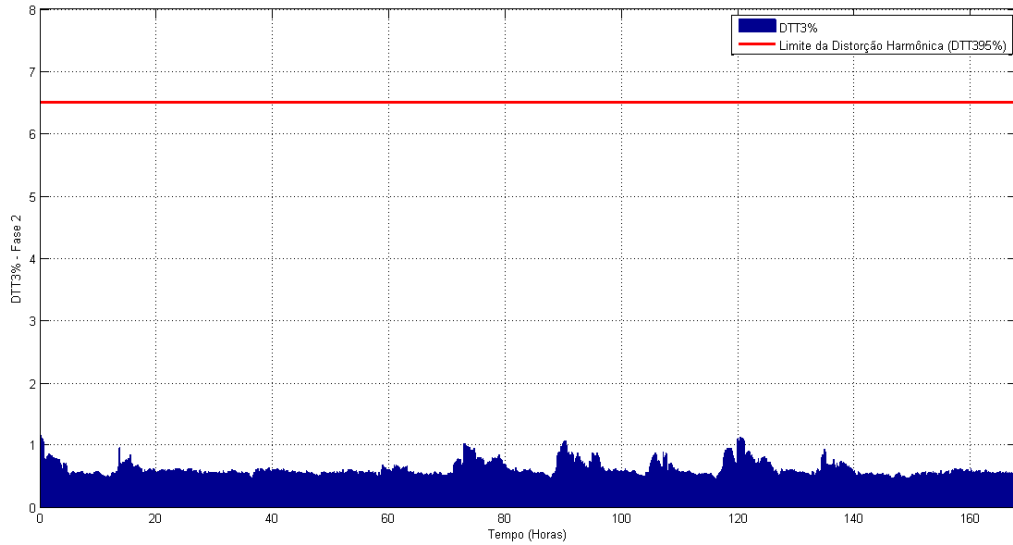


Figura 6.16 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes múltiplas de três da fase 2.

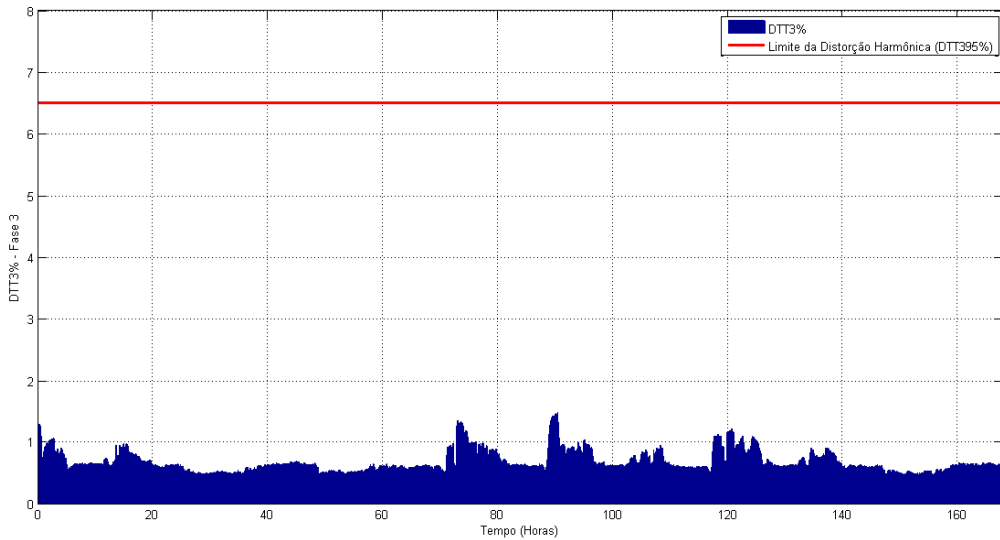


Figura 6.17 - Distorções harmônicas totais de tensão para as componentes múltiplas de três da fase 3.

De acordo com a Tabela 4.2, nas análises de limites de distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de três em cada fase, os dados analisados foram os 5% maiores valores da leitura. Foi observado que em nenhuma das três fases, os dados totais de leitura ultrapassaram e também não se aproximaram do limite de 6,5% estabelecido pela norma.

6.5 RESULTADOS PARA DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Para a análise dos limites do fenômeno caracterizado por qualquer diferença nas amplitudes entre as três tensões de fase, foi utilizado o fator desequilíbrio de tensão, presente

na equação 4.12. Após manipulação dos dados, foi possível a simulação computacional do seu comportamento.

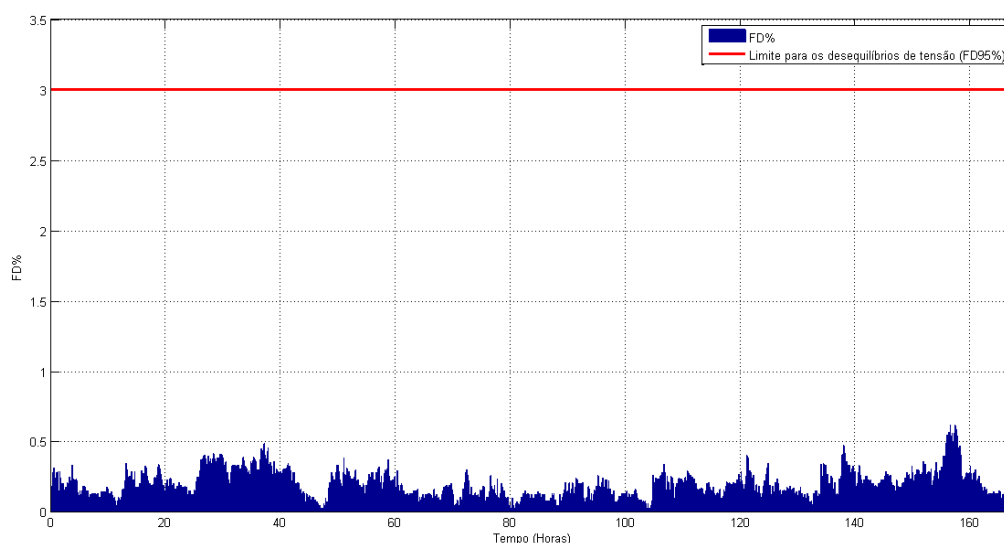


Figura 6.18 - Fator de desequilíbrio de tensão.

De acordo com a norma e de acordo com a Tabela 4.4, nas análises de limites do fator de desequilíbrio de tensão, os dados analisados foram os 5% maiores valores da leitura. Foi observado que em nenhum momento os dados totais de leitura ultrapassaram e também não se aproximaram do limite de 3% estabelecido.

6.6 RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS DADOS DE ANTES E DEPOIS DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAÍCO.

Em geral, as distorções harmônicas individuais das tensões coletados antes e depois da instalação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede se mostraram inalteradas. A amplitude de tais distorções se manteve no mesmo patamar, sem diferenças muito significativas que exijam uma observação mais detalhada.

Dentre as distorções harmônicas individuais analisadas, as harmônicas de 3ª e 5ª ordem chamaram mais atenção, devido à diferença das suas amplitudes em relação às demais ordens harmônicas.

Em sistemas de retificação e acionamentos CC, o resultado à entrada do retificador é uma onda distorcida, normalmente rica em conteúdo harmônico. O nível de distorção em cada fase da alimentação depende, principalmente, do número de pulsos utilizados para retificação, seguindo a relação $nK \pm 1$ [1], onde K é o número de pulsos e o resultado corresponde às principais ordens harmônicas presentes. Para retificadores trifásicos de 6 pulsos, por exemplo,

comumente utilizados para a alimentação do enrolamento de armadura de motores de corrente contínua, as principais harmônicas presentes são 5^a, 7^a, 11^a etc.

Equipamentos eletrônicos mais modernos, como os microcomputadores, utilizam fontes de alimentação chaveadas que são leves, pequenas e possuem boa tolerância a variações na tensão de alimentação. Entretanto, devido à presença de pontes retificadoras e capacitores nestas, há um grande conteúdo harmônico de 3^a ordem.

Visto que no IFMG – *Campus Formiga* a utilização de equipamentos para realizar o acionamento de máquinas de corrente contínua e a utilização de microcomputadores alimentados por fontes de alimentação chaveadas ocorre com grande frequência, estes equipamentos podem ser os principais causadores do surgimento de componentes harmônicas de 3^a e 5^a ordens.

Vale salientar, como mostrado na seção 6. 4, que o percentual de distorções harmônicas não é elevado o bastante para contrariar os limites presentes nas normas vigentes. As comparações entre os valores de distorção harmônica individual de tensão das componentes harmônicas de 3^a e 5^a ordens obtidas nas medições de 2016 e 2018 em cada uma das fases da instalação são mostradas nas Figura 6. 19 à Figura 6. 23.

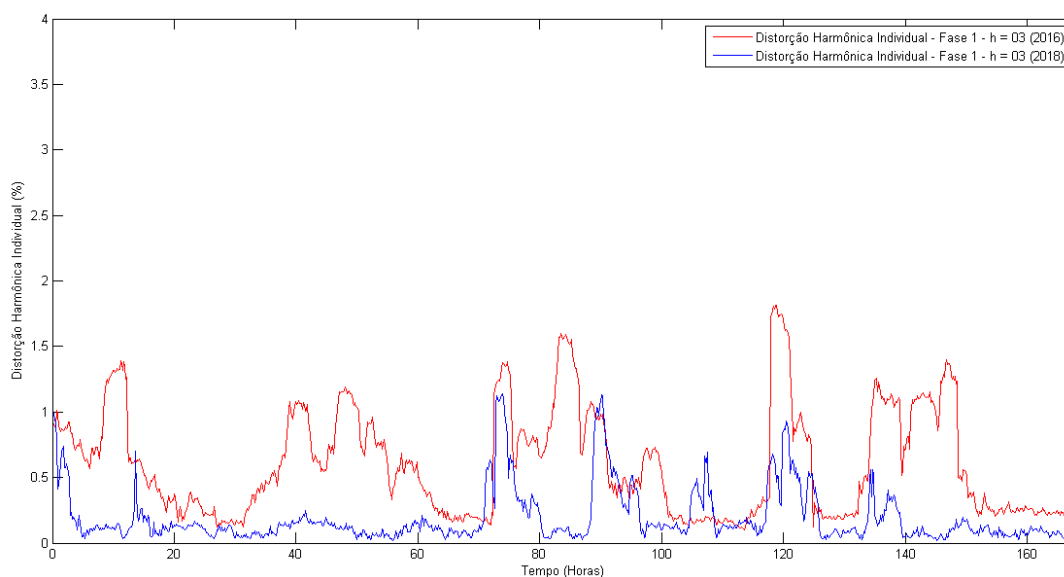


Figura 6.19 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 3^a ordem da Fase 1 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).

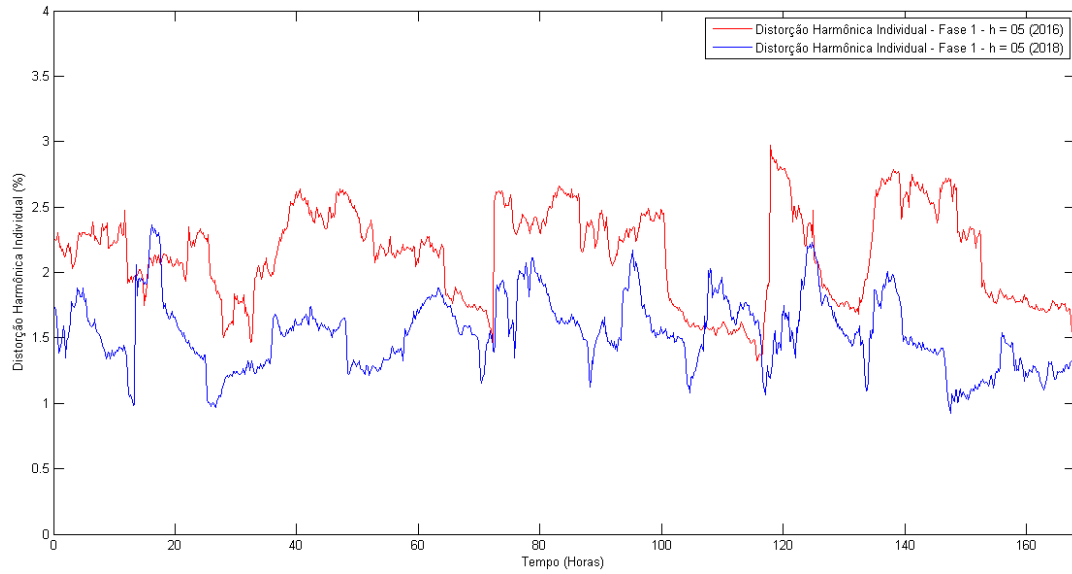


Figura 6.20 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 5ª ordem da Fase 1 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).

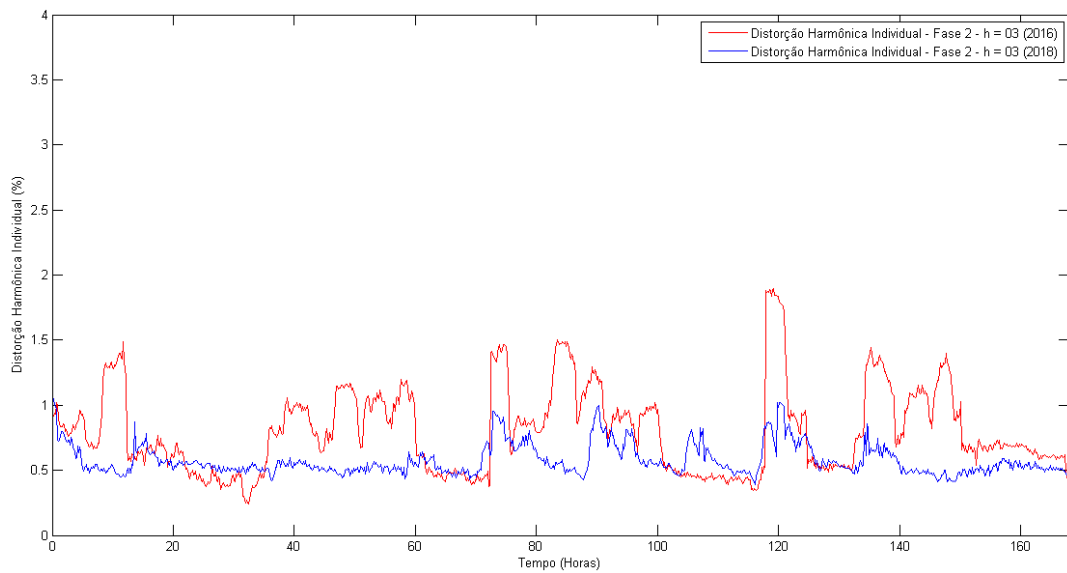


Figura 6.21 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 3ª ordem da Fase 2 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).

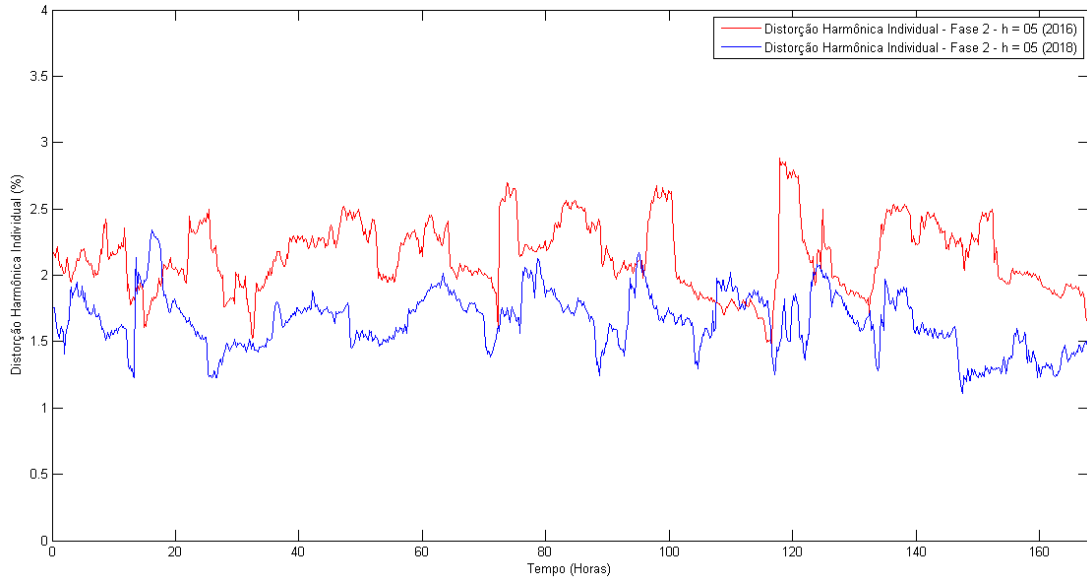


Figura 6.22 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 5ª ordem da Fase 2 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).

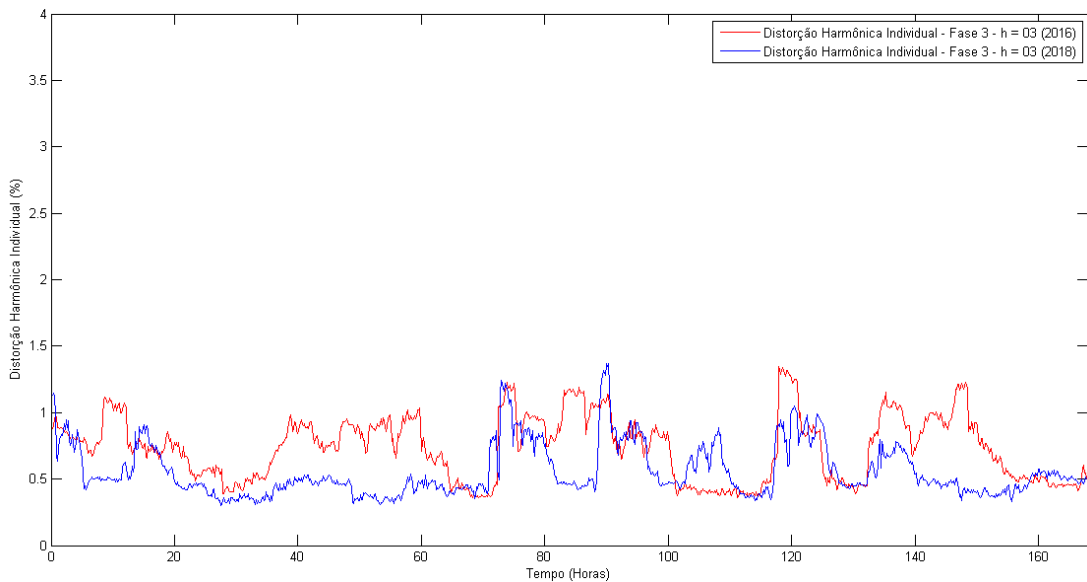


Figura 6.23 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 3ª ordem da Fase 3 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).

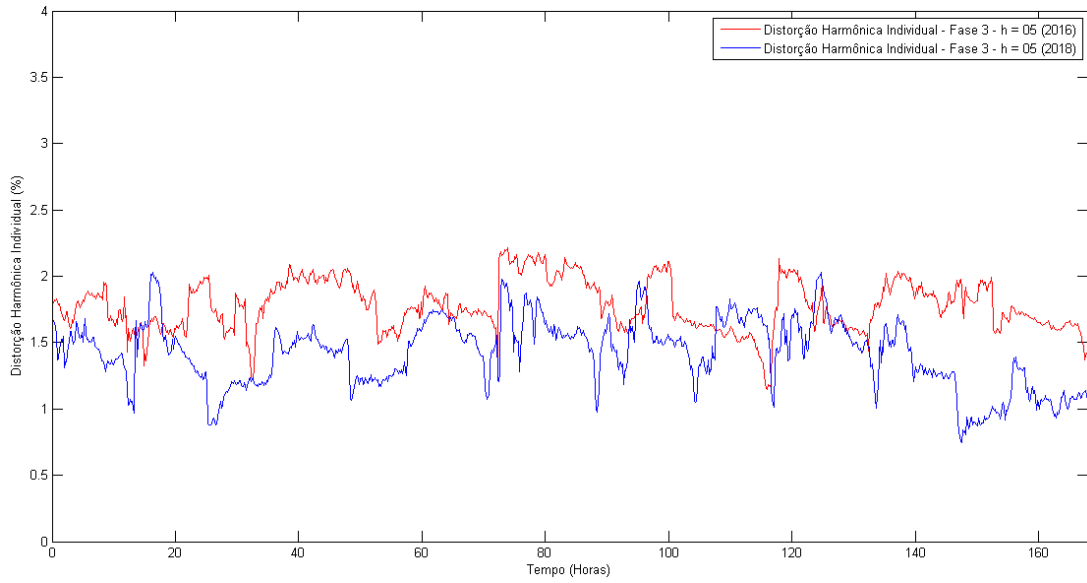


Figura 6.24 - Distorções harmônicas individuais de tensão de 5ª ordem da Fase 3 das medições de 2016 (vermelho) e 2018 (azul).

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

Através dos dados coletados, é possível concluir que a maioria dos parâmetros estudados (tensão em regime permanente, distorções harmônicas e fator de desequilíbrio de tensão) estão de acordo com os limites dispostos na PRODIST – Módulo 8. Apenas o parâmetro fator de potência que não apresentou valores adequados em função das normas atuais.

Também pôde-se concluir que a dimensão do sistema fotovoltaico instalado no IFMG – *Campus* Formiga não é suficiente para gerar grandes desvirtuamentos, visto que as distorções harmônicas analisadas antes e depois da instalação do sistema apresentaram valores semelhantes.

Por fim, os valores de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão apresentaram amplitudes que não exigem o emprego de medidas corretivas urgentes. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o cálculo do custo de bancos de capacitores para correção do fator de potência da instalação comparativamente ao valor pago pelo excesso de reativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento**. Estudos Avançados, vol. 12, n. 33, 1998. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141998000200002>. Acesso em 23 Maio 2018.
- [2] International Energy Agency – **IEA. Brazil: Balances for 2015**. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?year=2015&country=Brazil&product=Balances>>. Acesso em 23 Maio 2018.
- [3] Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: 2017.
- [4] Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR. **O crescimento da energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/o-crescimento-da-energia-solar-fotovoltaica.html>> Acesso em 23 Maio 2018.
- [5] Pinho, J. T.; Galdino, M. A. **Manual de engenharia para sistema fotovoltaicos**. CEPEL - CRESESB, Rio de Janeiro: 2014.
- [6] Vallêra, A. M.; Brito, M. C. **Meio século de história fotovoltaica**. *Gazeta de Física*, vol. 29, pp. 10-15, 2006.
- [7] Bernède, J. C. **Organic photovoltaic cells: history, principle and techniques**. *J. Chil. Chem. Soc.*, vol. 53, n. 3, pp. 1549-1564, 2008. Disponível em: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-97072008000300001&lng=es&nrm=iso>. Acessado em: 21 mai 2018.
- [8] Green, M. A. et al. **Solar cell efficiency tables (version 51)**. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 26, pp. 3-12, 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pip.2978>>. Acessado em: 21 mai 2018.
- [9] U.S. Energy Information Administration. **2016 Solar Photovoltaic Cell/Module Shipments Report**. Disponível em <https://www.eia.gov/renewable/annual/solar_photo/>. Acesso em 21 Maio 2018.
- [10] DIENSTMAN, G. **Energia solar: uma comparação de tecnologias**. Monografia, UFRGS, 2009. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/24308/000736300.pdf>>. Acesso em 21 Maio 2018.

[11] KIRK, A. P. **Solar Photovoltaic Cells: Photons to Electricity**. Academic Press, ed. 1, pp. 138, 2014.

[12] ELY, F.; SWART, J. W. **Energia solar fotovoltaica de terceira geração. O Setor Elétrico**, ed. 105, pp. 138-139, 2014. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/edicoes-eletronicas/>>. Acesso em 22 Maio 2018.

[13] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Normativa N° 493, de 5 de Junho de 2012: Estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI**. Junho, 2012.

[14] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Geração Distribuída**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd_fonte_detalhe.asp?Tipo=12>. Acesso em 22 Maio 2018.

[15] Canadian Solar Inc. **CS6K-270|275|280P Datasheet**. 2018. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/fileadmin/user_upload/downloads/datasheets/en/new/Canadian_Solar-Datasheet-CS6K-P_en.pdf>. Acesso em 23 Maio 2018.

[16] JinkoSolar Holding Co., Ltd. **JKM325PP-72(Plus) Datasheet**. 2018. Disponível em: <[https://www.jinkosolar.com/ftp/EN-Eagle+-325PP\(Plus\)-72_rev2015.pdf](https://www.jinkosolar.com/ftp/EN-Eagle+-325PP(Plus)-72_rev2015.pdf)>. Acesso em 23 Maio 2018.

[17] CARVALHO, D. M. S. **Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação à Rede Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61319/1/000148388.pdf>>. Acesso em 22 Maio 2018.

[18] IEEE Standard Association. **IEEE 1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. Disponível em: <http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547/1547_index.html>. Acesso em 23 Maio 2018.

[19] International Electrotechnical Commission – IEC. **IEC 61727:2004**. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/5736>>. Acesso em 23 Maio 2018.

[20] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015: Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de**

Distribuição – **PRODIST**. Novembro, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em 23 Maio 2018.

[21] Alam, M.; Gain, M. **Power Quality Problems and Solutions: An Overview**. *International Journal of Science and Research*. vol. 3. pp. 1024-1030, 2014.

[22] Dugan, R. C. et. al. **Electrical Power System Quality**. McGraw Hill. 2003. ISBN: 0-07-138622-X. p. 528.

[23] More, T. G.; Asabe, P. R.; Chawda, S. **Power Quality Issues and It's Mitigation Techniques**. *Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, pp. 170-177, 2014.

[24] Johnson, D. O.; Hassan, K. A. **Issues of Power Quality in Electrical Systems**. *International Journal of Energy and Power Engineerin*, vol. 5, n. 4, pp. 148-154, 2016.

[25] Martins, J. S. et al. **Qualidade de Energia Eléctrica**. *3º Congresso Luso-Moçanbicano de Engenharia – CLME'2003*, pp. 219-231, 2003. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/1503/1/CLME-03.pdf>>.

[26] Balasubramaniam, P. M.; Prabha, S. U. **Power Quality Issues, Solutions and Standards: A Technology Review**. *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 18, n. 4, pp. 371-380, 2015.

[27] Mehl, E. L. M. **Qualidade de Energia Eléctrica**. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36984290/qualidade-energia_1_.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1526323711&Signature=%2Bd3%2B4cihfNy57%2BIdCbeu1o1WSic%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DQuality.pdf>

[28] Pinto, P. H. S. S. *et al.* **Análise dos Impactos de Sistemas Fotovoltaicos em Redes de Distribuição**. *VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Eléctricos – SBSE*, Natal: 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/303945035_Analise_dos_Impactos_de_Sistemas_Fotovoltaicos_em_Redes_de_Distribuicao>.

[29] Phipps, J. K.; et al. **Power Quality and Harmonics Distortion on Distribution Systems**. *IEEE Rural Electric Power Conference*, pp. D1, 1991. Disponível em: <<http://www.neiengineering.com/wp-content/uploads/2012/05/Power-Quality-Harmonic-Distortion-on-Distribution-Systems.pdf>>.

[30] Pomilio, J. A.; Deckmann, S. M. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica.** DSE/FEEC/UNICAMP. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a6.pdf>>

[31] Pillay, P.; Manyage, M. **Definitions of Voltage Unbalance.** *IEEE Power Engineering Review*, May 2001, disponível em: <<http://users.encs.concordia.ca/~pillay/16.pdf>>.

[32] Nunes, E. A. F. **Análise dos Impactos Técnicos Resultantes da Intermitência de Geração de Sistemas Fotovoltaicos na Qualidade da Tensão.** Dissertação de Mestrado, PPGEEC-UFRN, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/24007/1/EvandroAilsonDeFreitasNunes_DISSERT.pdf>

[33] Chindriş, M.; *et al.* **Propagation of Unbalance in Electric Power Systems.** *9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation.* Barcelona, 2007, disponível em: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/40042135/0912f508a45d3614ee000000.pdf20151115-68247-5s3apj.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1526475758&Signature=vBP5raiBXDRcIykvfwTWD0MJj20%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPropagation_of_unbalance_in_electric_pow.pdf>

[34] Bollen, M. H. J.; Gu, I. Y. H. **Signal Processing of Power Quality Disturbances.** John Wiley & Sons, 2006.

[35] International Electrotechnical Commission – IEC. **SC 77A: EMC - Low frequency phenomena.** Disponível em: <http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:29:31135525228644::: FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1384,25#1>

[36] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Normativa N° 345: Aprova os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, e dá outras providências.** Dezembro, 2008.

[37] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 1 – Introdução, revisão 9.** Março, 2016.

[38] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **PRODIST.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>.

[39] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, revisão 10**. Janeiro, 2018.

[40] MINIPA. **Analisador de qualidade de energia ET-5051C/ET5061C – Manual de Instruções**. São Paulo. 136 p.