

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA ELETROTÉCNICA /
AUTOMAÇÃO

FELIPE CRESTANI ROSSETTO
RODRIGO ASSUNÇÃO VIALLE

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA NO PONTO DE CONEXÃO
DE INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS
À REDE ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

FELIPE CRESTANI ROSSETTO

RODRIGO ASSUNÇÃO VIALLE

**ANALISE DA QUALIDADE DE ENERGIA NO PONTO DE CONEXÃO
DE INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS
À REDE ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica e Automação – do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba, como requisito parcial para obtenção de aprovação.

Orientador: Prof.Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA

2015

Felipe Crestani Rossetto
Rodrigo Assunção Vialle

ANALISE DA QUALIDADE DE ENERGIA NO PONTO DE CONEXÃO DE INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 05 de Fevereiro de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Jair Urbanetz Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Gules, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jair Urbanetz Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

DEDICATORIA

Dedicamos este trabalho aos nossos pais,
que sempre nos apoiaram em nossas escolhas.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, um agradecimento especial a Deus, por tudo o que tens feito e o que vais fazer.

Este trabalho teve apoio de diversas pessoas que contribuíram das mais variadas maneiras para que o resultado final fosse alcançado e que sem as mesmas não seria possível chegar aos objetivos propostos neste trabalho.

Dentre essas pessoas podemos destacar todos os familiares com seu apoio incondicional nos momentos decisivos, onde dificuldades foram encontradas no caminho e que puderam ser enfrentadas juntamente com amigos e entes queridos.

Um agradecimento especial ao orientador e professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Jair Urbanetz Jr, que sempre se apresentou solícitamente para auxiliar na realização da pesquisa, que por meio de suas opiniões e conselhos nos permitiu enriquecer nosso conhecimento e o conteúdo do presente trabalho. Junto com o professor Luiz Peplow, pela disponibilização do analisador durante todo o período do trabalho e ao professor Eloy Casagrande, pelo acesso ao escritório verde durante todo o tempo do trabalho.

Além disso, gostaríamos de agradecer a Embrasul pelo suporte técnico e disponibilização do software utilizado.

Agradecimento também às pessoas que colaboraram indiretamente para a realização do trabalho, principalmente nos momentos sozinho onde se encontraram obstáculos no projeto e foi necessário aprender a resolvê-los.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

ROSSETTO, Felipe C.; VIALLE, Rodrigo A. Análise da Qualidade de Energia no ponto de conexão de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. 2015. 130 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica/Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

O presente trabalho aborda um estudo de análise de qualidade de energia no ponto de conexão de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, que foi realizado durante o período de desenvolvimento da pesquisa, localizado no Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba. Realizou-se um estudo aprofundado sobre o fenômeno elétrico presente em instalações conhecido como harmônicos. Primeiramente, foi estudado o comportamento e funcionamento de um painel fotovoltaico, sua forma construtiva e suas formas de conexão. Em seguida foi feito um estudo de qualidade de energia, com foco nos componentes harmônicos. O estudo se iniciou pela definição do fenômeno, sobre quais perspectivas podemos observá-lo e de que forma podemos estudá-lo. Compreender as causas de harmônicos, e seus efeitos nas instalações elétricas, e dessa maneira estudar sobre medições realizadas com equipamentos para determinar níveis de harmônicos nas instalações de forma precisa, para que seja possível compreender conceitos envolvendo o controle dos mesmos. Em seguida foi estudado o funcionamento dos inversores, seus componentes, forma de atuação e comportamento. Após, foram analisadas as normas IEC e IEEE envolvendo harmônicos e determinados os parâmetros para servir de referencial no momento em que for realizado o estudo de caso. Com todo o referencial teórico finalizado, foram realizadas as medições no escritório verde com os equipamentos e instrumentos necessários para aferir os resultados e compará-los com os valores teóricos indicados pelas normas. As medições realizadas foram analisadas minuciosamente para compreender a qualidade de energia de um painel fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Palavras-chave: Harmônicos; Eficiência Energética; Qualidade Energética, Sistema Fotovoltaicos.

ABSTRACT

ROSSETTO, Felipe C.; VIALLE, Rodrigo A. Analysis of Power Quality at the connection point of inverters of photovoltaic systems connected to the grid. 2015. 130 p. Work Completion of course (Graduation Degree in Electrical Industrial Engineering - Emphasis Electrotechnical / Automation) - Academic Department of Electrical, Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2015.

This study approaches a power quality analysis study at the connection point of inverters of photovoltaic systems connected to the grid, which was performed during the development period of the study, located in the Green Office (EV) of Paraná Federal Technological University (UTFPR), Curitiba campus. We conducted a detailed study of the electrical phenomena present in facilities known as harmonics. First, to study the behavior and operation of a photovoltaic panel, a constructive way and the means of connection. Then a power quality study was conducted, focusing on harmonic components. The study began with the definition of the phenomenon, about which perspective we can observe it and how we can study it. Understanding the causes of harmonics, and their effects on electrical installations, and thus study on measurements performed with equipment to determine harmonic levels in the form of facilities need to be able to understand concepts involving control of them. Then we studied the operation of inverters, components, form of performance and behavior. After the IEC and IEEE standards were analyzed involving harmonics and certain parameters to serve as a benchmark when it is carried out the case study. With all the finalized theoretical framework, were the measurements in green office with equipment and tools needed to measure the results and compare them with the theoretical values given by the standards. The measurements were analyzed thoroughly to understand the power quality of a photovoltaic panel connected to mains.

Keywords: Harmonics; Energy Efficiency; Quality Energy, Photovoltaic System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes da radiação solar no solo.....	21
Figura 2 - Esquema de bandas de energia para elétrons em um sólido.	23
Figura 3 - Esquema de um cristal de silício dopado com impurezas para produção de materiais.....	24
Figura 4 - Faixas de energia no espectro.....	24
Figura 5 - Dissipação de energia excedente.	25
Figura 6 - Comportamento dos raios solares em uma célula solar.	25
Figura 7 - Esquema de condução de uma junção do tipo-n com o tipo-p.	26
Figura 8 - Circuito equivalente de uma célula FV.....	26
Figura 9 - Átomos arranjados em um padrão regular.....	28
Figura 10 - Região dos cristais de silício separados por limites aonde a ligação é irregular.	29
Figura 11 - Estrutura atômica de um silício amorfo.	30
Figura 12 - esquemático para um sistema fotovoltaico isolado.....	31
Figura 13 - Diagrama esquemático para um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.....	32
Figura 14 - Símbolos dos componentes utilizados em inversores.....	33
Figura 15 - Tipos de inversores de acordo com o princípio de funcionamento.	34
Figura 16 - Inversor comutado pela rede.	35
Figura 17 - Tensão e corrente em um inversor comutado pela rede.....	36
Figura 18 - Inversor autocomutado.	37
Figura 19 - Tensão em um inversor autocomutado.....	37
Figura 20 - Curva característica da eficiência da conversão CC-CA.....	38
Figura 21 - a) Formas de onda de tensão em corrente durante comutação e condução, e b) potência dissipada durante comutação e condução.	39
Figura 22 - Diagrama do circuito de inversor com transformador de baixa frequência.	40
Figura 23 - Diagrama do circuito de inversor com transformador de alta frequência.....	41
Figura 24 - Diagrama do circuito de inversor sem transformador.....	42
Figura 25 - Relação entre ordem dos harmônicos e frequência.....	43
Figura 26 - Decomposição de uma onda em seus componentes harmônicos.	44

Figura 27 - Exemplo de carga não linear.	44
Figura 28 - Distorção da forma de onda da corrente.	45
Figura 29 - Retificador monofásico em ponte com filtro capacitivo.	46
Figura 30 - Formas de onda no retificador monofásico.	46
Figura 31 - Triângulo de Potências.	49
Figura 32 - Potências com fator de distorção.	50
Figura 33 - Medidor EMBRASUL RE6000.	61
Figura 34 - Especificações técnicas do RE6000.	62
Figura 35 - Parâmetros e precisão do RE6000.	63
Figura 36 - Parâmetros calculados.	64
Figura 37 - Vista posterior do Escritório Verde.	66
Figura 38 - Relação Corrente x Tensão do módulo KD210GX-LP em temperaturas distintas.	67
Figura 39 - Relação Corrente x Tensão do módulo KD210GX-LP para diferentes irradiâncias.	67
Figura 40 - Características elétricas do inversor P2000.	68
Figura 41 - Alicates EB100.	69
Figura 42 - Cabos de tensão do analisador RE6000.	69
Figura 43 – Disposição dos equipamentos e alertas.	70
Figura 44 - Irradiação anual em Curitiba no plano horizontal.	71
Figura 45 - Irradiação anual em Curitiba no plano inclinado.	72
Figura 46 - Parâmetros utilizados na medição.	73
Figura 47 - Energia gerada no período do teste.	73
Figura 48 - Potência ativa na fase A.	74
Figura 49 - Potência ativa na fase B.	74
Figura 50 - Potência ativa total.	75
Figura 51 - Tensões nas fases A e B.	75
Figura 52 - Tensão entre fases A e B.	76
Figura 53 - Corrente na fase A.	76
Figura 54 - Corrente na fase B.	77
Figura 55 - Taxas de distorção harmônica de tensão nas fases A e B.	77
Figura 56 - Taxas de distorção harmônica de corrente nas fases A e B.	78
Figura 57 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase A no dia 20/12.	78

Figura 58 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase B no dia 20/12.	79
Figura 59 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase A no dia 21/12.	79
Figura 60 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase B no dia 21/12.	80
Figura 61 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase A no dia 22/12.	80
Figura 62 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase B no dia 22/12.	81
Figura 63 - Harmônicos de corrente em A e B para corrente de 4,5A.....	82
Figura 64 - Formas de onda de tensão e corrente em A e B para DHTi de 6,8%.	83
Figura 65 - Harmônicos de corrente em A e B para corrente de 8,5A.....	83
Figura 66 - Formas de onda de tensão e corrente em A e B para DHTi de 3,4%.	84
Figura 67 - – Harmônicos de corrente em A para corrente de 0,85A.	84
Figura 68 - Harmônicos de corrente em B para corrente de 0,85A.	85
Figura 69 - Formas de onda de tensão e corrente em A e B para DHTi de 20%.	85
Figura 70 - Relação entre corrente e THDi na fase A.	86
Figura 71 - Relação entre corrente e THDi na fase B.	86
Figura 72 - Relação entre corrente e THDu na fase A.	87
Figura 73 - Relação entre corrente e THDu na fase B.	87
Figura 74 - Energia gerada diariamente pelo SFCR do EV.....	89
Figura 75 - Energia gerada pelo SFCR do EV durante a medição.....	89
Figura 76 – Potência gerada pelo SFCR do EV (Memória do inversor).	90
Figura 77 – Potência gerada pelo SFCR do EV (RE6000).....	90
Figura 78 - Potência gerada na fase A do SFCR do EV	91
Figura 79 - Potência gerada na fase B do SFCR do EV	91
Figura 80 – Tensões A, B e AB.	92
Figura 81 – Distribuição gráfica das tensões A e B.....	93
Figura 82 – Gráfico das tensões A e B com classificações.	95
Figura 83 – Corrente na fase A no período de 22/12 até 05/01.	95
Figura 84 – Corrente na fase B no período de 22/12 até 05/01.	96
Figura 85 – Correntes médias diárias no período de 22/12 até 05/01.....	96
Figura 86 – DHTu nas fases A e B no período de 22/12 até 05/01.	97
Figura 87 – Tensão e DHTu na fase A no período de 22/12 até 05/01.	97
Figura 88 – Tabela com os limites de DHI de tensão.	98
Figura 89 – Relatório Global de harmônicas do período de 22/12 até 05/01.	99
Figura 90 – Registros com maior distorção nas fases A e B, respectivamente.....	100

Figura 91 - Registro com maior número de componentes harmônicos nas fases A e B, respectivamente.....	100
Figura 92 – DHT de corrente na fase A no período de 22/12 até 05/01.....	101
Figura 93 - DHT de corrente na fase B no período de 22/12 até 05/01.....	102
Figura 94 – Corrente e DHTi na fase A no período de 22/12 até 05/01.	102
Figura 95 – Irradiância em Curitiba para o dia 01/01.	103
Figura 96 – Corrente e DHTi na fase A no dia 01/01.	103
Figura 97 – Harmônicos e forma de onda de corrente para DHTi de 146%.....	104
Figura 98 – Harmônicos na fase A no período de 22/12 a 05/01.	105
Figura 99 – Harmônicos de corrente na fase A no dia 01/01.	106
Figura 100 – Harmônicos e forma de onda para DHTi de 24,706%.....	107
Figura 101 - Harmônicos e forma de onda para DHTi de 3,898%.....	108
Figura 102 - Harmônicos e forma de onda para DHTi de 10,657%.....	108
Figura 103 – Corrente nas fases A e B nas 6 etapas do teste.	110
Figura 104 – Comportamento das tensões em relação a corrente.....	111
Figura 105 – DHTu nas fases A e B durante testes de desligamento.	111
Figura 106 – Harmônicos e formas de onda nas fases A e B.	112
Figura 107 – Transientes de tensão e corrente durante desligamento	113
Figura 108 - Transientes de tensão e corrente durante desligamento	114
Figura 109 - Transientes de tensão e corrente durante conexão do inversor.	115
Figura 110 - Transientes de tensão e corrente durante conexão do inversor.	115
Figura 111 – Corrente e distorção total de corrente na fase A.....	116
Figura 112 – Harmônicos de corrente de ordem ímpar na fase A relativos a fundamental.....	117
Figura 113 – Harmônicos de corrente de ordem ímpar na fase A em valor RMS. ...	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência máxima de células fotovoltaicas.....	27
Tabela 2 - Comparação entre inversores de SFCRs com e sem transformadores. ...	42
Tabela 3 - Limites de harmônicos de corrente para equipamentos pertencentes à classe A.....	54
Tabela 4 - Limites de harmônicos de corrente para equipamentos pertencentes à classe B.....	55
Tabela 5 - Limites de harmônicos de corrente para equipamentos pertencentes à classe C.....	55
Tabela 6 - Limites de harmônicos de corrente para equipamentos pertencentes à classe D.....	56
Tabela 7 - Limites de correntes harmônicas admissíveis para estágio 1 da Norma IEC 61000 3-4.....	56
Tabela 8 - Limites de DHT% e DHI% para estágio 2 da Norma IEC 61000 3-4.....	57
Tabela 9 - Limites de distorção na corrente.	58
Tabela 10 - Limites de harmônicos de corrente para tensões de 120 v à 60 kV em porcentagem.	59
Tabela 11 - Limites de harmônicos de corrente para tensões de 61,009 kV à 161 kV em porcentagem.	59
Tabela 12 - Limites de harmônicos de corrente para tensões maiores que 161 kV em porcentagem.	59
Tabela 13 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	60
Tabela 14 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).....	60
Tabela 15 - Energia gerada diariamente pelo SFCR do EV.....	88
Tabela 16 - Dados das tensões A e B.....	93
Tabela 17 - Faixas de variação para classificação das tensões.....	94
Tabela 18 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127).....	94
Tabela 19 – Limites para DHT de tensão.....	98
Tabela 20 - Componentes harmônicos para DHTi de 24,706%.	107

Tabela 21 - Componentes harmônicos para DHTi de 3,898%.	108
Tabela 22 – Componentes harmônicos para DHTi de 10,657%.	109

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

a-Si – Silício Amorfo;

CA – Corrente Alternada;

CC – Corrente Contínua

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito;

c-Si – Silício Cristalino;

EV – Escritório Verde

FFT - Fast Fourier Transformation (Transformada Rápida de Fourier);

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção;

FIT – Feed in tariff (Tarifas de Alimentação);

FV – Fotovoltaico;

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor de porta isolada bipolar)

m-Si - Silício Monocristalino

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 TEMA.....	17
1.1.1 <i>Delimitação do Tema</i>	18
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS	18
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	18
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	19
1.4 JUSTIFICATIVA.....	19
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS	21
2.1.1 <i>Radiação Solar</i>	21
2.1.2 <i>Efeito Fotovoltaico</i>	22
2.1.2.1 <i>Modelo de bandas</i>	22
2.1.2.2 <i>Dopagem</i>	23
2.1.4 <i>Respostas a Luz</i>	24
2.1.3.1 <i>Mono Cristalinos (m-Si)</i>	27
2.1.3.2 <i>Policristalinos (p-Si)</i>	28
2.1.3.2 <i>Silícios Amorfos (a-Si:H)</i>	29
2.1.5 <i>Topologia Dos Sistemas FV</i>	30
2.1.6.1 <i>Sistema isolado</i>	30
2.1.6.2 <i>Sistema conectado à rede</i>	31
2.2 INVERSORES CONECTADOS A REDE.....	32
2.2.1 <i>Tipos de inversores</i>	34
2.2.2 <i>Inversores comutados pela rede</i>	34
2.2.3 <i>Inversores autocomutados</i>	36
2.2.4 <i>Características Dos Inversores</i>	38
2.2.4.1 <i>Eficiência</i>	38
2.2.4.2 <i>Segurança</i>	40

2.2.5	<i>Inversores Com Transformadores de Baixa Frequência</i>	40
2.2.6	<i>Inversores Com Transformadores de Alta Frequência</i>	41
2.2.7	<i>Inversores Sem Transformadores</i>	41
2.3	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	43
2.3.1	<i>Harmônicos Nos Sistemas Elétricos</i>	43
2.3.2	<i>Séries De Fourier</i>	50
2.4	NORMAS E LEGISLAÇÕES EM VIGOR	52
2.5	MEDIDOR	61
3.0	MEDIÇÕES DE QUALIDADE DE ENERGIA	65
3.1	METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES	68
3.1.1	<i>Transitório</i>	70
3.1.2	<i>Contínua</i>	71
3.1.3	<i>Inversor Desligado</i>	71
3.2	MEDIÇÕES	72
3.2.1	CONCLUSÕES PARCIAIS	86
3.2.2	MEDIÇÃO POR DUAS SEMANAS	88
3.2.3	INVERSOR DESLIGADO	109
3.2.3.1	CONCLUSÕES PARCIAIS	112
3.2.4	TRANSIENTES	112
4.	CONCLUSÃO	118
	REFERÊNCIAS	120
	ANEXOS	123

1. INTRODUÇÃO

O uso intensivo de energia produzida pela queima de combustíveis fósseis pela sociedade moderna tem sido apontado como fator determinante para a elevação de temperatura do planeta e conseqüentemente, pelas alterações na natureza.

A conscientização de um ambiente sustentável e a garantia dessa sustentabilidade quer sejam de caráter ambiental, econômico ou físico, levaram a que nos últimos anos, vários países realizassem pesquisas com o objetivo de reduzir as emissões de CO₂ e de aumentar a potência instalada em fontes de energia renovável. (URBANETZ, 2010).

Dentro da categoria de fontes renováveis, encontra-se a energia solar, que utiliza células fotovoltaicas para a conversão da radiação solar em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. Este sistema é conhecido por sistema fotovoltaico.

Os sistemas fotovoltaicos quando conectados à rede elétrica pública, utilizam a tensão elétrica da rede como referência para gerar a sua forma de onda (senoidal, com mesma amplitude, frequência e em fase). Uma vez que a energia disponibilizada pela rede elétrica serve de referência, padrões mínimos de qualidade de energia são requeridos pelo sistema de geração fotovoltaica, para permitir a sua conexão em paralelo ao sistema principal. A falta da tensão de referência, ou anormalidades presentes nessa tensão, pode provocar o desligamento do inversor do sistema fotovoltaico, impedindo a geração por meio dessa tecnologia.

1.1 TEMA

A partir da resolução 482-2012 da ANEEL que:

“Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dentre outras providências”.

A utilização de sistemas fotovoltaicos diretamente ligados à rede elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras, atuando como microgeradores alternativos e renováveis, passa a ser uma opção no sistema elétrico.

Com essa resolução, os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica passam a ficar menos sobre carregados. Pois o consumidor passa a

gerar uma parcela da energia que ele mesmo consome. Isso graças a módulos fotovoltaicos que transformam a energia solar em energia elétrica. Com o uso desses módulos, a necessidade de que a energia gerada esteja a quilômetros de onde será consumida muda. A disponibilidade de energia aumenta para o consumidor, com a instalação de painéis no entorno das edificações.

1.1.1 Delimitação do Tema

Analisar a interação entre os parâmetros de qualidade da energia elétrica delimitados pelos padrões nacionais e a qualidade real obtida pelos inversores dos sistemas fotovoltaicos.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

Em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, anomalias na qualidade de energia da rede elétrica pública podem fazer com que o inversor rejeite a rede, impedindo o funcionamento do mesmo.

É de vital importância a busca pela qualidade de energia do sistema ao momento que esse passa a ser operado, principalmente em ambiente industrial, para que se possa evitar que grandes investimentos sejam realizados com os sistemas geradores fotovoltaicos, e que os mesmos apresentem problemas no momento em que forem conectados à rede elétrica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo de uma instalação que utiliza de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, analisando a qualidade de energia, o fluxo das correntes harmônicas nos principais circuitos, medir as distorções de tensão e comparar com as normas de qualidade de energia presentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo sobre os conceitos de harmônicos com a análise da literatura técnica adequada.
- Estudar as normas de referência de qualidade de energia.
- Estudar os parâmetros de referência de inversores conectados a sistemas fotovoltaicos
- Identificar os principais problemas que a distorção harmônica causa no conjunto dos componentes de uma instalação elétrica.
- Levantar os parâmetros de qualidade de energia.
- Realizar ensaios na saída de inversores visando identificar a qualidade de energia.
- Avaliar os resultados dos ensaios.

1.4 JUSTIFICATIVA

Os painéis solares fotovoltaicos possibilitam converter energia solar diretamente em elétrica. Com uma pequena fração do total da energia solar diária incidente sobre a terra transformada diretamente em energia elétrica, os problemas energéticos para os quais a humanidade caminha poderiam ser em grande parte amenizados. (SIMOES FRADE, 2009)

A energia solar fotovoltaica é cada vez mais utilizada pelos vários benefícios como, baixo impacto ambiental, pelo fato de não possuir peças móveis, é silenciosa, apresenta baixo índice de manutenção, geração imediatamente após instalação, possibilidade de reinstalação em outra região, fácil ampliação ou redução da quantidade de módulos, dentre outros fatores.

Atualmente, no mundo, a aplicação que mais cresce de sistemas fotovoltaicos é a sua utilização em sistemas conectados à rede elétrica.

Este trabalho tem como objetivo abordar a interação entre os inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) e a qualidade da energia elétrica. A presença de harmônicos, injetados pelos inversores em forma de onda de corrente, que deveriam ser puramente senoidal. Dependendo do tipo de inversor e da potência processada, a taxa de distorção harmônica se altera.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa será desenvolvida através de análise de referências bibliográficas, artigos, periódicos, catálogos, normas técnicas, sítios da internet e através de pesquisa diretamente no campo.

Inicialmente, será realizada uma pesquisa literária referente à SFCR, inversores, harmônicos, e quais os parâmetros estipulados em normas de qualidade de energia, nacionais e internacionais.

Posteriormente, será realizado um ensaio de campo em um SFCR na região de Curitiba, onde dados referentes à qualidade de energia serão obtidos através de medições. Para a obtenção destes dados será necessária a utilização de ferramentas computacionais e de equipamentos eletrônicos que sejam capazes de identificar variações na corrente, tensão e frequência.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será organizado em quatro capítulos:

- O capítulo 1 contém a introdução ao tema, abordagem à problemática pertinente e a justificativa acerca da relevância do tema. Também serão abordados os objetivos a serem atingidos e os métodos que serão usados para a aquisição dos resultados.
- O capítulo 2 abrange uma pesquisa literária envolvendo os conceitos e funcionamento de inversores, módulos fotovoltaicos conectados à rede elétrica e as exigências de qualidade de energia segundo normas nacionais.
- Os capítulo 3 mostra os ensaios realizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica na região de Curitiba, relatando todos os dados adquiridos, como taxa de distorção harmônica, fluxo de corrente e nível de tensão, dentre outros fatores para analisar a qualidade do sistema.
- O capítulo 4 apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros, visando a continuidade dos estudos realizados. Posteriormente, estão dispostas as referências e anexos, se necessário.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

2.1.1 Radiação Solar

A terra recebe anualmente $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia solar, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia nesse período, confirmando o fato de que a energia solar é de suma importância para a vida na Terra e como uma fonte inesgotável de energia. O planeta possui uma inclinação em $23,5^\circ$ em relação ao plano equatorial, responsável pela variação da elevação do Sol no decorrer dos dias (CRESESB, 1999).

A radiação solar é responsável pela geração da energia solar, por meio de painéis fotovoltaicos. Maxwell definiu a luz como sendo uma onda eletromagnética com diferentes comprimentos de onda. Para Einstein, a luz é formada por partículas discretas chamadas de fótons. Logo o espectro solar é tratado como onda e partícula. (WENHAM, 2007).

Esta dualidade é representada pela equação (1) a seguir:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Sendo E a energia fornecida pelos fótons, h a constante de Planck, c a velocidade da luz no vácuo e λ o comprimento de onda.

A radiação que atinge a superfície terrestre é dividida em 3 componentes: direta, difusa e albedo (quando a superfície receptora estiver inclinada com relação à horizontal como solo, vegetação, obstáculos, etc.) (LUQUE e HEGEDUS, 2003).

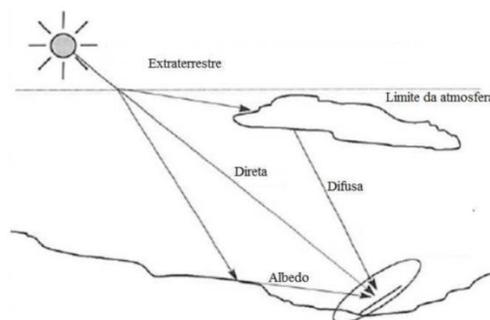


Figura 1 - Componentes da radiação solar no solo.

Fonte: Silveira (2013).

2.1.2 Efeito Fotovoltaico

Energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão da luz solar em energia elétrica, esse efeito é chamado de efeito fotovoltaico. Ele ocorre com o aparecimento de uma diferença de potencial em um material semicondutor após absorver luz solar diretamente. Este fenômeno foi inicialmente observado por Alexandre-Edmond Becquerel (SILVEIRA, 2013).

A principal unidade que realiza esse processo de absorção e conversão é chamada de célula fotovoltaica. Elas podem ser utilizadas de forma isolada, como em calculadoras e relógios, ou agrupadas como em módulos e painéis fotovoltaicos.

Para a produção de células fotovoltaicas, tem-se diversos tipos de semicondutores que podem ser utilizados, esses são: silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou a-Si); microcristalino (μ -Si); policristalino (p-Si); o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre (gálio) e índio (CuInSe₂ ou CIS e Cu(InGa)Se₂ ou CIGS) (RUTHER, 2004).

2.1.2.1 Modelo de bandas

De acordo com os níveis de energia absorvido pelos semicondutores, eles podem se comportar como materiais isolantes ou condutores. As características elétricas desses materiais são explicadas através dos modelos de bandas ou de ligações.

O modelo de ligações está relacionado com as ligações covalentes que ligam os átomos. A ligação covalente se encontra nos átomos que não possuem banda de valência completa, tendo assim um compartilhamento de elétrons. Sem energia estes materiais permanecem com a característica isolante. Com o fornecimento de uma energia externa, ocorre a quebra de algumas ligações, o que proporciona a ocorrência de elétrons livres e a formação de lacunas. O fluxo de elétrons através dessas lacunas é de fato a condução de corrente elétrica (SILVEIRA, 2013).

O modelo de banda descreve o comportamento de um semicondutor em termos de níveis de energia entre bandas de valência e condução.

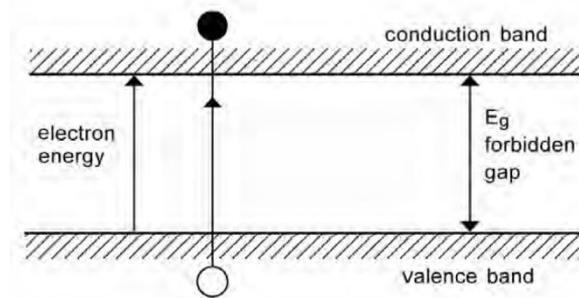


Figura 2 - Esquema de bandas de energia para elétrons em um sólido.

Fonte: Wenham (2007).

Os elétrons presentes na banda de condução são livres, transformando o material em condutor. A região entre as duas bandas, chamada de zona proibida, corresponde ao mínimo de energia (*gap*) necessário para mover um elétron de uma ligação covalente até uma banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência.

2.1.2.2 Dopagem

Para que o comportamento de condução ocorra é realizado um processo conhecido como dopagem. Com este processo é possível alterar a balança de elétrons em um cristal de silício com a inserção de impurezas, para que o desbalanceamento seja maior, dando liberdade ao acréscimo de um átomo de elétron a mais. Átomos com mais de um elétron de valência que o semiconductor são usados para produzir materiais do tipo-n. Átomos com menos elétrons de valência resultam em materiais do tipo-p.

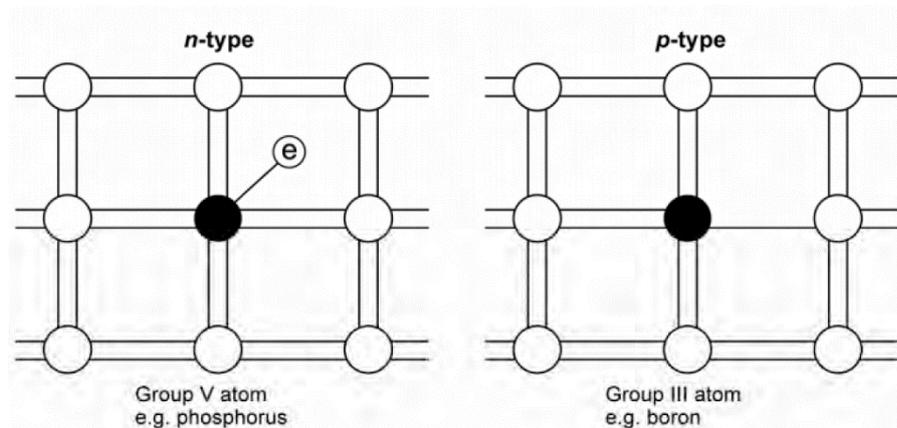


Figura 3 - Esquema de um cristal de silício dopado com impurezas para produção de materiais.
Fonte: Wenham (2007).

2.1.4 Respostas a Luz

De acordo com Silveira (2013), diferentes comprimentos de onda resultarão em diferentes níveis de energia. Caso a energia fornecida pelos fótons seja inferior à energia de *gap*, a interação dos fótons com o material semiconductor será fraca. Se a energia for igual a energia de *gap*, haverá a condução de corrente já que elétrons passarão da banda de Valência para a banda de condução. Caso a energia fornecida pelos fótons seja superior à de *gap*, a energia excedente será dissipada na forma de calor.

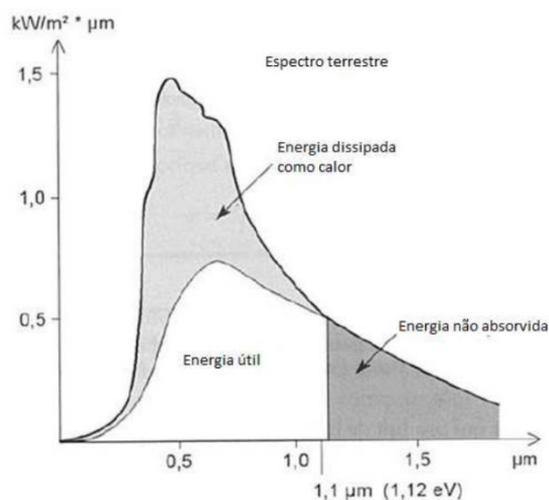


Figura 4 - Faixas de energia no espectro.
Fonte: Silveira (2013).

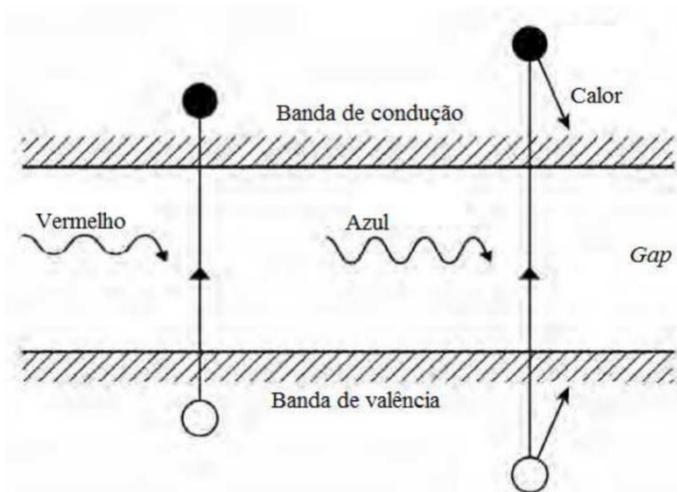


Figura 5 - Dissipação de energia excedente.

Fonte: Silveira (2013).

pode-se observar que a luz vermelha não dissipa calor, logo a azul sim.

Uma célula de silício é um diodo formado pela junção de silícios do tipo-p com o tipo-n. A luz solar em contato com esse tipo de célula pode se comportar em diferentes maneiras, como mostra a Figura 6:

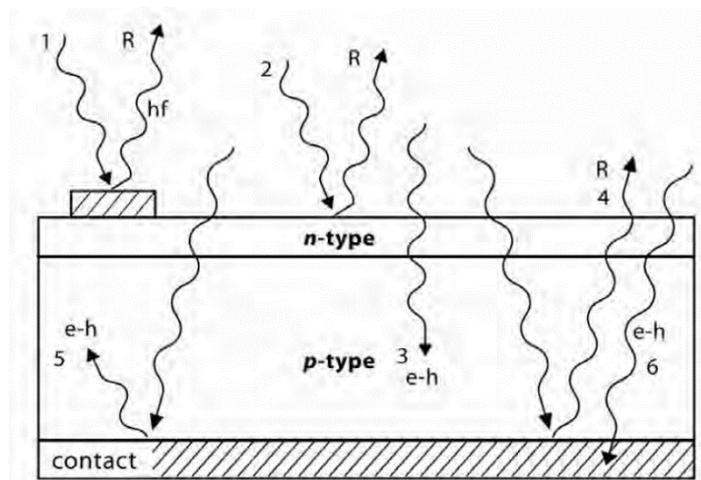


Figura 6 - Comportamento dos raios solares em uma célula solar.

Fonte: Wenham (2007).

Sendo: (1) Reflexão e absorção no topo. (2) Reflexão na superfície. (3) Absorção desejada. (4) Reflexão no fundo da célula. (5) Absorção pós reflexão. (6) Absorção em contato com o fundo.

Utilizando dos dois materiais é possível combina-los de modo a definir o sentido da corrente elétrica.

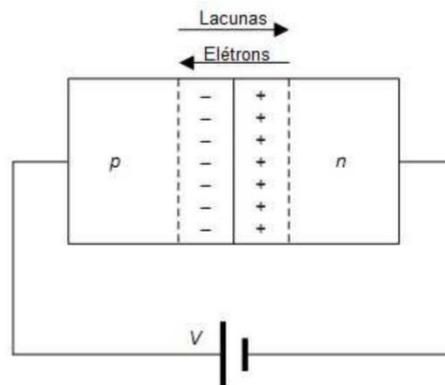


Figura 7 - Esquema de condução de uma junção do tipo-n com o tipo-p.
Fonte: Silveira (2013).

Em uma célula fotovoltaica, a energia necessária para a condução será proveniente da energia via radiação solar. Essa gera um campo elétrico nas junções p-n que força os elétrons se movimentarem do lado n para o lado p. A Figura 8 representa um circuito elétrico equivalente de uma célula.

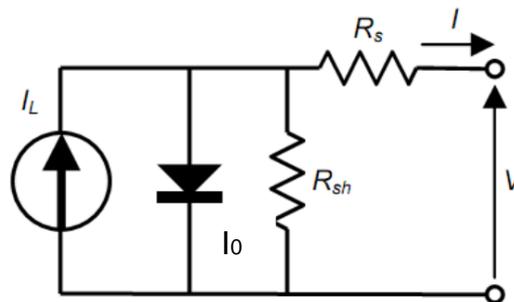


Figura 8 - Circuito equivalente de uma célula FV.
Fonte: Wenham (2007).

A resistência em paralelo (R_{sh}) representa as imperfeições da junção P-N e a resistência em série (R_s) é atribuída as resistências de contato. Sendo I_L é a corrente gerada pela célula, I a corrente da célula, V a tensão de saída e I_0 a corrente de polarização do diodo do modelo. Com base neste circuito é possível escrever a equação característica de uma célula fotovoltaica (Wenham, 2007).

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V + IR_S)}{kT} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_S}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

onde q é a carga elementar do elétron, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura da célula.

2.1.3 Silício Cristalino

É o mais utilizado no mercado fotovoltaico, devido a sua robustez e confiabilidade. O silício é o semicondutor mais abundante na crosta terrestre podendo ser utilizado em tecnologias fotovoltaicas em suas ramificações: monocristalino, policristalino, microcristalino e amorfo. A estrutura da célula altera diretamente a sua eficiência, com os dados fornecidos em Green et al (2012), as células de silício apresentam os seguintes valores máximos, a uma temperatura ambiente de 25°C, massa de ar de 1,5 e irradiância de 1000W/m².

Tabela 1 – Eficiência máxima de células fotovoltaicas.

	Eficiência
Monocristalino	25%
Multicristalino	20,3%
Amorfo	10,1%

Fonte: Green (2012).

2.1.3.1 Mono Cristalinos (m-Si)

A mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e a que apresenta maior escala de produção a nível comercial, o c-Si é extremamente robusto e confiável.

São formados por um único cristal, o que aumenta os ganhos do efeito fotovoltaico. O processo de produção é mais caro devido ao lento processo de manufatura, porém é o mais utilizado no mercado justificado pela sua eficiência (CASTRO, 2002).

Os silícios monocristalinos possuem uma estrutura atômica ordenada. Cada átomo se encontra em uma posição pré-determinada, como mostra a figura abaixo:

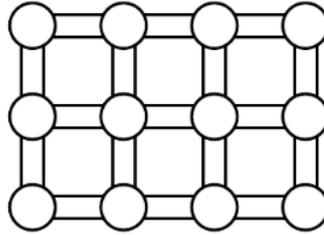


Figura 9 - Átomos arranjados em um padrão regular.

Fonte: Wenham (2007).

O monocristal é “crescido” a partir de um banho de silício fundido de alta pureza (Si = 99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidade de crescimento do cristal da ordem de cm/hora. O tempo necessário para que o módulo gere energia equivalente à utilizada em sua fabricação (*pay-back time*), é superior a 2 anos, dependendo do nível de radiação local. Outras etapas para o crescimento do monocristal envolvem a usinagem do tarugo; corte de lâminas por fios ou serras diamantadas; lapidação, ataque químico e polimento (gerando uma perda da ordem de 50% do tarugo original); processos de difusão e dopagem, deposição da máscara condutora da eletricidade gerada e finalmente a interconexão de células em série para obtenção do módulo. (RUTHER, 2004)

2.1.3.2 Policristalinos (p-Si)

O p-Si tem crescido sua participação no mercado fotovoltaico mundial, e em 2003 mais de 50% da produção mundial utilizavam o p-Si (MAYCOCK, 2003). Os policristais podem ser produzidos sob forma de tiras ou fitas (*ribbon*), a partir de um banho líquido de silício e neste processo fica dispensado o fatiamento em lâminas, uma vez que as tiras de p-Si são produzidas com a espessura final da célula (RUTHER, 2004).

Formado pela junção de pequenos cristais. A sua eficiência é um pouco inferior à do monocristalino devido a não uniformidade do cristal (CASTRO, 2002).

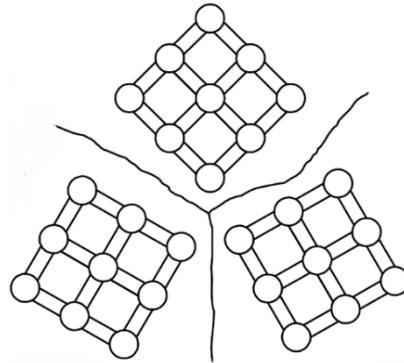


Figura 10 - Região dos cristais de silício separados por limites aonde a ligação é irregular.

Fonte: Wenham (2007).

O material de partida é o mesmo que para o m-Si, que é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta em um bloco com grande quantidade de cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica.

As técnicas de produção para os policristalinos ou multicristalinos são menos críticos e mais baratos comparados aos monocristalinos. Os limites dos cristais reduzem a performance da célula por bloqueio de fluxo, permitindo níveis de energias extras no *gap*, logo provendo recombinações eficientes e caminhos para o fluxo de corrente sobre a junção p-n. Para evitar perdas significativas por recombinação, cristais na escala de milímetros são necessários. Isto permite que o cristal se estenda da frente para o fundo da célula, diminuindo a resistência (WENHAM, 2007).

2.1.3.2 Silícios Amorfos (a-Si:H)

Este tipo de material chega a ser menor que $1\mu\text{m}$, considerado como filme fino, e muito utilizado em pequenos produtos como calculadoras e relógios. Silícios amorfos são ainda mais baratos que os multicristalinos. Possuem estruturas atômicas irregulares levando a falta de ligações na qual podem ser compensadas por átomos de hidrogênio. Esses resultam em níveis de energia extra no *gap*, tornando impossível a dopagem do semiconductor quando puro. A incorporação de 5-10% de átomos de hidrogênio em silícios amorfos, saturam as faltas de ligações (*dangling*

bond), e aumentam a qualidade do material. Também aumentam a banda de *gap* de 1.1eV para 1.7eV (WENHAM, 2007).

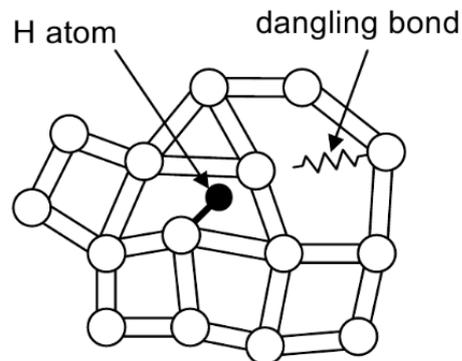


Figura 11 - Estrutura atômica de um silício amorfo.

Fonte: Wenham (2007).

Os processos de produção de a-Si ocorrem em temperaturas baixas (<300°C), em processos a plasma, o que possibilita que estes filmes finos sejam depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos. Por este motivo que existem alguns módulos que são semitransparentes, leves, inquebráveis, flexíveis, com curvas, abrangendo a sua utilização em aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas em instalações.

O *energy pay-back time* para o a-Si é menor que o do c-Si, chegando em torno de um ano. Diferente dos outros, o silício amorfo não sofre redução de potência com o aumento da temperatura de operação. (RUTHER, 2004).

2.1.5 Topologia Dos Sistemas FV

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em dois principais tipos: os isolados e os conectados à rede elétrica. Cada um destes tipos pode ser dividido em sistemas puros ou híbridos e com uso de acumuladores ou não.

2.1.6.1 Sistema isolado

São sistemas não conectados aos grandes sistemas de distribuição, possuem acumuladores para quando o consumo de energia ocorra no momento de baixa ou para momento sem radiação solar, tendo assim uma bateria ou um banco de

baterias. Estes sistemas podem ser de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA) através do uso de um inversor.

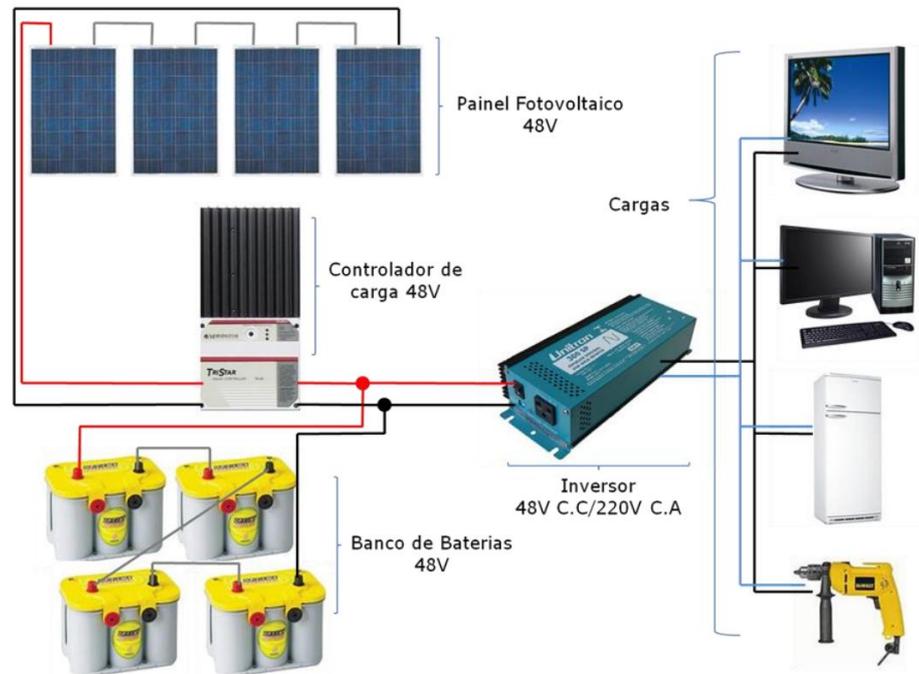


Figura 12 - esquemático para um sistema fotovoltaico isolado.

Fonte: Urbanetz (2014).

Os componentes dos sistemas isolados são: gerador fotovoltaico (um ou vários módulos fotovoltaicos, dispostos em ligações série e/ou paralelo); controlador de carga; acumulador; inversor e cargas.

2.1.6.2 Sistema conectado à rede

Operam com conexão à rede elétrica pública, logo a energia gerada é injetada na rede elétrica, não necessitando de acumuladores. Na falta da rede elétrica por motivos de manutenção ou falha, o sistema desconecta automaticamente da rede, deixando de fornecer energia.

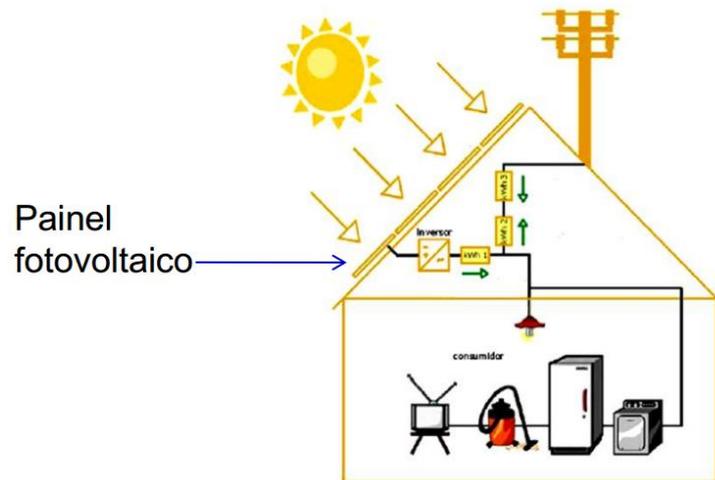


Figura 13 - Diagrama esquemático para um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.
Fonte: Urbanetz (2014).

Componentes dos SFCR: gerador fotovoltaico (vários módulos fotovoltaicos dispostos em série e/ou paralelo); caixa de junção (equipada com dispositivos de proteção e interruptor de corte principal CC); cabos CA-CC; inversor; proteção e medição.

2.2 INVERSORES CONECTADOS A REDE

De acordo com Ruther (2004), módulos solares fotovoltaicos geram energia elétrica em corrente contínua (CC). Desta maneira, é necessária a conversão CC-CA para que se obtenha tensão em corrente alternada seguindo as especificações (harmônicos, frequência, forma de onda, etc.) necessárias para seguir as normas impostas pela agência regulamentadora, permitindo assim a conexão com a rede elétrica pública.

O equipamento utilizado para esta conversão é o inversor, mais genericamente conhecido como “conversor CC-CA”. Na literatura, o mesmo também é mencionado como PCU – *Power Conditioning Unit*, ou Unidade Condicionadora de Potência em português.

Como princípio de funcionamento, os inversores utilizam um mecanismo de chaveamento que tem como função alternar o fluxo de corrente entre as direções positiva e negativa. Para isso, são utilizadas chaves semicondutoras, sendo as mais

usualmente usadas: SCRs, TRIACs e GTOs,. E os transistors, BJT, MOSFET e IGBTs. A figura 14 ilustra estes componentes utilizados nos inversores.

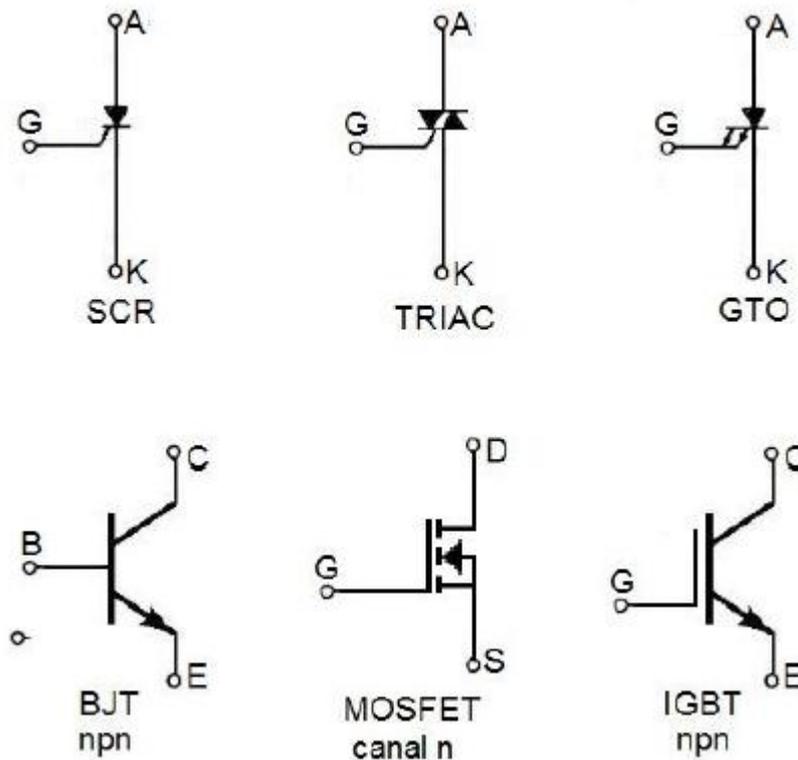


Figura 14 - Símbolos dos componentes utilizados em inversores.

Fonte: CRESESB (2014).

Em condição ideal, estas chaves semicondutoras teriam as características abaixo:

- Bloqueio de altas tensões diretas e reversas;
- Capacidade de conduzir correntes de valor elevado;
- Chaveamento instantâneo;
- Baixa potência necessária para o controle.

Segundo Villalva (2012), nos os inversores CC-CA conectados a rede em sistemas fotovoltaicos funcionam como fontes de corrente e não tem capacidade de fornecer tensão aos consumidores.

2.2.1 Tipos de inversores

Existem dois tipos de inversores: os comutados pela rede (comutação natural) e os autocomutados (comutação forçada). A Figura 15 mostra a classificação dos inversores de acordo com o princípio de operação.

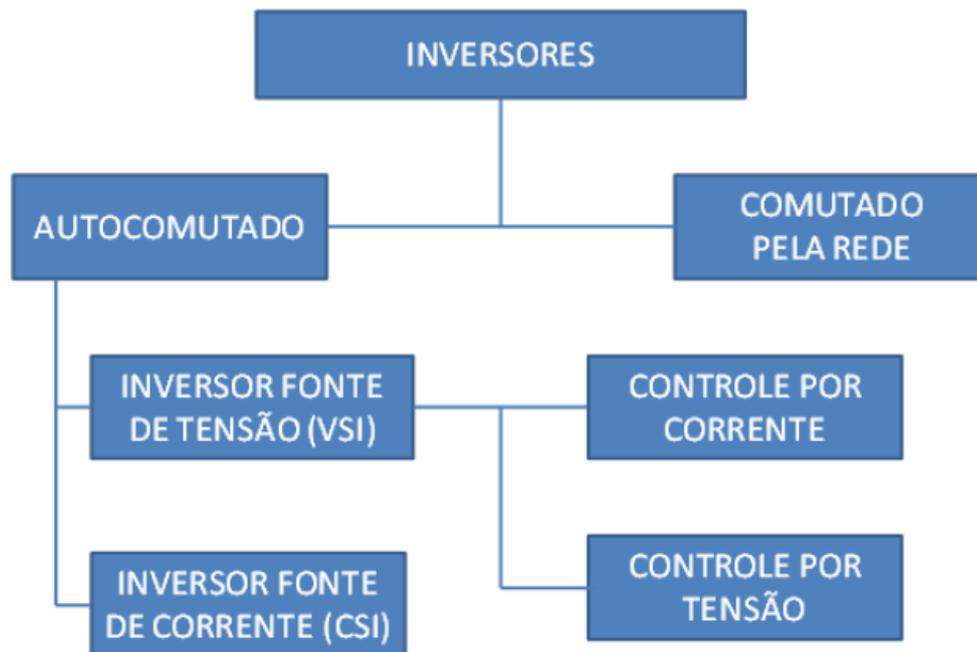


Figura 15 - Tipos de inversores de acordo com o princípio de funcionamento.

Fonte: CRESESB (2014).

Segundo Ruther (2004), nos inversores comutados pela rede elétrica, o sinal da rede é utilizado para sincronizar o inversor com a rede. Para os inversores auto-comutados, existe um circuito eletrônico no inversor que controla e sincroniza o sinal do inversor ao sinal da rede.

As tecnologias estão possibilitando que o mesmo inversor possa operar nos dois sentidos, isolado ou sincronizado à rede (CRESESB, 1999)

2.2.2 Inversores comutados pela rede

Os inversores comutados pela rede são os inversores constituídos por tiristores (SCRs, TRIACs) como seus elementos semicondutores de chaveamento. Nestes dispositivos comutados pela rede, uma vez que os semicondutores estão em

condução, eles só irão a fase de bloqueio quando a corrente circulando por eles for menor a corrente de manutenção da condução, ou durante uma eventual inversão da polaridade entre cátodo e ânodo. (CRESESB, 2014)

De acordo com Macêdo (2004), os inversores comutados pela rede são projetados para operar apenas durante o funcionamento da rede elétrica, garantindo assim o desligamento e a desconexão segura do inversor, evitando-se também o seu funcionamento de maneira isolada.

Estes inversores, embora de construção robusta e simples, apresentam baixa qualidade de tensão e de corrente de saída, devido a sua alta quantidade de distorções harmônicas. Por causa destes harmônicos, faz-se necessária a utilização de filtros complexos. (CRESESB, 2014)

A Figura 16 mostra um inversor comutado pela rede, e a Figura 17 mostra as curvas de corrente e tensão de saída.

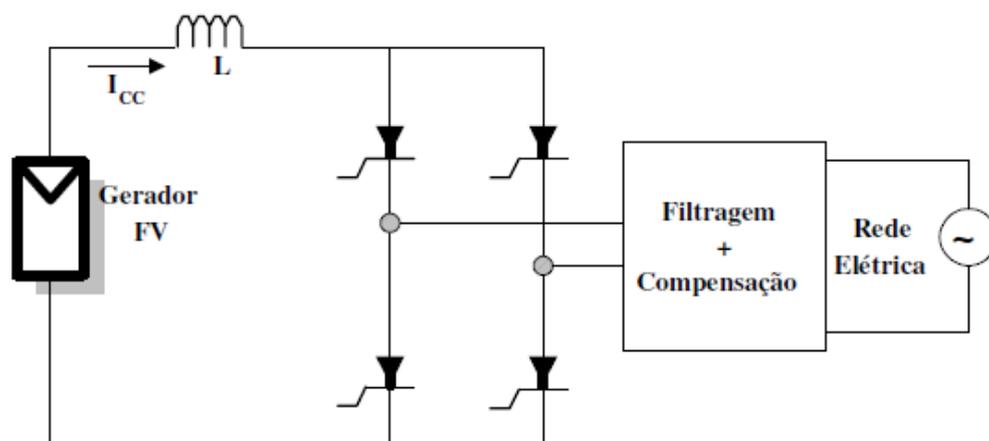


Figura 16 - Inversor comutado pela rede.

Fonte: Macêdo (2004).

current and voltage curves:

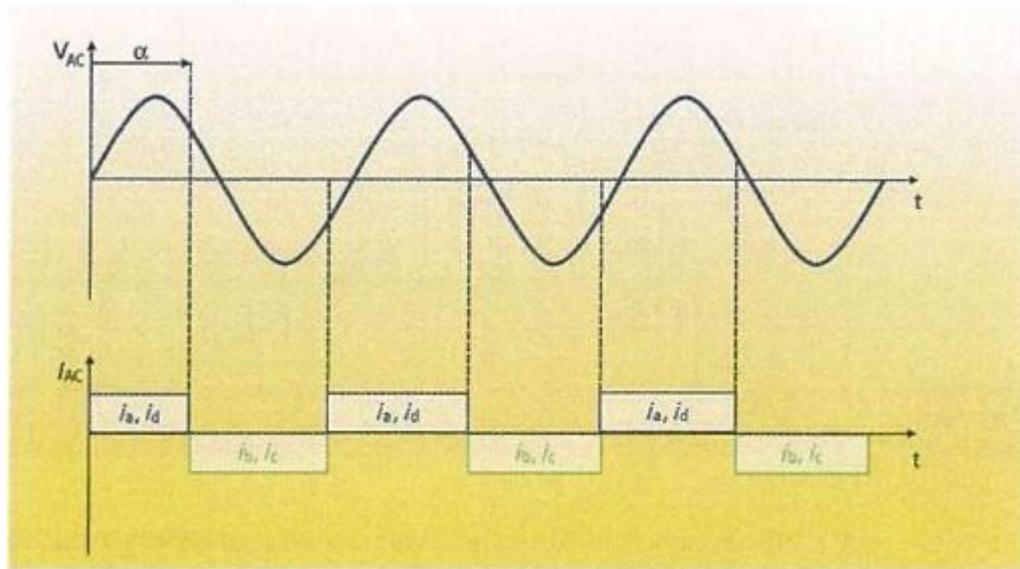


Figura 17 - Tensão e corrente em um inversor comutado pela rede.

Fonte: Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie (2008).

Segundo Macêdo (2004), os seguintes fatores contribuem para a distorção da forma de onda da corrente de saída do inversor:

- Baixa impedância de saída;
- Alta capacitância de saída;
- O sinal de referência é igual a tensão da rede.

E para diminuir a distorção de corrente na saída, as seguintes medidas podem ser utilizadas:

- O sinal de referência deve ser processado de modo que se obtenha uma senóide;
- Impedância de saída deve ser elevada;
- Utilização de uma baixa capacitância na saída, com a função de filtro.

2.2.3 Inversores autocomutados

Nos inversores autocomutados, os elementos que realizam o chaveamento são semicondutores que permitem a mudança entre condução e bloqueio em qualquer instante do ciclo, de acordo com um terminal de controle. Estes inversores podem ser do tipo fonte de corrente ou fonte de tensão. A Figura 18 mostra um inversor autocomutado.

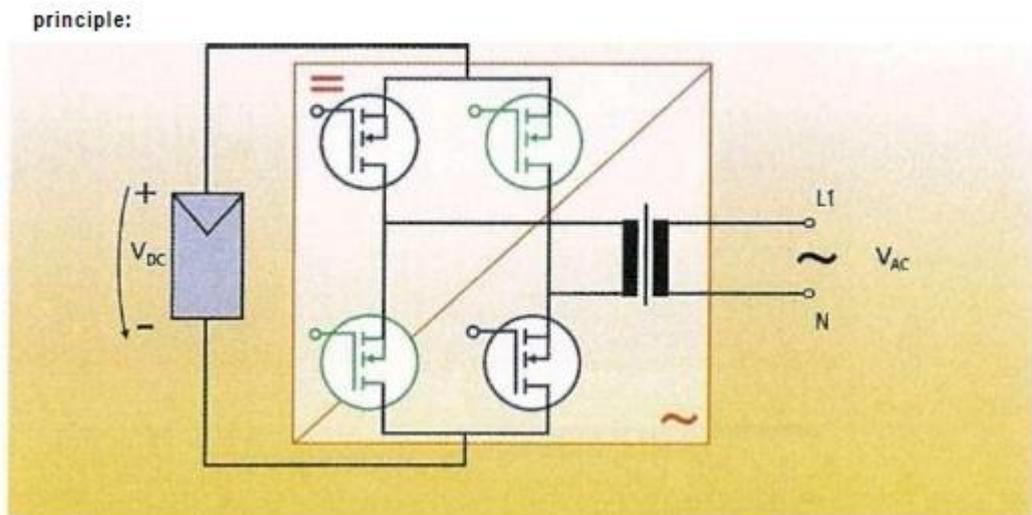


Figura 18 - Inversor autocomutado.

Fonte: Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie (2008).

Por utilizarem modulação por largura de pulso (PWM), os inversores autocomutados possibilitam um bom controle das formas de onda e do valor da tensão de saída. A Figura 19 mostra a curva de tensão de acordo com o PWM.

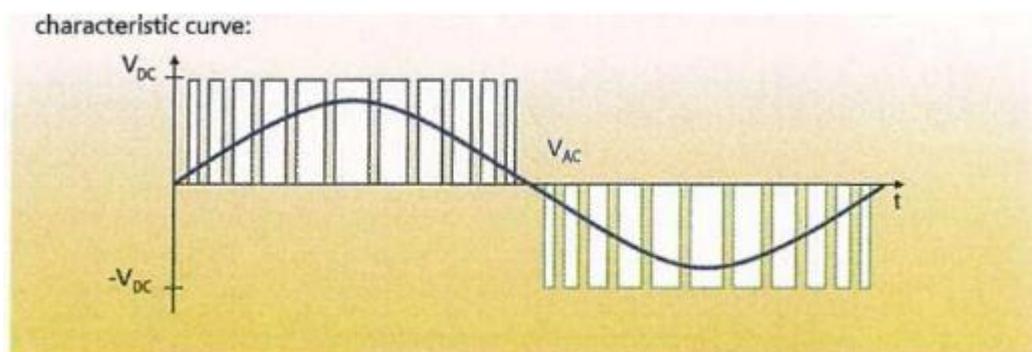


Figura 19 - Tensão em um inversor autocomutado.

Fonte: Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie (2008).

A modulação é feita chaveando os dispositivos semicondutores em frequências entre 10kHz e 100kHz, formando os pulsos com duração e espaçamento com forma a corresponder a uma senóide. Após a utilização de um filtro passa-baixa, existe uma grande semelhança entre a potência fornecida e a senóide da rede. Desta maneira, as distorções harmônicas nos inversores autocomutados são baixas. (DGS, 2008)

2.2.4 Características Dos Inversores

2.2.4.1 Eficiência

Uma diferença de 1% na eficiência do inversor pode significar 10% de energia gerada a mais no período de um ano. Juntamente com a eficiência da operação, também devem ser consideradas as perdas em *standby*. (RUTHER, 2004).

A Figura 20 ilustra a curva característica da eficiência da conversão CC-CA em um inversor de 650W em função da potência de operação.

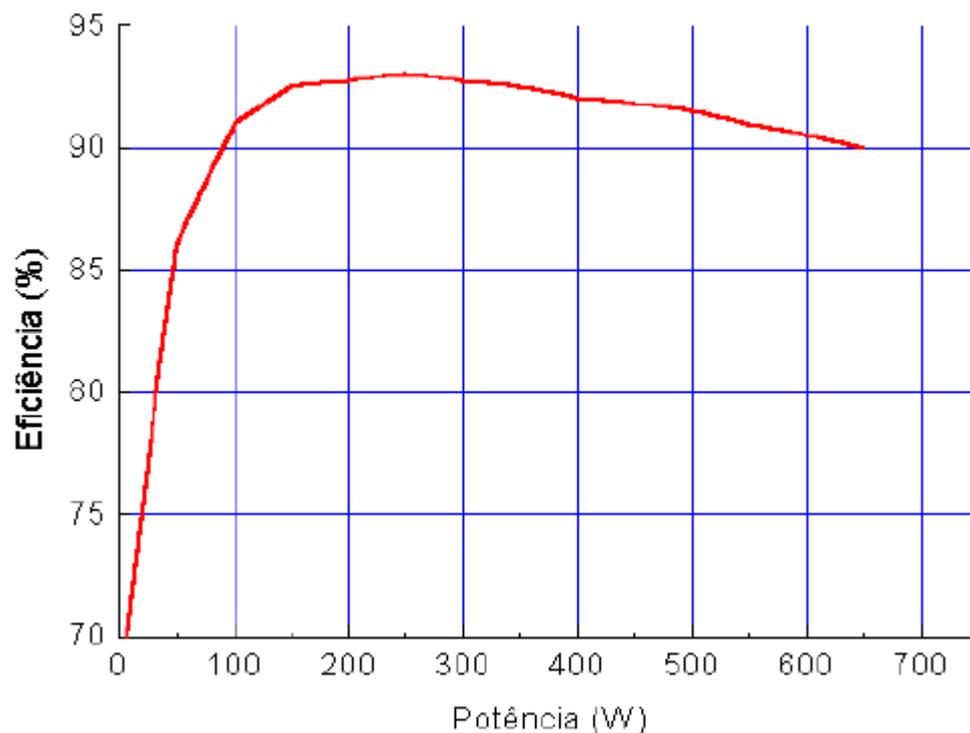


Figura 20 - Curva característica da eficiência da conversão CC-CA.

Fonte: RUTHER (2004).

No caso das perdas em operação, os principais pontos que influenciam na eficiência do inversor são as perdas em condução e comutação. O gráfico da Figura 21 ilustra a situação.

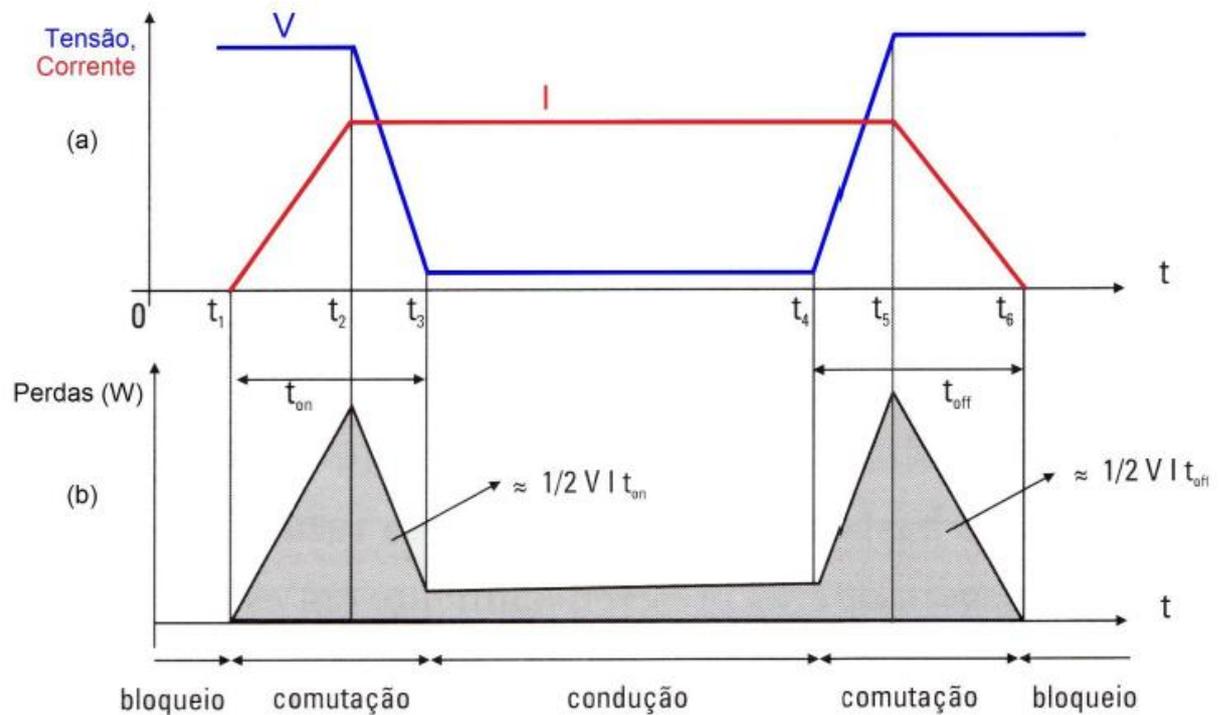


Figura 21 - a) Formas de onda de tensão em corrente durante comutação e condução, e b) potência dissipada durante comutação e condução.

Fonte: CRESESB (2014).

Nos períodos $t < t_1$ e $t > t_6$, a fase em que a chave está bloqueada, tem-se uma tensão V , e considerando-se que para este valor de V a corrente de fuga pode ser desconsiderada, não há potência dissipada, pois $I = 0A$, logo não tem-se perdas no semicondutor.

Para os períodos de comutação, $t_1 < t < t_3$ e $t_4 < t < t_6$, o valor da corrente não é mais igual a zero. A partir do instante t_1 a corrente começa a subir até chegar ao seu ponto máximo em t_2 , instante em que a corrente se estabiliza no máximo e a tensão começa a cair, até o seu valor mínimo em t_3 . Como nestas fases tem-se valores diferentes de zero para corrente e tensão, existe dissipação de potência.

Na fase de condução, entre t_3 e t_4 , também existem perdas, embora de valor mais baixo que durante a comutação, novamente porque o dispositivo está submetido a corrente e tensão.

2.2.4.2 Segurança

Segundo Ruther (2004), é de suma importância que o inversor não gere o fenômeno conhecido como *islanding*. Este fenômeno injeta energia gerada pelos módulos fotovoltaicos ligados ao inversor na rede elétrica quando a mesma encontra-se desligada. Tal fato pode oferecer sérios riscos as pessoas que possam estar trabalhando na rede no momento.

2.2.5 Inversores Com Transformadores de Baixa Frequência

Em ambos os casos de inversores comutados pela rede e autocomutados, transformadores em 50/60 Hz são utilizados para igualar a tensão da rede elétrica.

Segundo Haeberlin (2001), devido ao menor número de componentes do circuito, e assim a sua menor complexidade, os inversores com transformadores a baixa frequência possuem maior confiabilidade que os modelos a alta frequência.

A Figura 22 mostra o diagrama do circuito de um inversor com transformador de baixa frequência.

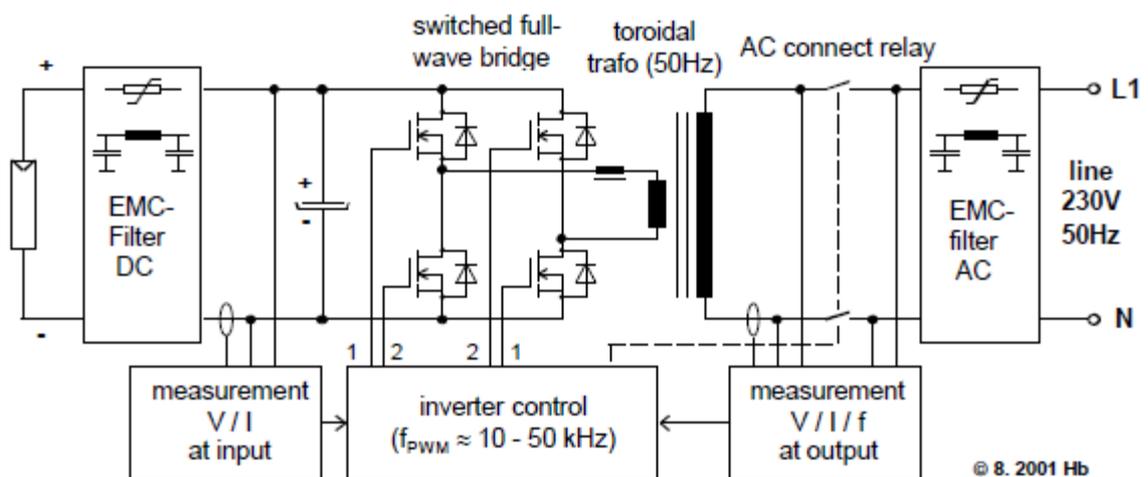


Figura 22 - Diagrama do circuito de inversor com transformador de baixa frequência.

Fonte: Haeberlin (2001).

O uso do transformador pode acarretar em perda de potência, além de incremento na massa, no peso e também no preço do inversor.

2.2.6 Inversores Com Transformadores de Alta Frequência

Transformadores de alta frequência para inversores possuem uma frequência entre 10 e 50 kHz. Quando comparados com os transformadores de baixa frequência, os dispositivos de alta frequência apresentam perdas menores, tamanho inferior, pesam menos e também possuem custo menor. Porém, o circuito do inversor necessário para o uso do transformador de alta frequência é mais complexo. (DGS, 2008)

A Figura 23 mostra o diagrama do circuito de um inversor com transformador de alta frequência, comparando-se com a Figura 22 do inversor a baixa frequência, pode-se notar a menor quantidade de componentes.

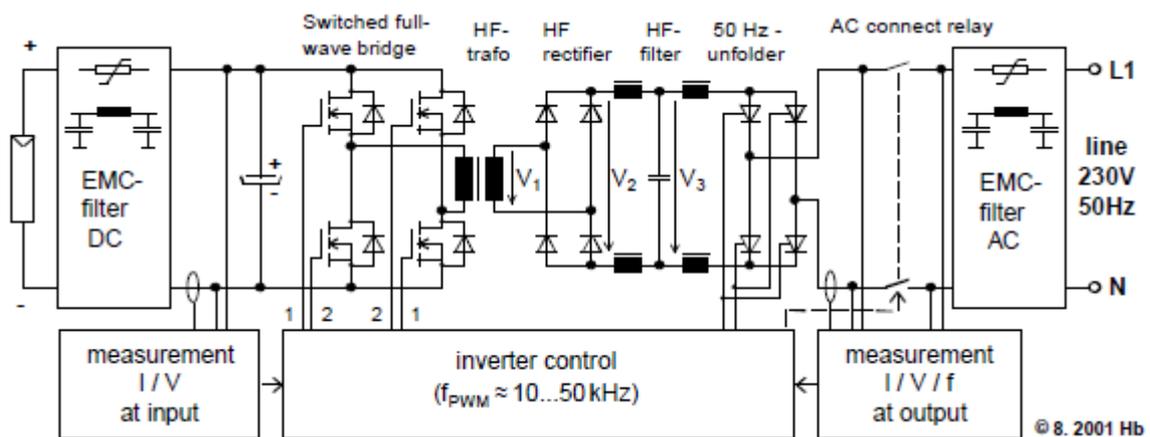


Figura 23 - Diagrama do circuito de inversor com transformador de alta frequência.

Fonte: Haeberlin (2001).

2.2.7 Inversores Sem Transformadores

De acordo com Macedo (2004), inversores com transformadores apresentam perdas superiores aos inversores sem transformadores.

Estudos indicam que a remoção do transformador pode resultar em um aumento de até 2% na eficiência do inversor, nas mesmas condições. (Haeberlin, 2001)

A Figura 24 mostra o diagrama do circuito de um inversor sem transformador.

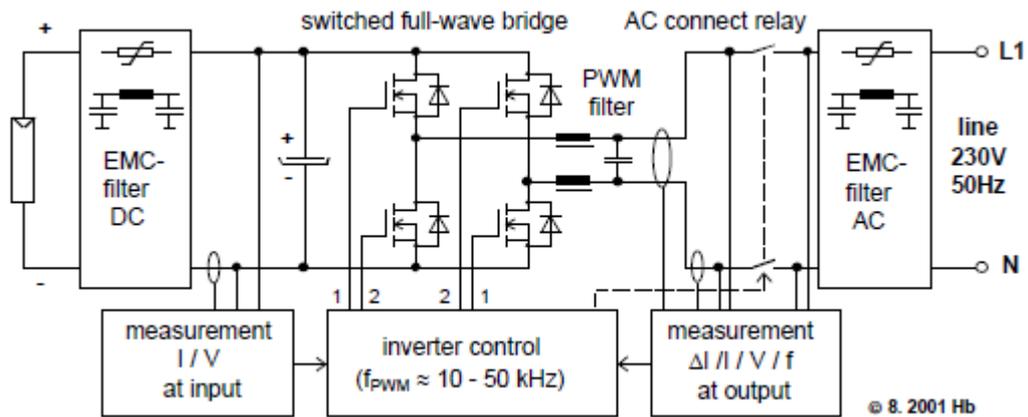


Figura 24 - Diagrama do circuito de inversor sem transformador.

Fonte: Haeberlin (2001).

A Tabela 2 compara inversores para SFCRs com e sem transformadores.

Tabela 2 - Comparação entre inversores de SFCRs com e sem transformadores.

Com transformador	Sem transformador
- maior peso e volume	- menor peso e volume
- maiores perdas (perdas magnéticas e ôhmicas) o que resulta em menor eficiência	- maior eficiência, principalmente se não possuir estágio de conversão c.c.-c.c. (para isso tem que operar com tensão do gerador fotovoltaico superior à tensão de pico da rede)
- permite que o painel fotovoltaico opere numa tensão mais baixa	- maior interferência eletromagnética
- menor interferência eletromagnética	- pode ser necessária a instalação de dispositivos de proteção adicionais (disposto diferencial-residual, disjuntor de corrente direcional etc.), conforme a regulamentação local, devido à falta de isolamento entre os circuitos c.c. e c.a.
- os circuitos c.c. e c.a são isolados	
- menores requisitos de proteção	

Fonte: CRESESB (2014).

2.3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

2.3.1 Harmônicos Nos Sistemas Elétricos

De acordo com Arrillaga e Watson (2004), harmônicos em sistemas elétricos são definidos como correntes e tensões senoidais em frequências múltiplas da principal frequência gerada, ou frequência fundamental. Os harmônicos são a maior componente de distorção das principais formas de onda de corrente e tensão.

<i>Harmonic</i>	<i>Frequency</i>
1st	60 Hz
2nd	120 Hz
3rd	180 Hz
4th	240 Hz
5th	300 Hz
6th	360 Hz
7th	420 Hz
8th	480 Hz
9th	540 Hz
10th	600 Hz
11th	660 Hz
13th	780 Hz
:	:
49th	2940 Hz

Figura 25 - Relação entre ordem dos harmônicos e frequência.

Fonte: Product Data Bulletin, Square D (1994).

Para Dugan (2002), qualquer forma de onda periódica e distorcida pode ser expressa como uma somatória de outras formas de onda senoidais. Quando a forma de onda não varia de um ciclo para outro, ela pode ser representada como uma soma de senoídes puras, em que a frequência de cada senoíde é múltipla da frequência fundamental da onda distorcida. Cada múltiplo destes é chamado de harmônico da frequência fundamental.

A Figura 26 mostra como a somatória de várias frequências contribuem para a forma de onda resultante. Neste caso, a onda foi decomposta em sua frequência fundamental mais os harmônicos de ordem 3, 5, 7, 9, 11 e 13.

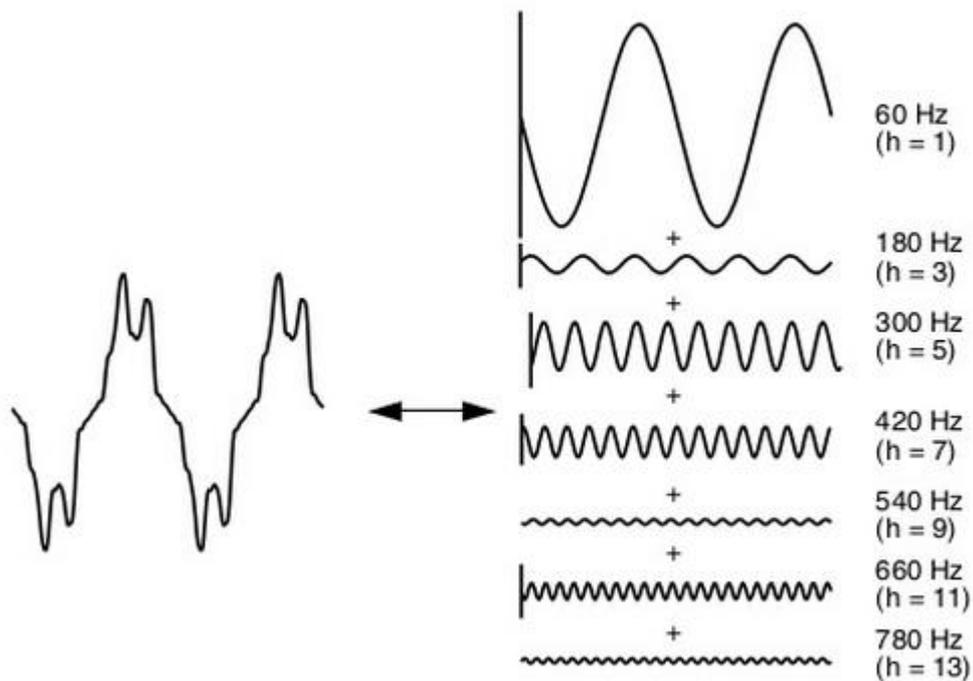


Figura 26 - Decomposição de uma onda em seus componentes harmônicos.

Fonte: Dugan (2002).

As distorções harmônicas nos sistemas elétricos são causadas por dispositivos com cargas não lineares, ou seja, cargas que utilizam corrente descontinuamente, ou cuja impedância varia através do ciclo da forma de onda da tensão CA de entrada, ou ainda cargas em que a corrente não é proporcional a tensão aplicada (Dugan, 2002).

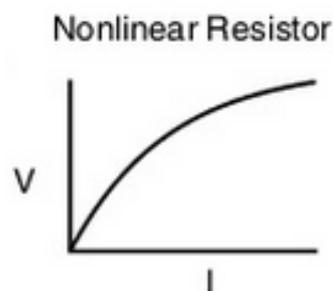


Figura 27 - Exemplo de carga não linear.

Fonte: Dugan (2002).

A Figura 28 ilustra esta situação onde uma tensão senoidal é aplicada em um resistor não linear, cuja curva relacionando tensão e corrente é mostrada na Figura

27. Embora a tensão seja uma senoide perfeita, a forma de onda da corrente é distorcida.

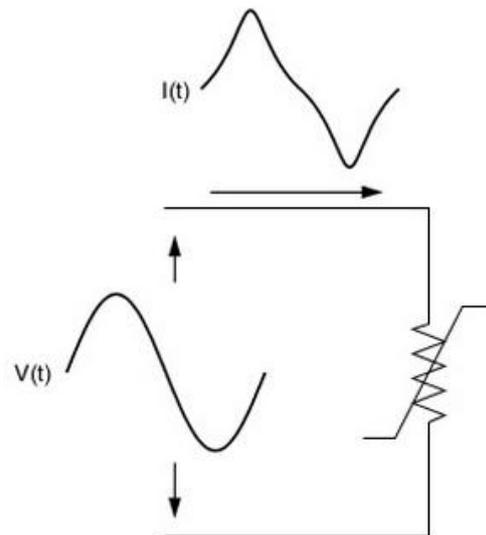


Figura 28 - Distorção da forma de onda da corrente.

Fonte: Dugan (2002).

Devido a não linearidade da carga, pequenas variações na tensão aplicada podem causar uma grande variação na corrente, resultando em uma forma de onda diferente.

Como exemplos de cargas não lineares, podem ser citados os fornos a arco, inversores, conversores, fontes chaveadas, equipamentos eletrônicos, dentre outros. Entre os exemplos citados acima, a grande maioria possui em seus circuitos vários semicondutores, que realizam chaveamentos conforme a tensão aplicada sobre eles.

Um dos principais geradores de harmônicos é o retificador monofásico em ponte com filtro capacitivo. A Figura 29 mostra o circuito deste retificador:

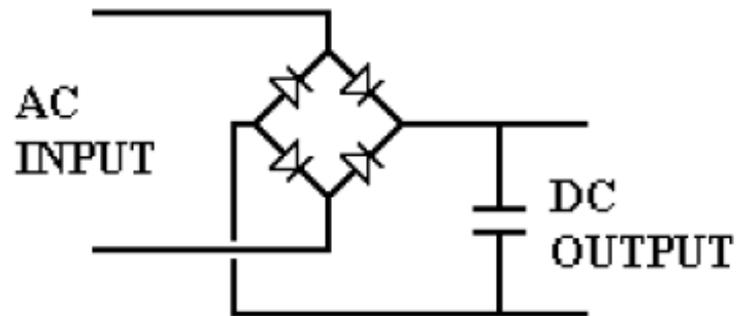


Figura 29 - Retificador monofásico em ponte com filtro capacitivo.

Fonte: Hearn Engineering (2010).

No circuito da Figura 29, a corrente elétrica só circulará quando o valor instantâneo da tensão CA for superior ao valor da tensão do capacitor, ou seja, a corrente só passará pelo retificador quando a onda senoidal da tensão estiver próxima ao seu pico. Como resultado disso, a forma de onda da corrente será em pulsos, e não senoidal, da maneira como é mostrada na Figura 30:

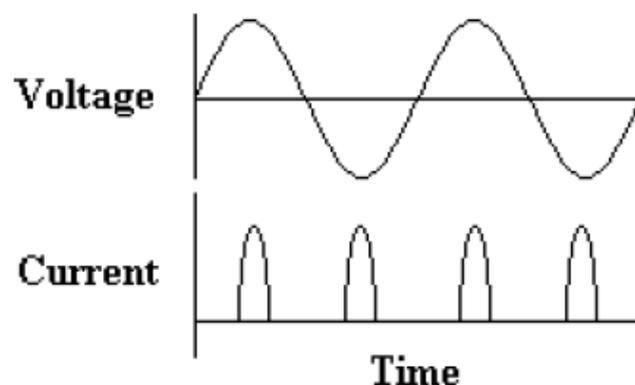


Figura 30 - Formas de onda no retificador monofásico.

Fonte: Hearn Engineering (2010).

Para Arrillaga e Watson (2004), antes do aparecimento dos semicondutores, as principais fontes de harmônicos eram os fornos a arco, lâmpadas fluorescentes, motores e transformadores. Atualmente, os dois principais contribuidores para o nível de harmônicos na rede são os retificadores monofásicos e os conversores estáticos trifásicos. O primeiro, utilizado nos equipamentos domésticos e de escritórios, tem pequena influência quando considerado individualmente, porém o grande número

destes retificadores em uso, sua contribuição torna-se significativa. Já os conversores trifásicos, por serem de potência considerável, acabam sendo o maior contribuidor para a questão dos harmônicos.

2.3.1.2 Taxas de distorção harmônica

De acordo com Dugan (2002), existem diversas maneiras usualmente utilizadas para indicar-se o conteúdo harmônico de uma onda em um valor absoluto. Uma destas maneiras é a taxa de distorção harmônica total, ou total *harmonic distortion* (THD), que pode ser calculada utilizando-se a seguinte expressão:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_n^2}}{M_1} \quad (3)$$

Onde M_n é o valor eficaz da tensão ou corrente na frequência n , h_{max} é a ordem harmônica máxima considerada para o cálculo e M_1 é o valor fundamental.

Para Arrillaga e Watson (2004), a THD pode ser definida como o valor quadrático médio (rms) dos componentes harmônicos da onda distorcida, como uma porcentagem da componente fundamental.

O valor rms (*root mean square*) é conhecido calculando-se:

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} \quad (4)$$

A relação entre o valor eficaz (rms) e a taxa de distorção harmônica total de uma determinada onda é dada por:

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (5)$$

Segundo Arrillaga e Watson (2004), para a maioria das aplicações, é suficiente considerar apenas as 25 primeiras ordens harmônicas, da 2ª até a 25ª. No

entanto, grande parte das normas especifica que até a 50ª ordem seja levada em consideração.

Para que seja conhecida a influência de um determinado harmônico em relação ao componente fundamental, pode-se utilizar a taxa de distorção harmônica individual, calculada por:

$$DHI = \frac{M_{n_{rms}}}{M_{1_{rms}}} \quad (6)$$

Onde $M_{n_{rms}}$ é o valor eficaz do componente harmônico da ordem desejada e $M_{1_{rms}}$ é o valor eficaz do componente fundamental.

2.3.1.3 Influência no fator de potência

Segundo Dugan (2002), existem três fatores associados com a potência, sendo eles (para sistemas lineares):

- Potência Aparente (S): O produto dos valores eficazes da tensão e da corrente;
- Potência Ativa (P): A quantidade média de energia cedida, dado por:

$$P = S \cos\theta \quad (7)$$

- Potência Reativa (Q): A porção da potência aparente que está fora de fase com a potência ativa, dado por:

$$Q = S \sin\theta \quad (8)$$

Sendo θ o ângulo de fase entre tensão e corrente, e o $\cos\theta$ o fator de deslocamento.

Segundo Boylestad (2004), Fator de Potência (FP) é uma indicação de quanto um sistema elétrico é resistivo ou reativo. Quanto maior for a componente resistiva, maior será o fator de potência. O FP é dado por:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (9)$$

Em casos de ondas puramente senoidais, temos que o FP é igual ao fator de deslocamento.

A Figura 31 mostra o triângulo de potências para ondas puramente senoidais, ilustrando as relações descritas anteriormente.

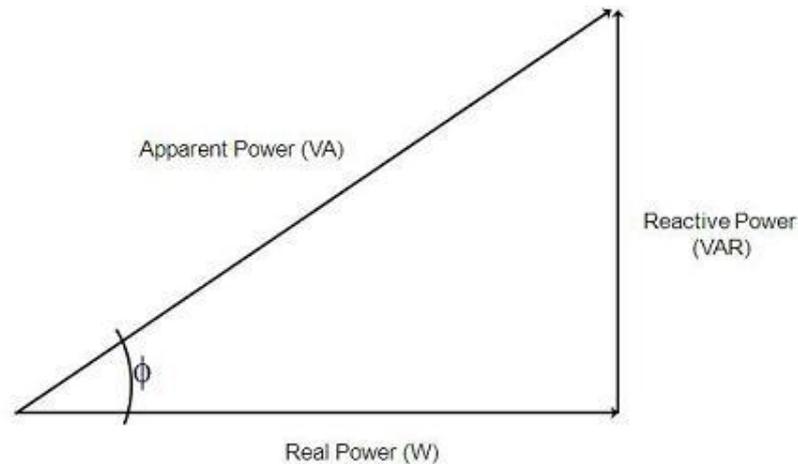


Figura 31 - Triângulo de Potências.

Fonte: National Instruments.

No caso de ondas distorcidas por harmônicos, o cálculo do Fator de Potência deve considerar também o Fator de Distorção (D), dado por:

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (10)$$

Logo, temos que o Fator de Potência é dado por (considerando a tensão um senoide pura):

$$FP = \cos \theta \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (11)$$

Assim, o triângulo de potências recebe mais uma variável:

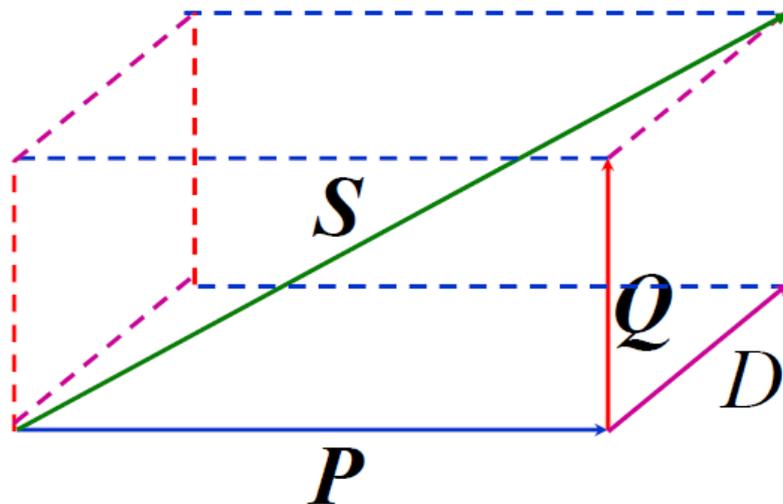


Figura 32 - Potências com fator de distorção.

Fonte: ROCHA (2014).

2.3.2 Séries De Fourier

Segundo Arrillaga e Watson (2004), em 1822 Jean Baptiste Joseph Fourier postulou que qualquer função contínua e periódica em um intervalo de tempo T pode ser representada como o somatório da sua componente senoidal de frequência fundamental e da série de componentes senoidais de ordem superior, em frequências múltiplas da fundamental.

A análise harmônica é o cálculo das fases e magnitudes fundamentais e de ordem superiores da forma de onda periódica. A série resultante é conhecida como Série de Fourier, e estabelece a relação entre as funções no domínio do tempo com o domínio da frequência.

A série de Fourier de uma função periódica $x(t)$ é definida por:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad (12)$$

Onde a_0 é o valor médio da função $x(t)$, que será somado com os componentes de ordem superior, enquanto que a_n e b_n são os componentes senoidais e cossenoidais da série.

Para a função $x(t)$, o coeficiente a_0 pode ser obtido integrando-se ambos os lados da equação X de $-T/2$ até $T/2$:

$$\int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt = \int_{-T/2}^{T/2} \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] dt \quad (13)$$

Resultando em:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (14)$$

O coeficiente a_n é determinado multiplicando-se a equação X pelo termo $\cos(2\pi mt/T)$:

$$\int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt = \int_{-T/2}^{T/2} \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \right] \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt \quad (15)$$

Resultando em:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt, \text{ para } n = 1 \rightarrow \infty \quad (16)$$

O coeficiente b_n é determinado multiplicando-se a equação X pelo termo $\operatorname{sen}(2\pi mt/T)$:

$$\int_{-T/2}^{T/2} x(t) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt = \int_{-T/2}^{T/2} \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \right] \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt \quad (17)$$

Resultando em:

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt, \text{ para } n = 1 \rightarrow \infty \quad (18)$$

Reescrevendo estas equações em termos da frequência angular $\omega = 2\pi/T$, temos:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) d(\omega t) \quad (19)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (20)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \text{sen}(n\omega t) d(\omega t) \quad (21)$$

Logo, tem-se:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \text{sen}(n\omega t)] \quad (22)$$

2.4 NORMAS E LEGISLAÇÕES EM VIGOR

A organização responsável por regular o mercado de energia elétrica no Brasil é a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, ela enquadra os sistemas fotovoltaicos em função de algumas leis, como: a lei 8.631/93 que trata sobre os níveis tarifários e a extinção da remuneração garantida; a lei 8.987/95 que dispõe sobre o regime de concessão e permissão de serviço público; a lei 9.074/95 que estabelece normas para outorga e prorrogação de concessões e permissões; o decreto 2.003/96 regulamenta a produção de energia elétrica de Produtores Independentes de Energia (PIEs) e AutoProdutores (APs), e o decreto 2.655/98 regulamenta o Mercado Atacadista de Energia elétrica (MAE) e define regras de organização do Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS). A resolução 112/1999 estabelece os requisitos necessários à obtenção de registro ou autorização para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras de fontes alternativas de energia, incluindo as centrais geradoras fotovoltaicas.

A ANEEL disponibilizou através da Resolução Normativa nº482, a regulamentação necessária para que os consumidores de energia elétrica possam ser também geradores de energia. Com essa norma foi possível a existência de

micro (potencia até 100kW) e minigeração distribuída (potencia entre 100kW e 1MW).

O órgão responsável pelas normatizações técnicas brasileiras é a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da Comissão de Estudos CE-82.1 (Sistemas de Conversão Fotovoltaica de Energia Solar) do Comitê Brasileiro de Eletricidade (COBEI) elabora normas técnicas referentes aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. A CE-82.1 elabora normas referentes a proteções contra sobretensões em sistemas fotovoltaicos (projeto de norma ABNT 03:082.01-011) Outra norma relacionada é a ABNT NBR 5410, que normatiza as instalações elétricas de baixa tensão.

Em março de 2013 as normas ABNT NBR 16.149, 16.150 e NBR/IEC 62116 foram publicadas com o intuito de normatizar a interface de conexão do sistema de geração fotovoltaica às redes de distribuição. A norma de requisitos é a ABNT NBR 16.149 e as normas de procedimentos de ensaios são as: NBR 16.150 e NBR/IEC 62116. –

Sistemas fotovoltaicos – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, ABNT NBR 16.150 – Sistemas fotovoltaicos –Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição –Procedimento de ensaio de conformidade e NBR/IEC62116 – Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Os documentos referentes à padronização de harmônicos são pertencentes à seção IEC 61000, que especifica detalhadamente todas as informações (ARRILAGA, Power System Harmonics, 2003).

- IEC 61000 1-4: Regulamenta a emissão de correntes harmônicas de equipamentos que possuem frequência de operação até 9 kHz;
- IEC 61000 2-1: Descreve e divide as principais fontes de harmônicos no sistema em três categorias: Equipamentos de potência, cargas industriais e cargas residenciais;
- IEC 61000 2-2: Possui uma seção sobre níveis de compatibilidade de distorções harmônicas de tensão em instalações industriais de baixa tensão;
- IEC 61000 2-4: Regulamentação sobre compatibilidade de harmônicos para plantas industriais. Também descreve os principais efeitos e causas;

- IEC 61000 3-2: Principais normas que abordam limites para correntes harmônicas na entrada, sendo a corrente de entrada em equipamentos menor ou igual a 16 A por fase. Esses limites são os máximos de harmônicos de corrente produzidos que podem circular, considerando equipamentos elétricos e eletrônicos com alimentação a partir de 220 V, sendo os com tensão menores que sem limites definidos.

A norma divide os equipamentos em quatro classes distintas (A, B, C, D), de acordo com o tipo de alimentação, o tipo de uso e potência.

Na classe A são separados equipamentos de uso residencial de baixa potência e alimentação trifásica equilibrada, compreendidos principalmente em ferramentas, “dimmers” de cargas e equipamentos eletrônicos. Também estão inclusos equipamentos que não fazem parte das classes B, C e D (O SETOR ELÉTRICO, 2006).

Tabela 3 - Limites de harmônicos de corrente para equipamentos pertencentes à classe A.

Ordem harmônica n	DHI% admissível [I_n/I_1]
Harmônicos ímpares	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 * 15/n$
Harmônicos pares	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 * 8/n$

Fonte: IEC 61000 3-2 (2005).

Os equipamentos da classe B são classificados como equipamentos portáteis e de arco de solda que não são utilizados profissionalmente (O SETOR ELÉTRICO, 2006).

Tabela 4 - Limites de harmônicos de corrente para equipamentos pertencentes à classe B.

Ordem harmônica n	DHI% admissível [I_n/I_1]
Harmônicos ímpares	
3	3,45
5	1,71
7	1,15
9	0,60
11	0,49
13	0,31
$15 \leq n \leq 39$	$0,225 * 15/n$
Harmônicos pares	
2	1,62
4	0,64
6	0,45
$8 \leq n \leq 40$	$0,34 * 8/n$

Fonte: IEC 61000 3-2 (2005).

Na classe C estão classificados equipamentos de iluminação como lâmpadas incandescentes, a descarga, LED's e "dimmers" com exceção de incandescentes. Também fazem parte equipamentos de potência ativa superior a 25 W (O SETOR ELÉTRICO, 2006).

Tabela 5 - Limites de harmônicos de corrente para equipamentos pertencentes à classe C.

Ordem harmônica n	DHI% admissível [I_n/I_1]
2	2
3	$30 * FP$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (somente harmônicos ímpares)	3
*FP é o fator de potência do circuito	

Fonte: IEC 61000 3-2 (2005).

E na classe D estão computadores pessoais e monitores de vídeo, bem como equipamentos que possuam a corrente de entrada igual a forma de onda descrita na (O SETOR ELÉTRICO, 2006).

Tabela 6 - Limites de harmônicos de corrente para equipamentos pertencentes à classe D.

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida por Watt [mA/W]	Máxima corrente harmônica Permitida [A]
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 ≤ n ≤ 39 (somente harmônicos ímpares)	3,85/n	Ver Tabela para classe A

Fonte: IEC 61000 3-2 (2005).

- IEC 61000 3-4: Norma que aborda os limites de emissão de correntes harmônicas para equipamentos que possuem corrente de entrada maiores que 16 A e menores ou igual à 75 A por fase, sendo a tensão de entrada de até 230 V monofásica e até 600 V trifásica.

Estabelece três estágios de procedimento de conexão para os equipamentos:

- Estágio 1: Conexão simples, medição dos limites individuais de harmônicos com o equipamento conectado em qualquer ponto do sistema de entrada.

Tabela 7 - Limites de correntes harmônicas admissíveis para estágio 1 da Norma IEC 61000 3-4.

Ordem harmônica n	DHI% admissível [I_n/I_1]
3	21,8
5	10,7
7	7,2
9	8,8
11	8,1
13	2,0
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21 ≤ n ≤ 25	0,8
27 ≤ n ≤ 31	0,7

≥ 33
(somente harmônicos ímpares)

Fonte: IEC 61000 3-4 (2005).

0,6

- Estágio 2: Conexão baseada na rede e nos dados do equipamento, para equipamentos que não atendam aos limites do estágio 1, se possuírem taxa de curto-circuito calculada pela fórmula 12 superior ou igual à 33.

$$S_{sc} = \frac{U_{nom}^2 [V]}{Z [\Omega]} \quad (11)$$

$$R_{sce} = \frac{S_{sc} [VA]}{S_{eq} [VA]} \quad (12)$$

Sendo U_{nom} a tensão de entrada do equipamento, Z a impedância, S_{sc} a potência de curto-circuito e S_{eq} a potência aparente do equipamento.

Tabela 8 - Limites de DHT% e DHI% para estágio 2 da Norma IEC 61000 3-4.

Equipamentos trifásicos não balanceados							
Mínimo R_{sce}	DHT% admissível	DHI% admissível [I_n/I_1]					
		I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}
66	25	23	11	8	6	5	4
120	29	25	12	10	7	6	5
175	33	29	14	11	8	7	6
250	39	34	18	12	10	8	7
350	46	40	24	15	12	9	8
450	51	40	30	20	14	12	10
600	57	40	30	20	14	12	10
Equipamentos trifásicos balanceados							
66	25	-	14	11	-	10	8
120	29	-	16	12	-	11	8
175	33	-	20	14	-	12	8
250	39	-	30	18	-	13	8
350	46	-	40	25	-	15	10
450	51	-	50	35	-	20	15
600	57	-	60	40	-	25	18

Fonte: IEC 61000 3-4 (2005).

- Estágio 3: Quando os estágios 1 e 2 não forem satisfeitos e se a corrente de entrada ultrapassar 75 A, deve ser feito um acordo entre a unidade consumidora e a concessionária para autorização da instalação do equipamento, levando em conta a potência ativa da instalação (POMILIO, 2008).

A forma de onda obtida na saída dos inversores de SFCR deve possuir baixa distorção harmônica. A distorção harmônica total relacionada à corrente deve ser menor que 5% da corrente fundamental e cada harmônico individual deve estar limitado conforme apresentado (IEC 61727, 2004; IEEE 519, 1992; IEEE929, 2000).

Tabela 9 - Limites de distorção na corrente.

Ordem dos harmônicos	Limite de distorção
3 ^a – 9 ^a	< 4,0%
11 ^a – 15 ^a	< 2,0%
17 ^a – 21 ^a	< 1,5%
23 ^a – 33 ^a	< 0,6%
Acima da 33 ^a	< 0,3%

Fonte: IEC 61727, 2004 (adaptado).

Das normas do IEEE, destaca-se somente a norma IEEE 519-1992 no que a aborda a problemática de harmônicos, onde identifica as maiores fontes de harmônicos em sistemas elétricos.

O documento descreve quais os limites aceitáveis em regime permanente para o pior caso de correntes harmônicas que circulam entre as fontes e as cargas da instalação.

São três tabelas que expõem o limite da relação da corrente da fundamental da corrente de carga e a corrente de curto circuito entre a fonte e as cargas, sendo o Quadro 5 para sistemas de distribuição de 120 V a 60 kV, o Quadro 6 de tensões de 69,001 kV a 161 kV e o Quadro 7 para tensões acima de 161 kV (SANTOS, 2007).

Tabela 10 - Limites de harmônicos de corrente para tensões de 120 v à 60 kV em porcentagem.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TDD
<20	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	5,0%
20-50	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%	8,0%
50-100	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%	12,0%
100-1000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15,0%
>1000	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20,0%

Fonte: IEEE Standard 519-1992 (1992).

Tabela 11 - Limites de harmônicos de corrente para tensões de 61,009 kV à 161 kV em porcentagem.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TDD
<20	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
20-50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%
50-100	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%	6,0%
100-1000	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%	7,5%
>1000	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%	10,0%

Fonte: IEEE Standard 519-1992 (1992).

Tabela 12 - Limites de harmônicos de corrente para tensões maiores que 161 kV em porcentagem.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	THD
<50	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
>50	3,0%	1,5%	1,15%	0,45%	0,22%	3,75%

Fonte: IEEE Standard 519-1992 (1992).

Os Procedimentos de Distribuição - PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O PRODIST contém 9 Módulos. O módulo 8 é o responsável pela qualidade de energia. Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão indicados na Tabela 13. Estes valores servem para referência do planejamento

elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados. (PRODIST)

Tabela 13 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Fonte: PRODIST (2015).

Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicados na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5	
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: PRODIST (2015).

2.5 MEDIDOR

Para a realização das medições de qualidade de energia no EV da UTFPR, foi utilizado o aparelho Embrasul RE6000 módulo T, disponível na universidade.

Segundo o fabricante, o equipamento possui:

- Funções completas para análise de sistemas elétricos
- Curva de carga de motores, geradores e transformadores
- Medição e diagnóstico de distorções harmônicas
- Registro e avaliação de perturbações e transientes
- Estudos de eficiência energética
- Dimensionamento de bancos para correção do FP.



Figura 33 - Medidor EMBRASUL RE6000.

Fonte: Embrasul.

O analisador disponível na UTFPR possui alicates para a medição de corrente, sendo que os mesmos são adequados para a medição das grandezas do inversor do EV.

A integração é parametrizável, com valores entre 100 milissegundos até 30 minutos entre cada medição.

O RE6000 também possibilita a aquisição de harmônicos nas grandezas RMS, da primeira até a quinquagésima ordem. Caso a aquisição esteja ativada, o intervalo de tempo de cada aquisição também é configurado, baseando-se no intervalo de integração definido.

Com o módulo T, o equipamento também é capaz de realizar a medição de transientes com uma resolução de até 8kHz.

Na Figura 34, é possível ver as especificações técnicas do analisador RE6000:

Alimentação	80 à 300Vac/Vcc	Isolação	2,5kV CATIII
Consumo	8VA	Dimensões	281 x 291,7 x 73 mm
Temperatura de operação	0 à 50°C	Display	LCD gráfico 240x128 pixels
Medição de tensão	30 à 500Vac (Fase-neutro) 0,5 à 100V (Entrada de neutro - RE6000/N)	Peso	1,7kg
Erro máximo de tensão	0,5% entre 30 e 100V 0,2% entre 100 e 500V 0,5% entre 0,5 e 100V (RE6000/N)	Comunicação	TCP/IP - Ethernet
Medição de corrente	Através de sensor flexível ou alicate de corrente	Período de Integração	100ms à 30 min
Erro máximo de corrente	0,2% entre 5% e 100% da escala de corrente	Capacidade de memória	256MB
Erro máximo de ângulo de fase	< 0,3 graus	Amostragem	A/D de 16 bits, 133 amostras por ciclo (8kHz). Simultaneamente em todos os canais
Frequência	50/60Hz	Harmônicas	1ª a 50ª ordem, pares e ímpares, simultaneamente em todos os canais
		Transientes	Duração mínima para detecção: 130us (amostragem de 8kHz)
		Análise dos dados	Software ANL6000

Figura 34 - Especificações técnicas do RE6000.

Fonte: Embrasul.

A precisão do RE6000 pode ser conferida na Figura 35, retirada do manual do mesmo:

Tensão	Três entradas de tensão (quatro entradas diferenciais para o módulo RE6000/N). Faixa das fases A, B, C: 60-600 Vrms máx. Faixa de medição de Neutro: 0,5-100 Vrms máx. (somente para o RE6000/N). Precisão: 0,5% entre 60 a 80V. 0,2% entre 80 a 600V.
Transientes de tensão	Faixa das fases A, B, C: 50-600 Vp. Faixa da fase N: 1 - 120 Vp (somente para o RE6000/N). Máxima frequência identificada: 3 KHz.
Corrente	Três entradas diferenciais de corrente (quatro para o modo RE6000/N). Faixa das fases A, B, C: 5 a 100% da relação do sensor de corrente. Precisão: 0,2% (5 a 100% da leitura)
Transientes de corrente	Faixa das fases A, B, C: 10-300% da relação do sensor. Máxima frequência identificada: 3 KHz.
Fase	Todos os canais são amostrados simultaneamente. O RE6000 possui seis conversores AD independentes.
Frequência	Faixa fundamental: 50/60 Hz. Precisão: 0,2% da leitura.
Observação	Todas as especificações foram obtidas na faixa de temperatura especificada.

Figura 35 - Parâmetros e precisão do RE6000.

Fonte: Embrasul.

Para a obtenção de todos os valores necessários, a Figura 36 mostra todos os cálculos realizados pelo aparelho.

Tensão RMS	$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i A_i^2}$ <p>Ai = Amplitude das harmônicas detectadas</p>
Corrente RMS	$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i A_i^2}$ <p>Ai = Amplitude das harmônicas detectadas</p>
Potência Ativa	$P = V_i I_i \cdot \cos(\text{fase} V_i - \text{fase} I_i)$ <p>i=Índice das harmônicas detectadas</p>
Potência Aparente	$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$
Potência Reativa	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$
Fator de Potência	$FP = \frac{P}{S}$
Distorção Harmônica Total (DHT)	$DHT = \sqrt{\frac{\sum A_{ih}^2}{A_j^2}}$ <p>Ai = Amplitude da harmônicas detectadas Aj = Amplitude da harmônica fundamental</p>
Tensão de Neutro	$V = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (V_k)^2}$
Corrente de Neutro	$I = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (V_k)^2}$

Figura 36 - Parâmetros calculados.

Fonte: Embrasul.

3.0 MEDIÇÕES DE QUALIDADE DE ENERGIA

As medições realizadas ocorreram no Escritório Verde da UTFPR. O Escritório Verde, ou EV, é um órgão da UTFPR destinado a “implantar uma série de programas para se reduzir o impacto ambiental das atividades acadêmicas e também servir de referência a outras instituições de ensino e empresas.” (<http://www.escriptorioverdeonline.com.br/o-que-e-o-escriptorio-verde/>)

Uma das partes destes programas é justamente a instalação de painéis fotovoltaicos para a utilização da energia solar, suprimindo assim a energia consumida pelo escritório.

A sede do Escritório Verde se encontra na Av. Silva Jardim, 807. Ela tem como objetivo ser um “laboratório vivo”, aberto ao público para demonstração da ecoeficiência dos produtos e tecnologias de sua construção.

Os Centros Universitários Sustentáveis, chamados “greencampi”, constituem uma realidade em outros países. Nos Estados Unidos, os campi universitários assumem função ainda mais relevante, uma vez que englobam também as moradias dos estudantes. A grande maioria dessas universidades possui um “Green Office” – Escritório Verde, onde são planejadas e implantadas as práticas sustentáveis nos campi. Atuando em conjunto com outros departamentos das universidades, responsáveis pela manutenção, reformas, energia, água, resíduos, e até no planejamento de novas edificações, a gestão ambiental de um câmpus se torna mais fácil e eficiente.

No Brasil, este movimento já começa a acontecer em algumas Instituições de Ensino Superior (IES), pois tais iniciativas seguem uma tendência global da necessidade das universidades se posicionarem diante dos anseios da sociedade por um desenvolvimento sustentável, não apenas no ensino como também em práticas internas ambientalmente corretas. A busca da construção de sociedades sustentáveis pode acontecer com a colaboração das ciências puras e das ciências aplicadas, gerando o desenvolvimento de práticas adequadas convergentes para políticas e ações pró-ambientais. (www.escriptorioverdeonline.com.br)



Figura 37 - Vista posterior do Escritório Verde

Fonte: www.escritorioverdeonline.com.br

Os painéis do SFCR do EV são constituídos por 10 módulos Kyocera KD210GX-LP de tecnologia de silício policristalino, cada um com potência máxima de 210W, resultando em uma potência total de 2,10kW.

De acordo com o fabricante dos módulos, a eficiência de conversão das células fotovoltaicas é acima de 16%.

A seguir são apresentados gráficos com as características elétricas dos painéis utilizados.

A Figura 38 ilustra o comportamento de corrente e de tensão nos módulos KD210GX-LP de acordo com a temperatura das células fotovoltaicas, para uma irradiância definida em $1000W/m^2$.

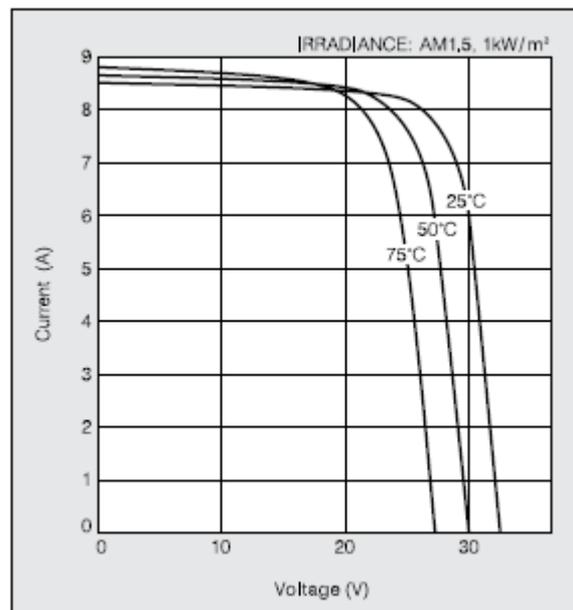


Figura 38 - Relação Corrente x Tensão do módulo KD210GX-LP em temperaturas distintas.
Fonte: Catálogo Kyocera.

Na Figura 39 é possível observar a relação corrente x tensão para diferentes níveis de irradiância, mantendo-se a temperatura constante.

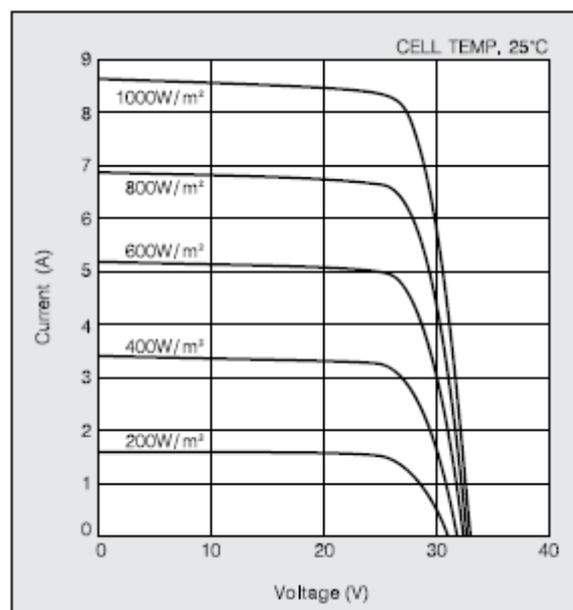


Figura 39 - Relação Corrente x Tensão do módulo KD210GX-LP para diferentes irradiâncias.
Fonte: Catálogo Kyocera.

Complementando o SFCR, é utilizado o inversor monofásico PVPOWERED, modelo P2000, ligado em 220V, cujas especificações elétricas podem ser encontradas na Figura 40 - Características elétricas do inversor P2000. Figura 40.

MODEL	PVP2000
Continuous Output Power (watts)	2000
Weighted CEC Efficiency (%)	92
Maximum DC Input Voltage (VOC)	500
DC Voltage Operating Range (V)	115-450
DC Minimum Start Voltage (V)	130
DC Maximum Current (A)	18.5
AC Rated Output Current (A)	8.5
AC Nominal Voltage (V)	240
AC Output Voltage Range (V)	211-264
AC Frequency Range (Hz)	59.3-60.5

Figura 40 - Características elétricas do inversor P2000.

Fonte: Catálogo PV Powered (2011).

3.1 METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES

Nas medições que foram realizadas para a obtenção de dados para este trabalho, os seguintes dados serão obtidos pelo analisador: Tensão fase-neutro, tensão fase-fase, corrente elétricas nas fases, potências ativa, reativa e aparente, fator de potência, taxas de distorção harmônica de tensão e de corrente, frequência e harmônicos de ordem par e ímpar, do segundo até o quinquagésimo.

Estas medições foram realizadas no ponto de conexão do inversor com a rede elétrica da concessionária. Assim, os equipamentos para a aquisição de dados foram instalados na saída do inversor, na conexão com o disjuntor do inversor/rede.

Para a aquisição de dados de corrente foram utilizados os alicates EB100, também da Embrasul, configurados para valores de até 10A.



Figura 41 - Alicates EB100.

Fonte: Embrasul.

Na coleta de valores referentes a tensão, foi feito o uso dos cabos de tensão que acompanham o analisador de energia.



Figura 42 - Cabos de tensão do analisador RE6000.

Fonte: Embrasul

Como as medições serão longas e sendo assim impossível de que o teste seja assistido durante todo o período, foram colocados alertas próximos ao equipamento e ao quadro, para evitar acidentes.



Figura 43 – Disposição dos equipamentos e alertas.

Fonte: Autoria própria.

Além dos avisos, todas as partes expostas foram cobertas com materiais isolantes.

Nas medições mais longas, o aparelho será constantemente verificado para verificar se houve algum erro na medição ou algum fator externo que possa interferir nos dados obtidos.

O trabalho consistiu em analisar a qualidade de energia do painel fotovoltaico em três situações principais, sendo elas: transitório, contínua e inversor desligado.

3.1.1 Transitório

Nesta situação o objetivo é medir o transitório no momento de desligamento e inicialização do inversor e observar como a corrente e a tensão se comportam nas duas fases, assim como a variação dos harmônicos gerados.

3.1.2 Contínua

Nesta situação o inversor permanece ligado e a medição é realizada de forma contínua, registrando em um primeiro momento, a qualidade de energia do sistema conectado ao ponto de conexão com a carga no período de um final de semana, e em um segundo momento em um período de 2 semanas. O objetivo desta medição é observar o comportamento harmônico do sistema em paralelo com a irradiação solar presente.

3.1.3 Inversor Desligado

Esta medição trata-se de analisar a qualidade de energia do sistema em alguns minutos, com um máximo de uma hora para não prejudicar a geração sistema, com o inversor desligado em todo o momento. O objetivo é observar se o mesmo afeta a qualidade de energia do sistema fotovoltaico.

As datas escolhidas para os testes foram nos meses de Dezembro de 2014 e Janeiro de 2015. Estes meses, juntamente com Novembro, são os que apresentam a maior irradiação solar durante o ano na cidade de Curitiba.

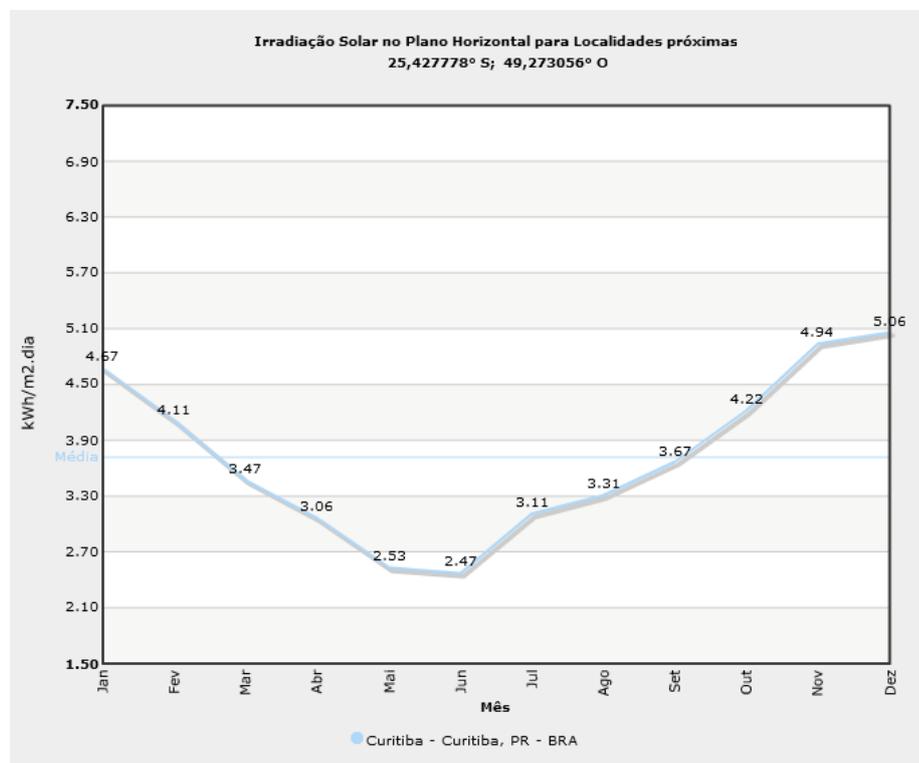


Figura 44 - Irradiação anual em Curitiba no plano horizontal.

Fonte: Autoria própria.

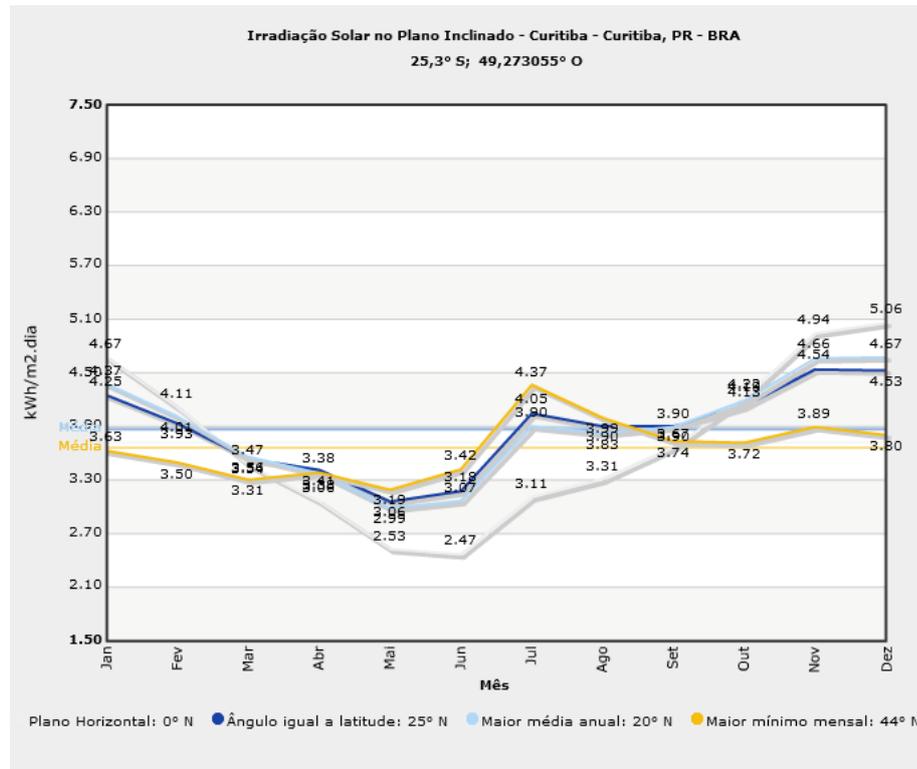


Figura 45 - Irradiação anual em Curitiba no plano inclinado.

Fonte: Autoria própria.

3.2 MEDIÇÕES

No dia 19 de dezembro, próximo ao fim da tarde, o equipamento foi ligado ao quadro de energia do EV e foi deixado adquirindo dados por aproximadamente 72 horas. No final da tarde do dia 22 de dezembro, a medição foi interrompida e os dados transferidos para um computador, via cabo *cross-over*.

Os parâmetros utilizados na medição foram:

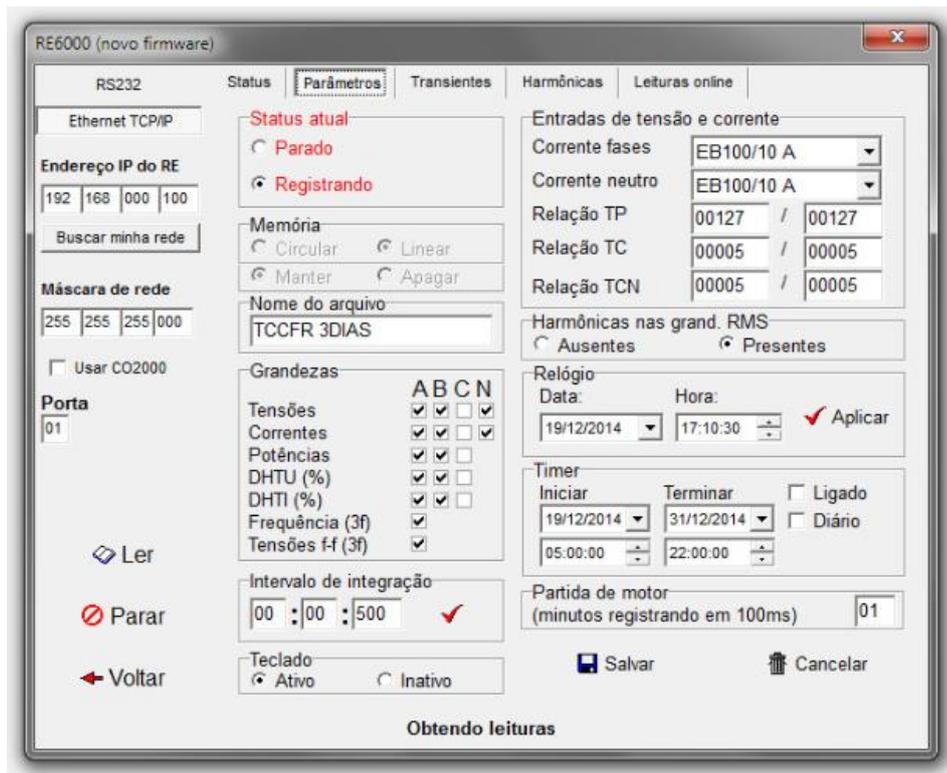


Figura 46 - Parâmetros utilizados na medição.

Fonte: Autoria própria.

- Registro de harmônicos a cada 10 registros de grandezas RMS.

Durante este período, a energia gerada segundo os dados contidos na memória de massa do inversor foi de 17kWh, sendo 11kWh gerados no dia 20, enquanto que no dia 21 foram gerados 6kWh. No dia 22, devido as condições climáticas, a geração foi inferior a 1kWh.

Pelo relatório geral criado pelo software ANL6000, o valor total gerado foi igual a 16,834kWh, próximo a valor da memória de massa.

Total kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
7,855	0,332	4,802	8,925	0,862
8,979	0,000	-3,782	9,743	-0,922
0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
16,834	0,332	1,020	16,534	0,998

Figura 47 - Energia gerada no período do teste.

Fonte: Autoria própria.

As Figura 48 e 49 mostram de forma gráfica a potência em cada fase durante este período.

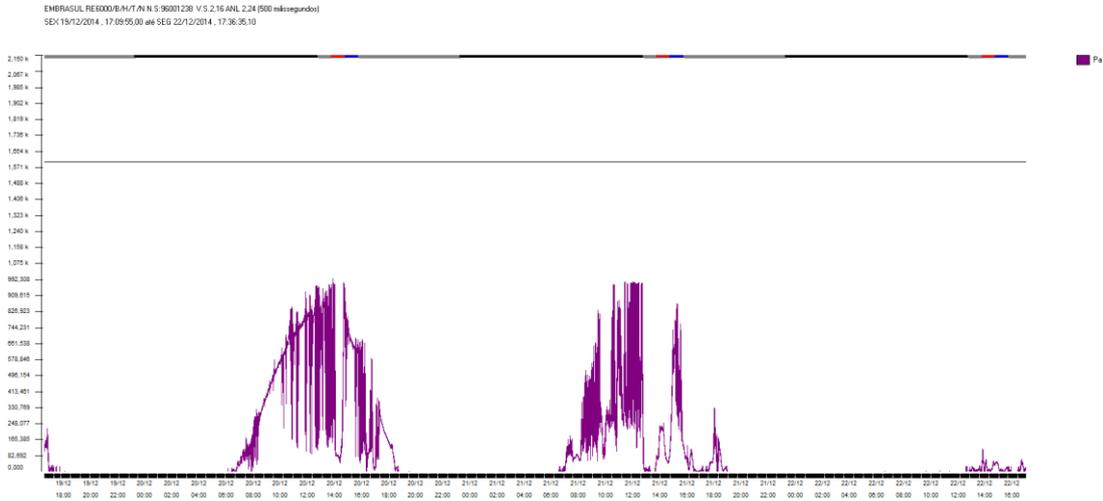


Figura 48 - Potência ativa na fase A.

Fonte: Autoria própria.

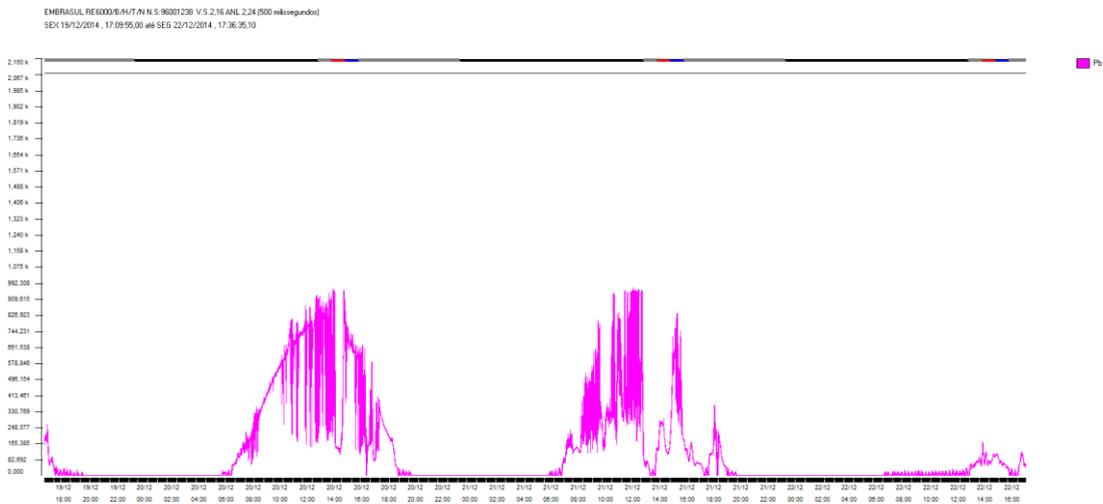


Figura 49 - Potência ativa na fase B.

Fonte: Autoria própria.

Somando-se as duas fases, tem-se o resultado da potência total no inversor, conforme mostra a Figura 50:

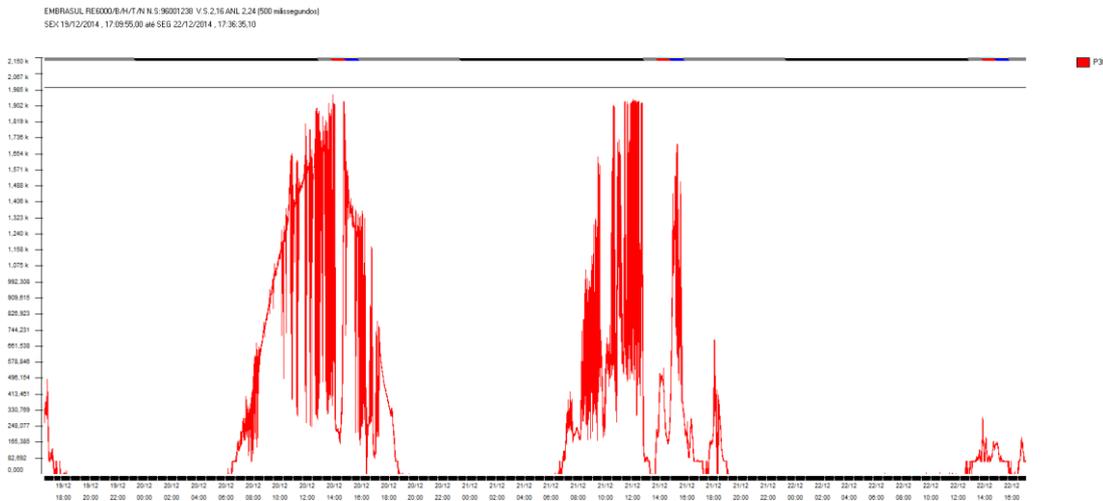


Figura 50 - Potência ativa total.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que durante as medições, a potência máxima foi próxima a 1,9kW, próxima ao valor nominal do inversor de 2kW.

A Figura 51 mostra o comportamento das tensões das fases A e B durante os três dias. Apesar de pequenas variações, os valores de tensão mantêm-se estáveis.

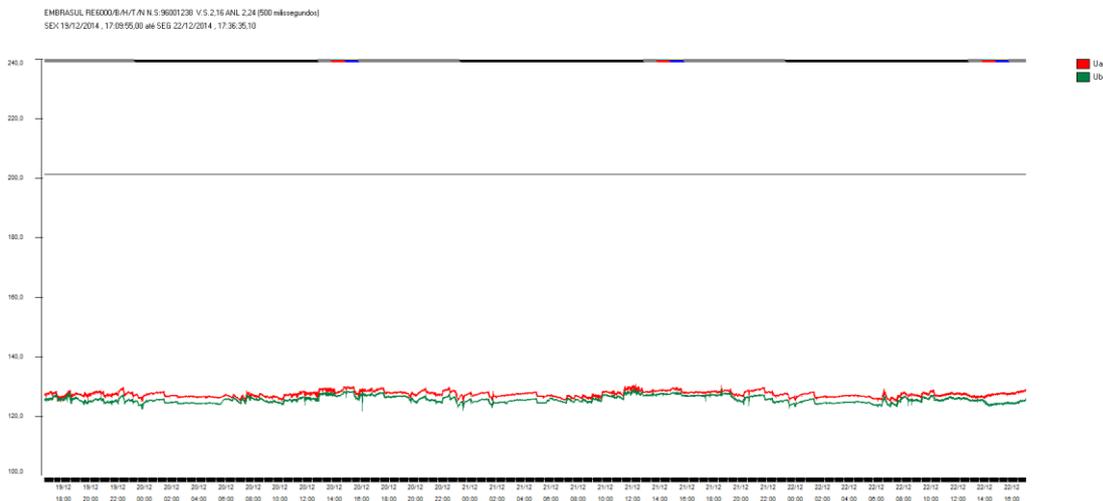


Figura 51 - Tensões nas fases A e B.

Fonte: Autoria própria.

O comportamento da tensão entre as fases A e B mantém um padrão parecido com as tensões fase-neutro. A figura 52 mostra a tensão AB.

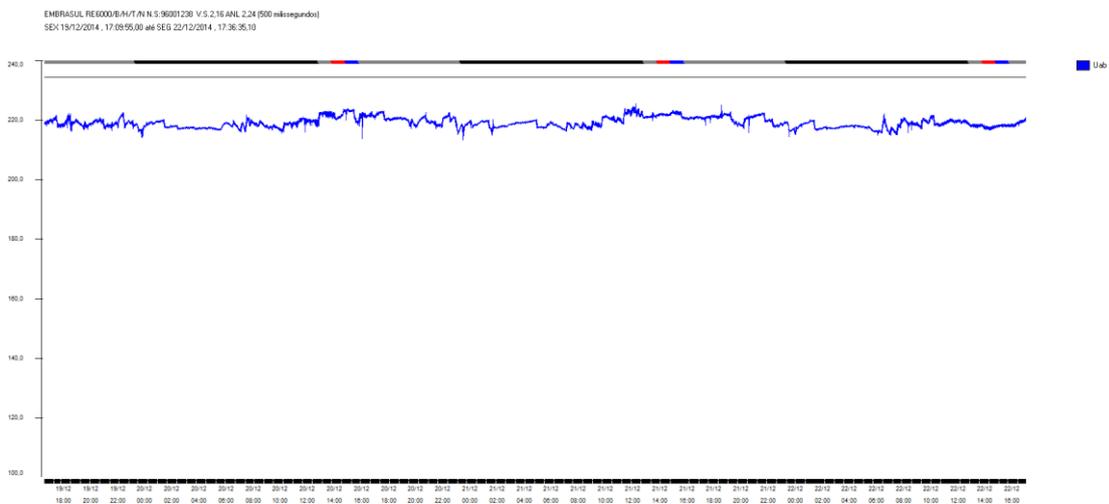


Figura 52 - Tensão entre fases A e B.

Fonte: Autoria própria.

Nas figuras 53 e 54 são apresentados os resultados das correntes nas fases A e B:

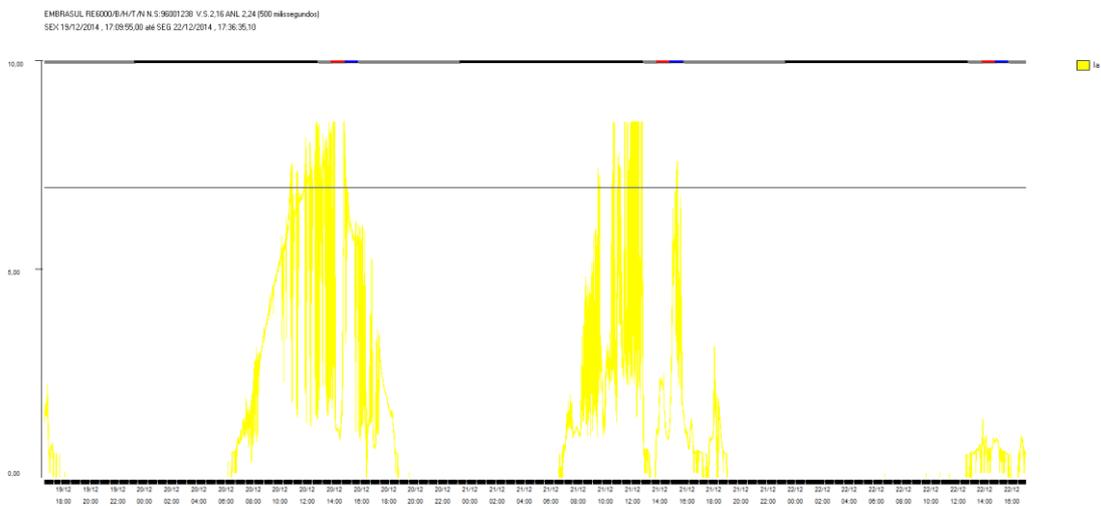


Figura 53 - Corrente na fase A.

Fonte: Autoria própria.

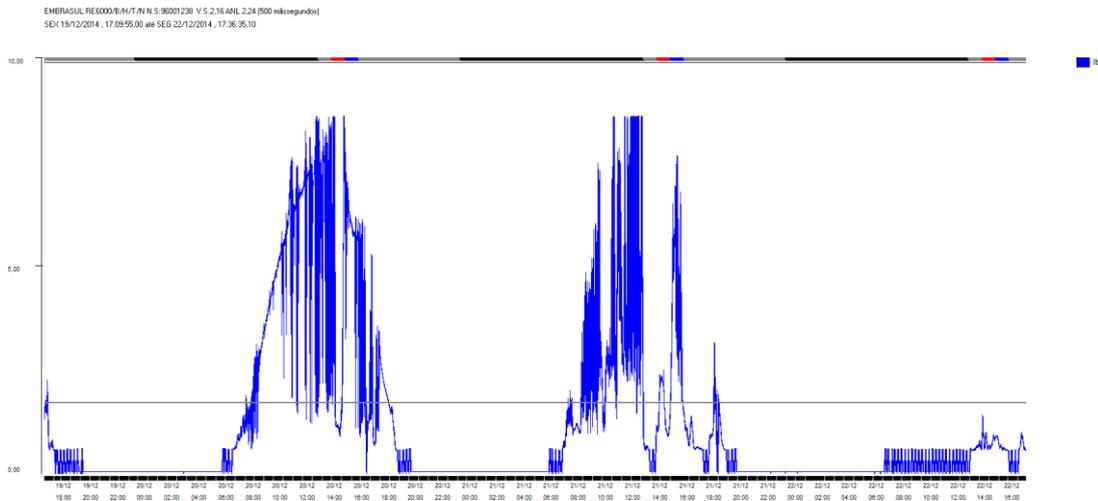


Figura 54 - Corrente na fase B.

Fonte: Autoria própria.

Diferentemente da tensão, os valores de corrente possuíram grande variação durante os três dias de medição, porém os valores em cada fase são próximos.

Nas medições das distorções harmônicas, observamos novamente a diferença no comportamento entre tensão e corrente.

Enquanto que no caso da tensão (Figura 55) os valores oscilam entre 2,5% e 4,0%, a distorção de corrente apresenta valores mais instáveis (Figura 56).

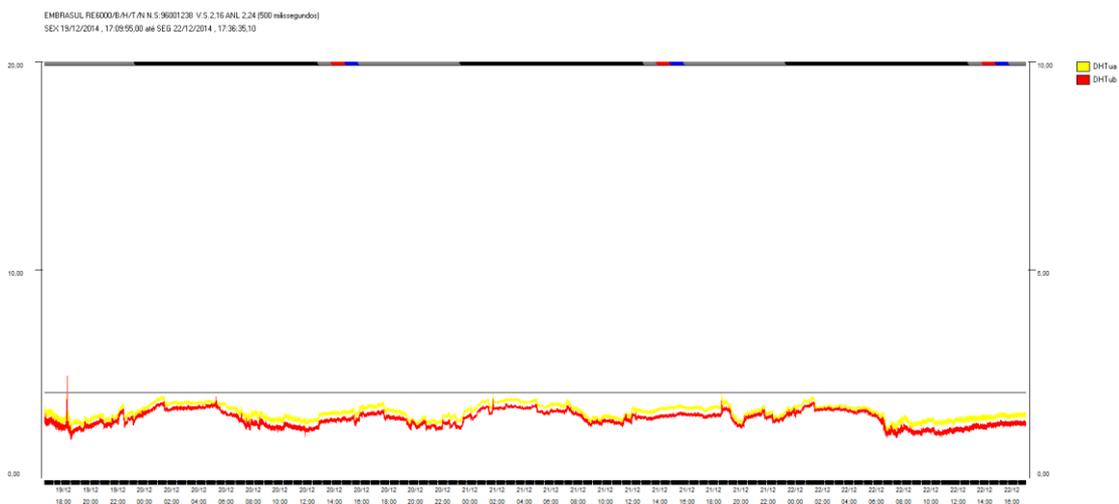


Figura 55 - Taxas de distorção harmônica de tensão nas fases A e B.

Fonte: Autoria própria.

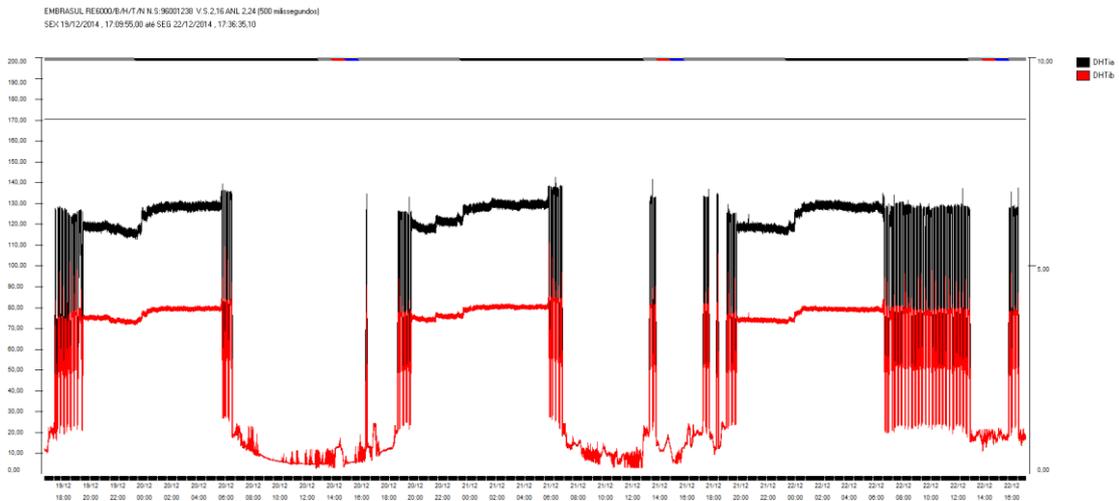


Figura 56 - Taxas de distorção harmônica de corrente nas fases A e B.

Fonte: Autoria própria.

Como os gráficos das taxas de distorção harmônica de corrente mostraram grande diferença no decorrer do tempo, os harmônicos serão apresentados a seguir de forma a confirmar a variação na qualidade de energia do inversor.

As figuras 57-62 apresentam os registros de harmônicos dos três dias na aquisição, separadamente por dia e por fase.

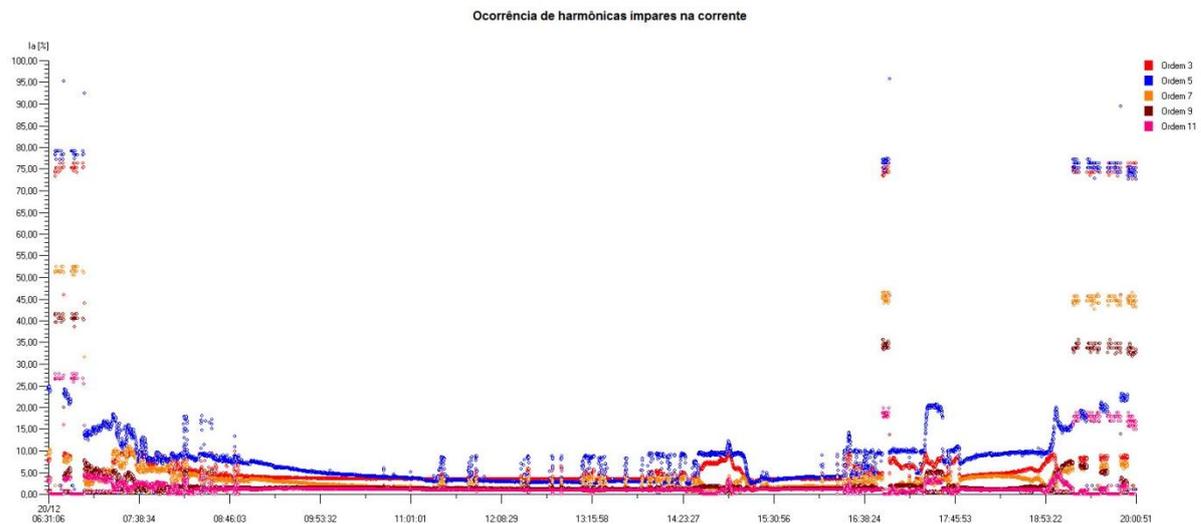


Figura 57 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase A no dia 20/12.

Fonte: Autoria própria.

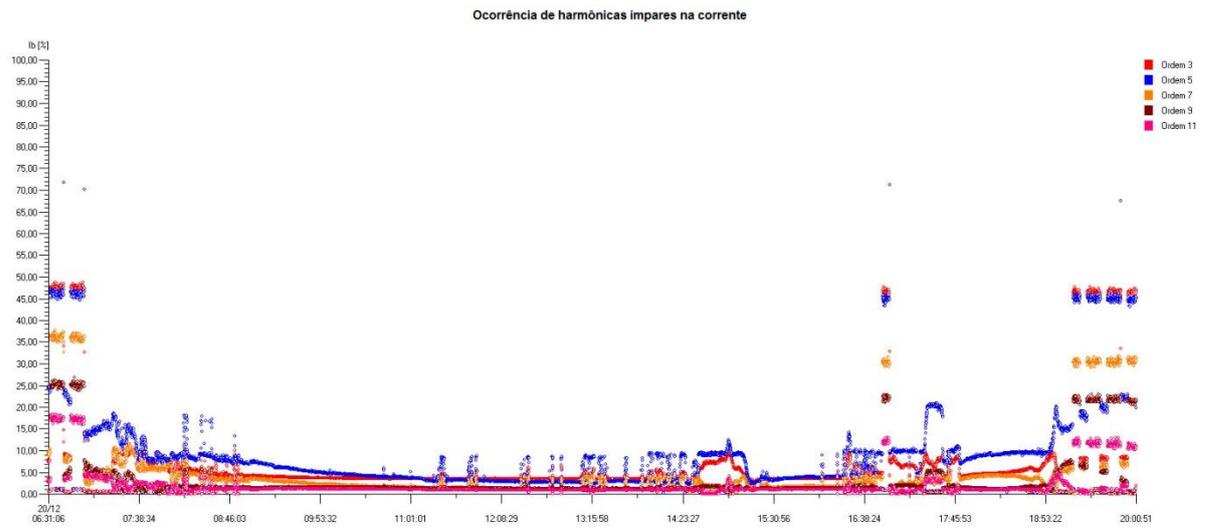


Figura 58 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase B no dia 20/12.

Fonte: Autoria própria.

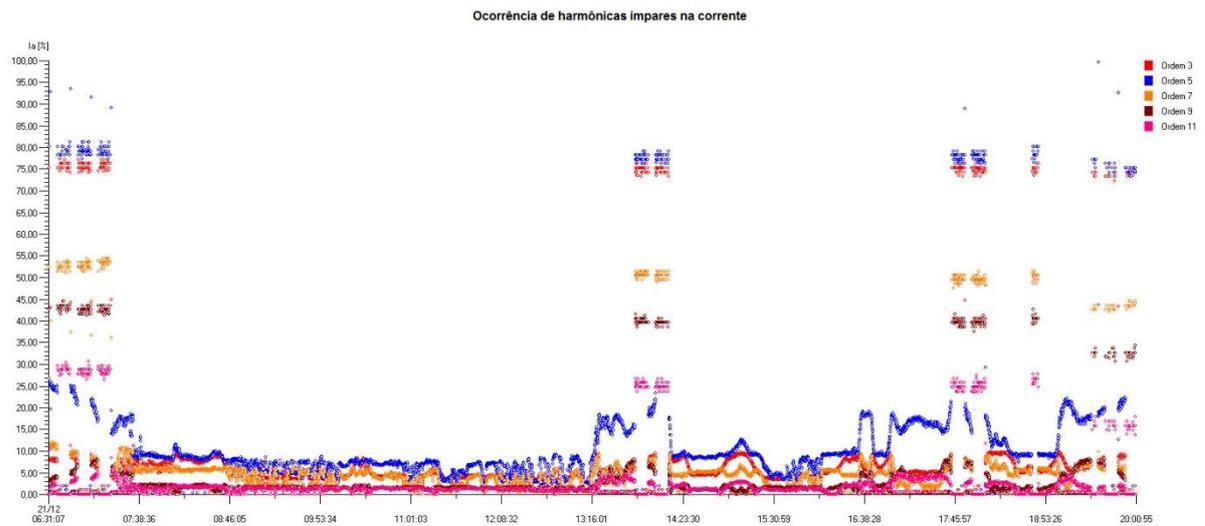


Figura 59 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase A no dia 21/12.

Fonte: Autoria própria.

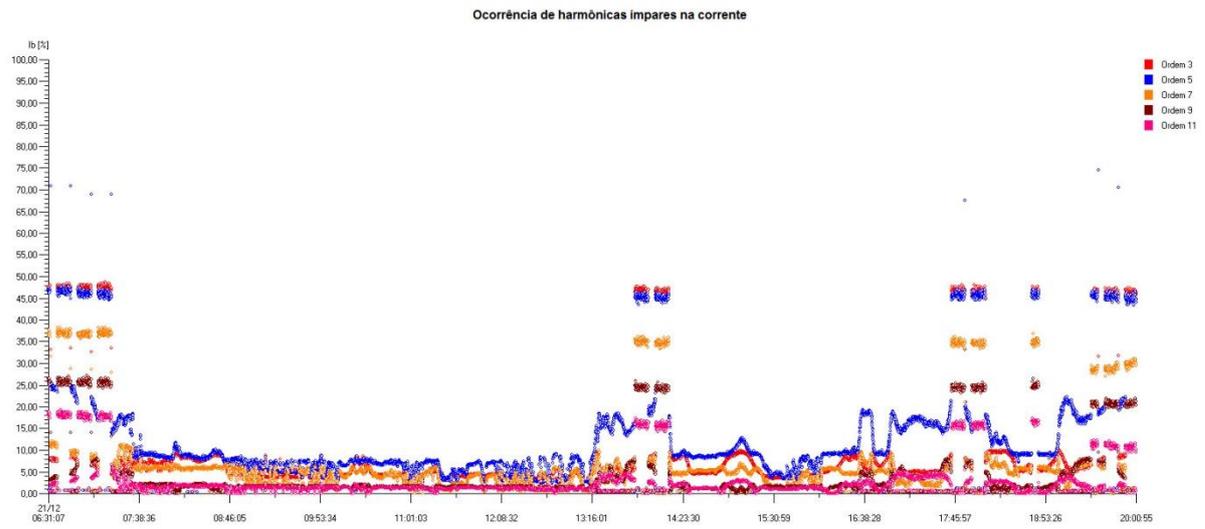


Figura 60 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase B no dia 21/12.

Fonte: Autoria própria.

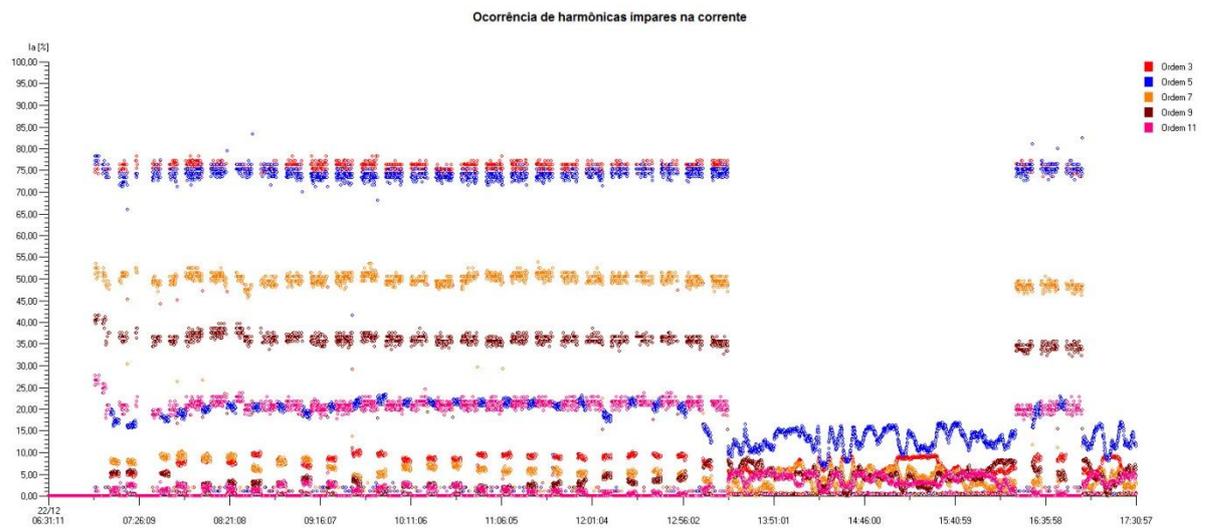


Figura 61 - Ocorrência de harmônicos ímpares na corrente da fase A no dia 22/12.

Fonte: Autoria própria.

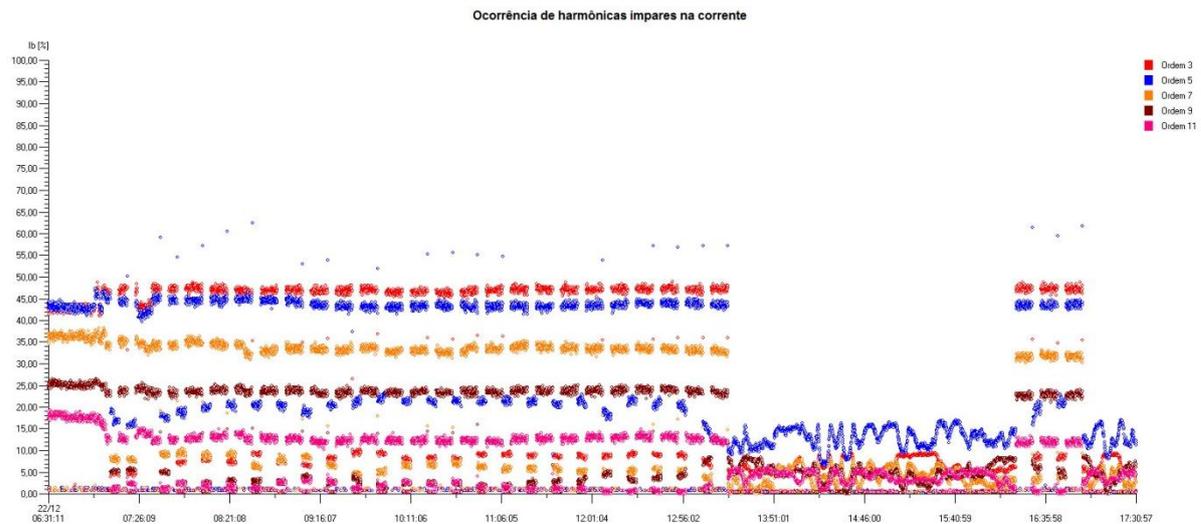


Figura 62 - Ocorrência de harmônicas ímpares na corrente da fase B no dia 22/12.

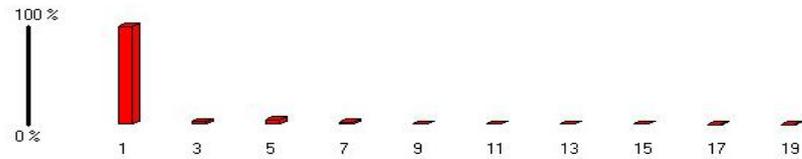
Fonte: Autoria própria.

As imagens 57-62 mostram que em dias onde a geração é menor, as distorções são maiores. O caso é melhor explicado no dia 22, onde o inversor não conseguiu funcionar de maneira correta devido ao clima, fazendo com que altas taxas harmônicas fossem criadas. Embora estas taxas sejam extremamente altas, o valor RMS é baixo, visto que a corrente nestes momentos é próxima a zero.

Ainda nos dados obtidos referentes a harmônicos, foram adquiridas as ordens harmônicas e suas magnitudes, assim como as formas de onda de tensão e corrente de ambas as fases, em diferentes horários do dia. Estes valores e gráficos serão apresentados na figura 63.

Primeiramente, as informações coletadas pela manhã, às 10 horas, indicam uma corrente em volta de 4,5A em ambas as fases. O valor da DHTi é próximo a 6,8% em A e B.

EMBRASUL RE6000/B/H/T/N N.S:96001238 V.S.2.16 ANL 2.24 (500 milissegundos)
Harmônicas de Corrente - fase A / sábado 20/12/2014 09:57:52,00

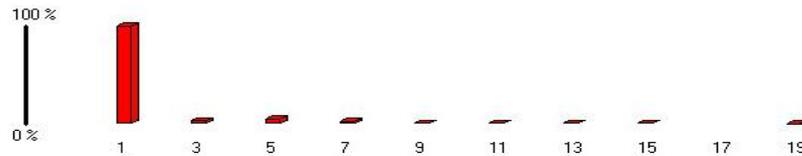


Registro: 10750
RMS: 4.453 (A)
Componentes: 14
DHT: 6,838 %
Fundamental: 60,00 Hz

A fase é exibida em graus

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	4.443	100,00	253,21
3	0,157	3,53	112,14
5	0,214	4,82	34,01
7	0,099	2,22	327,52
9	0,066	1,49	289,81
11	0,052	1,17	217,13
13	0,035	0,79	149,41
15	0,036	0,82	109,16
17	0,018	0,41	30,76
19	0,018	0,39	355,47
21			
23			
25			
27			
29			

EMBRASUL RE6000/B/H/T/N N.S:96001238 V.S.2.16 ANL 2.24 (500 milissegundos)
Harmônicas de Corrente - fase B / sábado 20/12/2014 09:57:52,00



Registro: 10750
RMS: 4.475 (A)
Componentes: 12
DHT: 6,881 %
Fundamental: 60,00 Hz

A fase é exibida em graus

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	4.464	100,00	73,03
3	0,162	3,62	291,84
5	0,216	4,84	214,40
7	0,100	2,23	147,30
9	0,066	1,48	108,72
11	0,052	1,16	38,75
13	0,036	0,80	329,94
15	0,037	0,83	290,39
17			
19	0,018	0,41	177,45
21			
23			
25			
27			
29			

Figura 63 - Harmônicos de corrente em A e B para corrente de 4,5A.

Fonte: Autoria própria.

Na figura 64, as formas de onda de tensão e corrente para ambas as fases na seguinte ordem: Sinal de tensão na fase A, sinal de corrente na fase A, sinal de tensão na fase B e sinal de corrente na fase B.

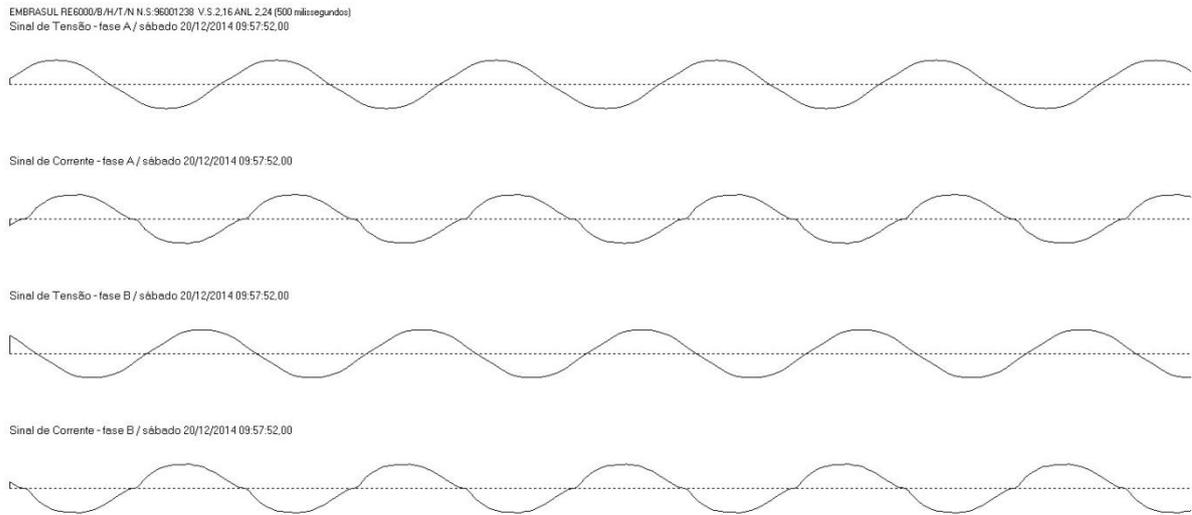


Figura 64 - Formas de onda de tensão e corrente em A e B para DHTi de 6,8%.

Fonte: Autoria própria.

O começo da tarde do dia 21 foi onde os maiores valores de corrente foram observados, em torno de 8,5A. As figuras 65 e 66 apresentam os dados referentes a este horário:

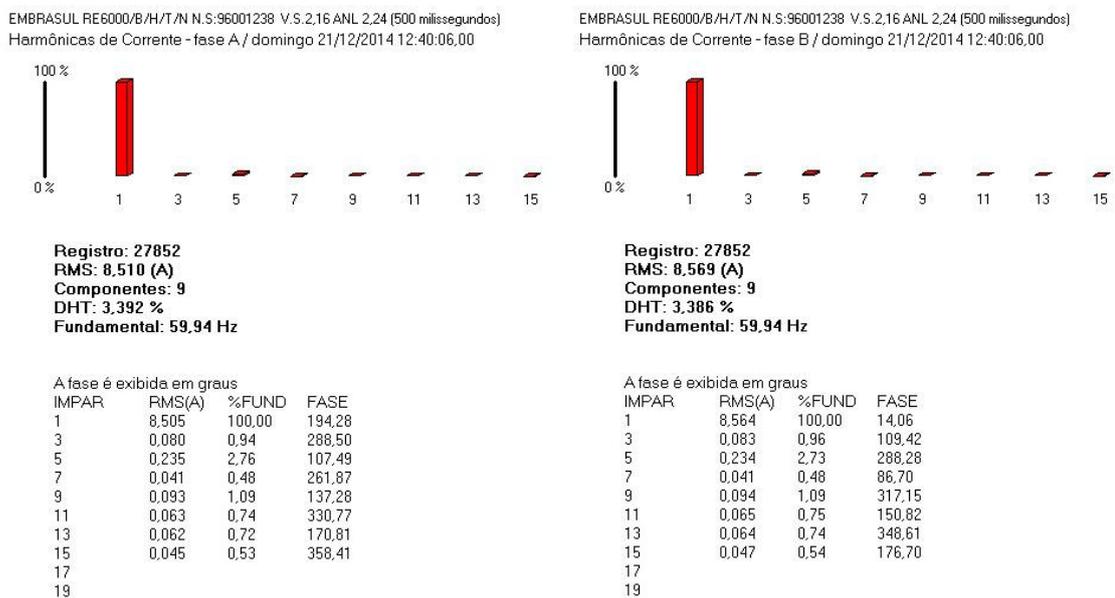


Figura 65 - Harmônicos de corrente em A e B para corrente de 8,5A.

Fonte: Autoria própria.

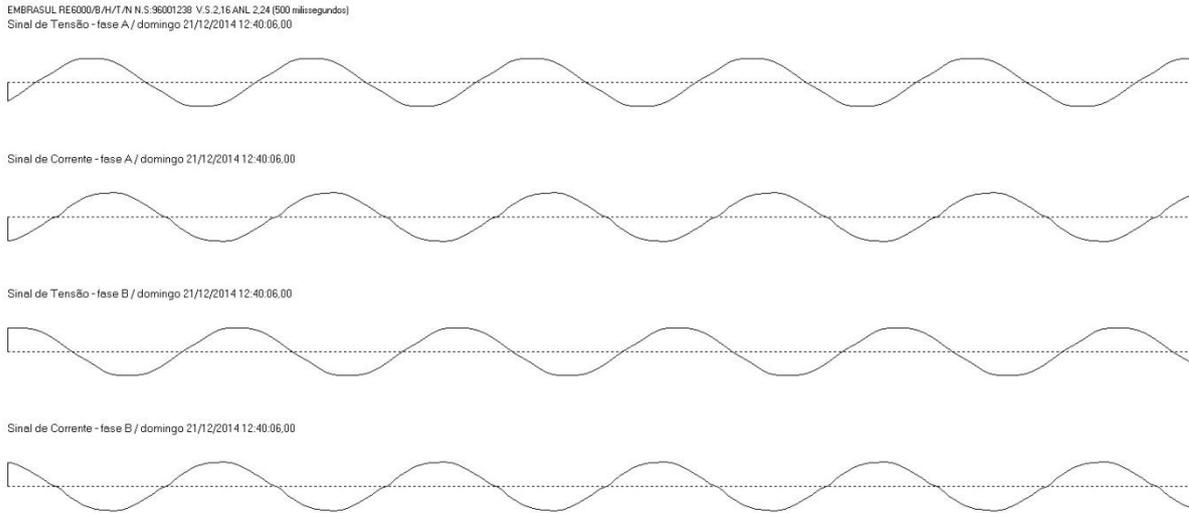


Figura 66 - Formas de onda de tensão e corrente em A e B para DHTi de 3,4%.

Fonte: Autoria própria.

Complementando com os dados obtidos ao final da tarde, onde próximo das 19 horas os valores da corrente estavam abaixo de 1A.

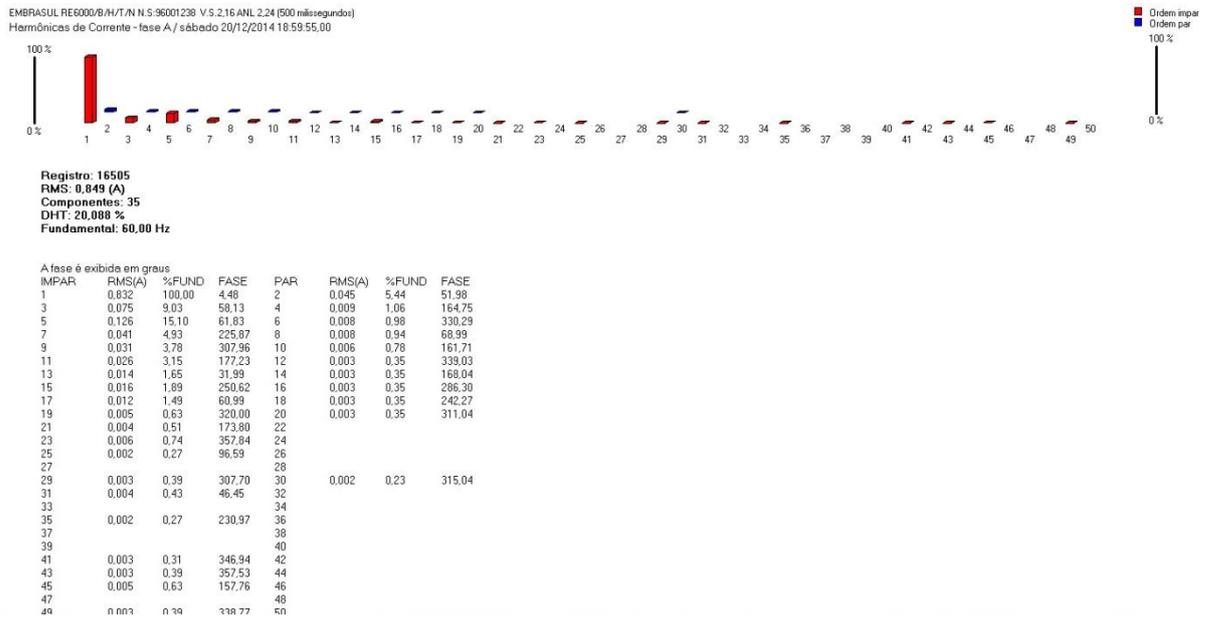


Figura 67 - -- Harmônicos de corrente em A para corrente de 0,85A.

Fonte: Autoria própria.

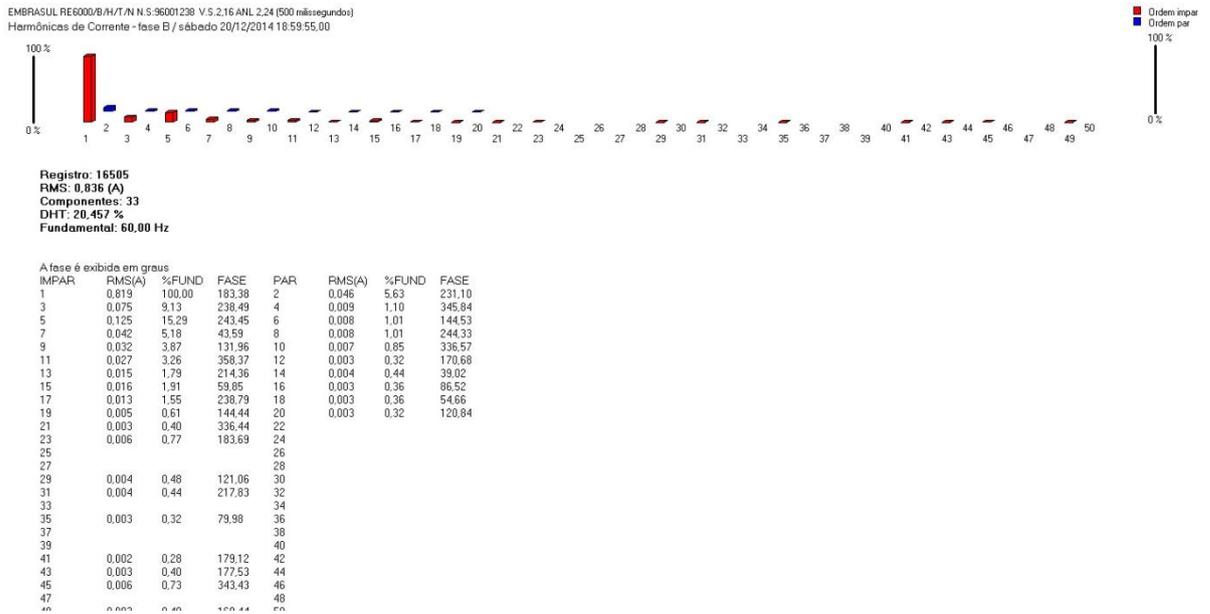


Figura 68 - Harmônicos de corrente em B para corrente de 0,85A.

Fonte: Autoria própria.

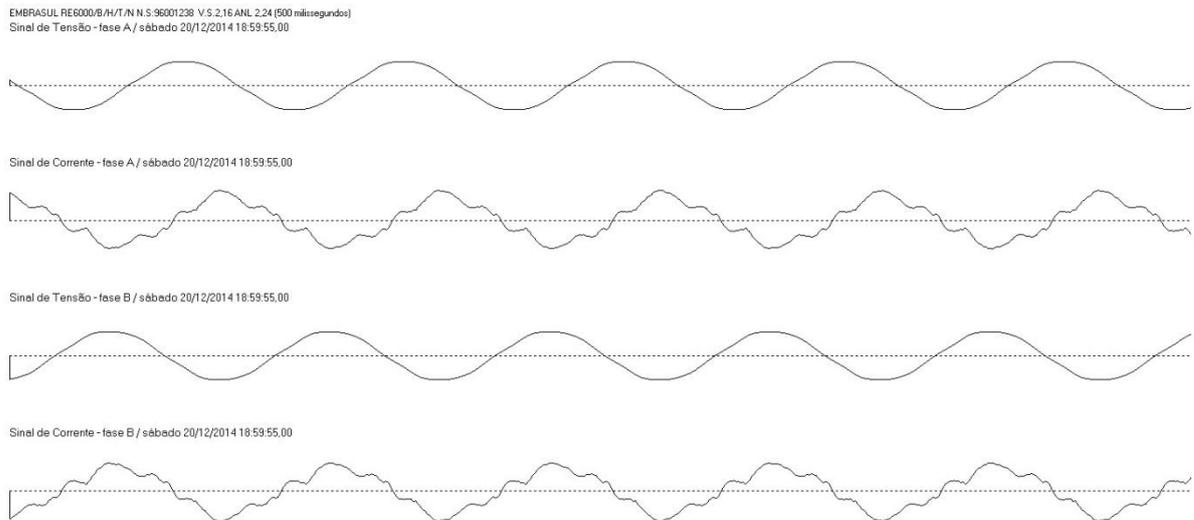


Figura 69 - Formas de onda de tensão e corrente em A e B para DHTi de 20%.

Fonte: Autoria própria.

Neste último caso é facilmente notado que para correntes baixas, as distorções são elevadas quando comparadas com a fundamental. Além da forma de onda distorcida, também percebe-se a presença de harmônicos até a 50ª ordem, pares e ímpares.

3.2.1 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com a medição de 72 horas, foi possível observar alguns comportamentos do SFCR do EV em relação as distorções harmônicas.

O principal comportamento que pode ser observada é a relação entre a corrente e a distorção harmônica. Esta relação mostra que, para valores de corrente, e conseqüentemente potência, próximos aos nominais do inversor, a taxa de distorção harmônica é baixa, e à medida que a corrente vai diminuindo, a distorção relativa ao seu valor absoluto aumenta.

As Figura 70 e 71 ilustram esta relação:

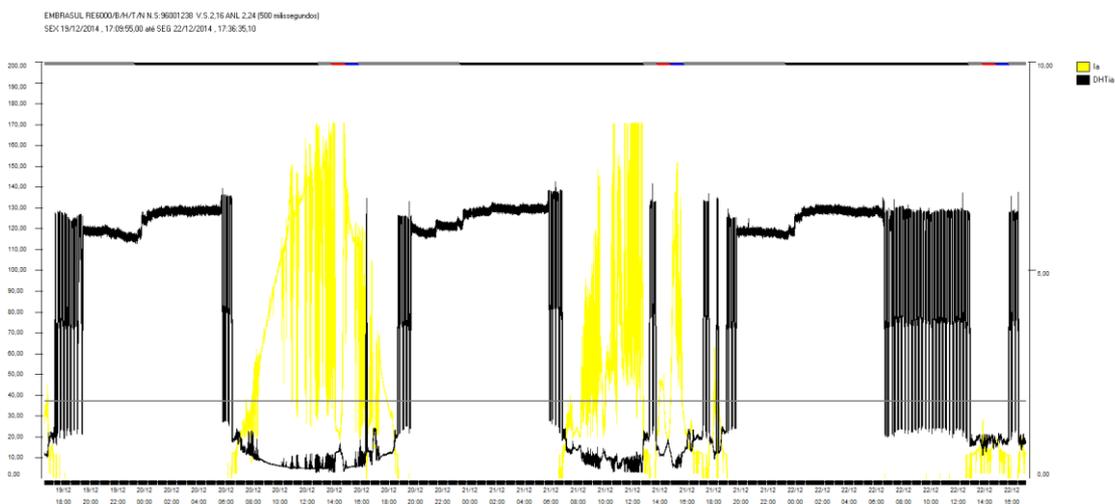


Figura 70 - Relação entre corrente e THDi na fase A.

Fonte: Autoria própria.

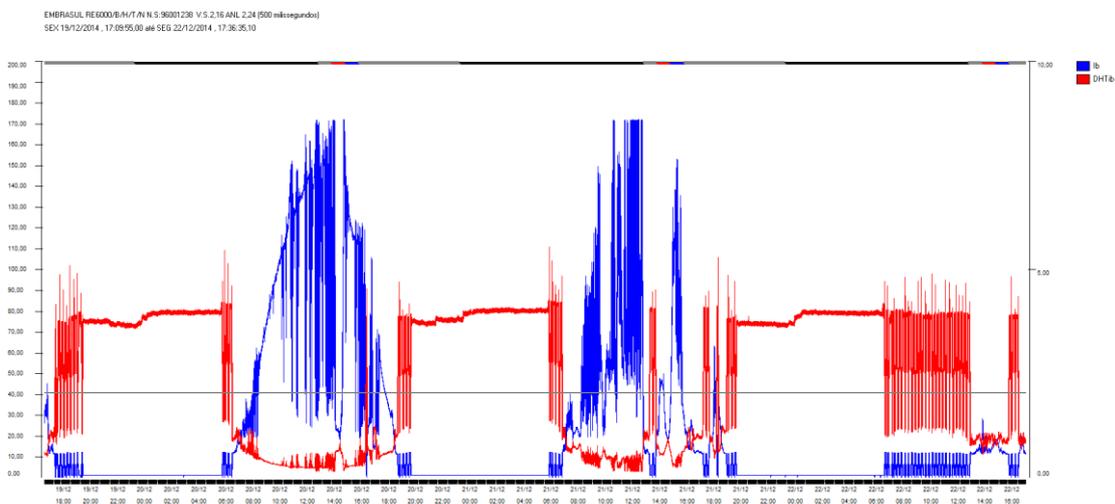


Figura 71 - Relação entre corrente e THDi na fase B.

Fonte: Autoria própria.

Este comportamento é confirmado na análise dos harmônicos, suas ordens e magnitudes. Corrente próxima a nominal possui uma baixa taxa de distorção e uma quantidade menor de ordens harmônicas.

A mesma relação não pôde ser observada nas tensões. Em nenhuma das fases é perceptível alguma relação entre o valor absoluto e a taxa de distorção harmônica.

As Figura 72 e 73 apresentam estes comportamentos para a tensão:

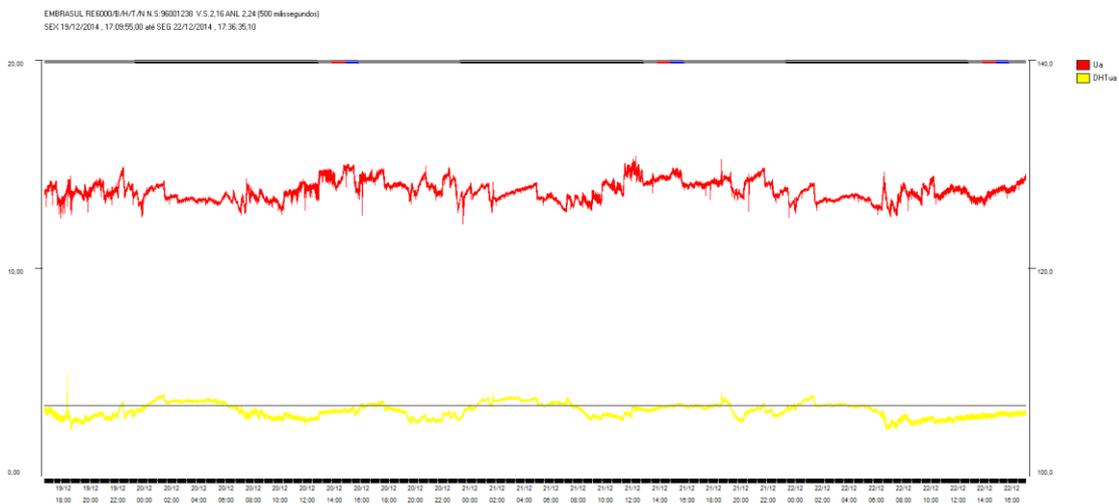


Figura 72 - Relação entre tensão e THDu na fase A.

Fonte: Autoria própria.

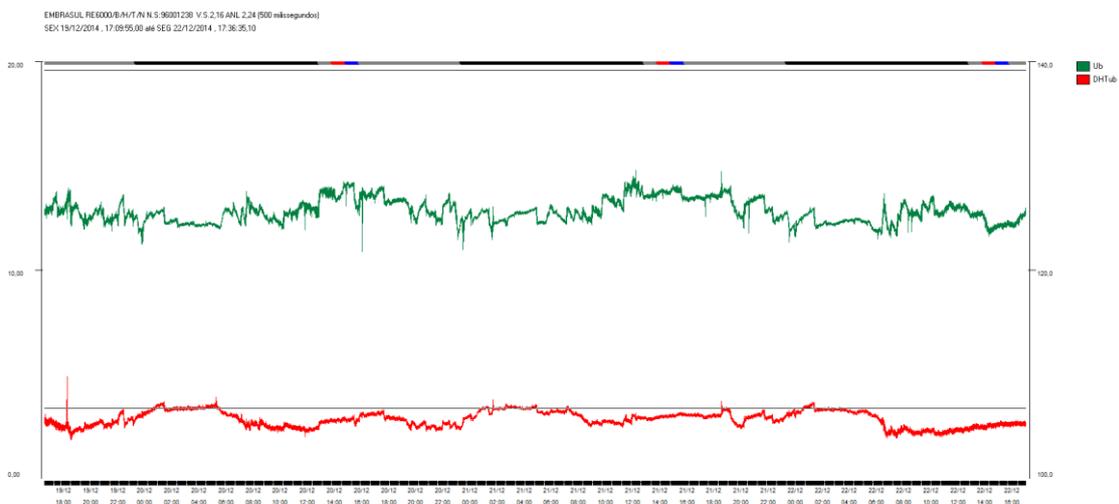


Figura 73 - Relação entre tensão e THDu na fase B.

Fonte: Autoria própria.

3.2.2 MEDIÇÃO POR DUAS SEMANAS

Durante o período de 22 de Dezembro de 2014 e 5 de Janeiro de 2015, foram realizadas novas medições no SFCR do EV. Desta vez, o equipamento fez a aquisição de dados por 14 dias, aproximadamente 336 horas.

Como a duração destes testes foi significativamente maior que o anterior, algumas mudanças nos parâmetros do RE6000 foram necessárias. O intervalo de integração foi aumentado de 500ms para 1000ms, e o registro de harmônicos também foi aumentado, para um registro de harmônicos a cada 15 registros de grandezas RMS. Com estas modificações, a memória interna do RE6000 possuía uma capacidade para armazenar os dados ininterruptamente de até 16 dias.

Os 14 dias colhendo dados resultaram em um arquivo .emb de 204 *Megabytes*.

Durante este período, a energia gerada segundo os dados contidos na memória de massa do inversor foi de 87kWh. A tabela 15 e a figura 74 mostram a energia gerada diariamente durante o teste:

Tabela 15 - Energia gerada diariamente pelo SFCR do EV.

Dia	Energia Gerada
22/12/2014	0 kWh
23/12/2014	3 kWh
24/12/2014	3 kWh
25/12/2014	7 kWh
26/12/2014	9 kWh
27/12/2014	7 kWh
28/12/2014	7 kWh
29/12/2014	5 kWh
30/12/2014	9 kWh
31/12/2014	6 kWh
01/01/2015	8 kWh
02/01/2015	8 kWh
03/01/2015	3 kWh
04/01/2015	6 kWh
05/01/2015	6 kWh
Total	87 kWh

Fonte: Autoria própria.

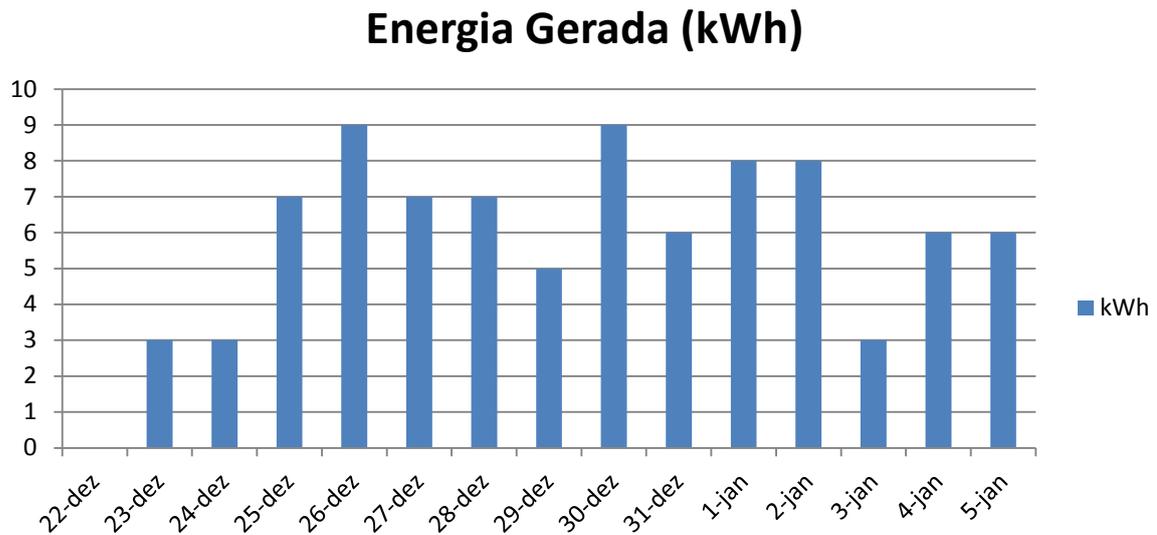


Figura 74 - Energia gerada diariamente pelo SFCR do EV.

Fonte: Autoria própria

Pelo relatório geral criado pelo software ANL6000, o valor total gerado foi igual a 85,646 kWh, próximo a valor da memória de massa.

Total	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh
40,034	0,000	27,356	48,488	
45,611	0,000	-18,300	49,145	
0,000	0,000	0,000	0,000	
85,646	0,000	9,056	86,123	

Figura 75 - Energia gerada pelo SFCR do EV durante a medição.

Fonte: Autoria própria.

Ainda com os valores da memória de massa do inversor, foi possível comparar as leituras de potência gerada pelo SFCR do RE6000 com a leitura do inversor. As medições mostram os mesmos resultados. Os dois gráficos ilustrados pelas figuras 76 e 77 apresentam os resultados, do inversor e do analisador, respectivamente:

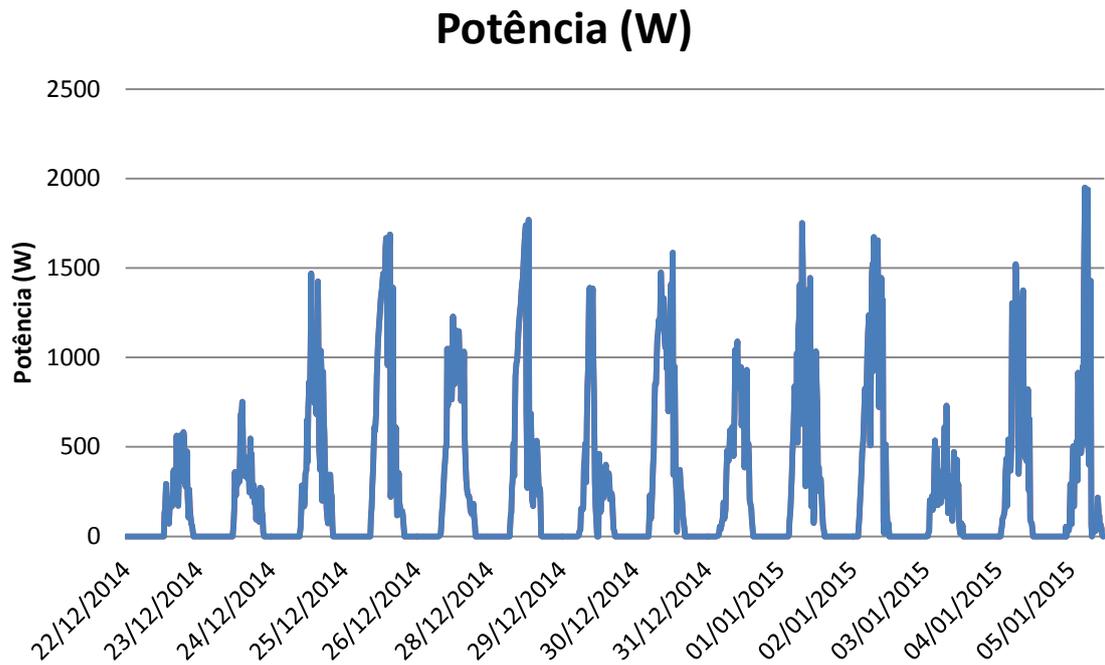


Figura 76 – Potência gerada pelo SFCR do EV (Memória do inversor).

Fonte: Autoria própria.

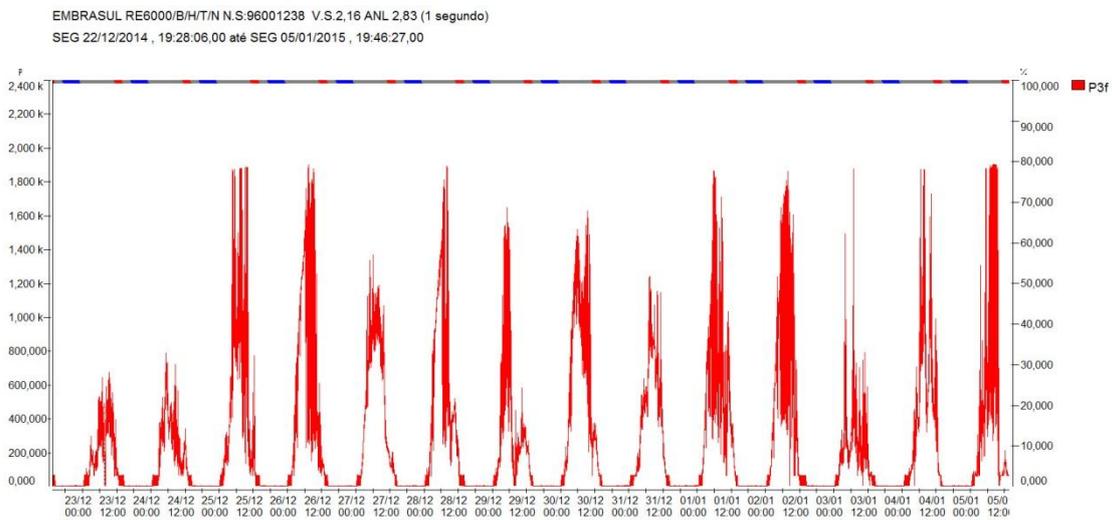


Figura 77 – Potência gerada pelo SFCR do EV (RE6000)

Fonte: Autoria própria.

Separando-se a potência total apresentada no gráfico da figura 77 em suas fases, temos os gráficos mostrados nas figuras 78 e 79:

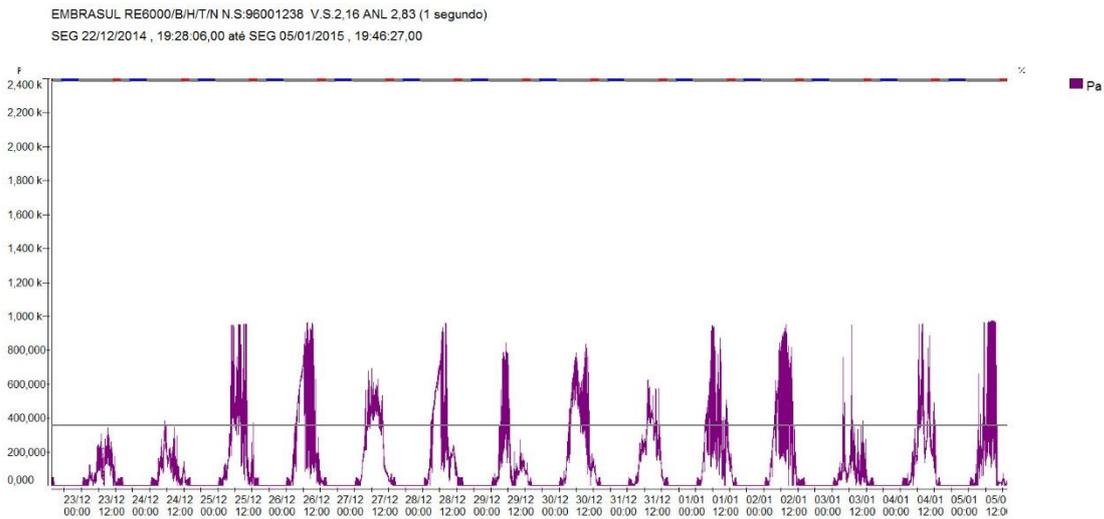


Figura 78 - Potência gerada na fase A do SFCR do EV

Fonte: Autoria própria.

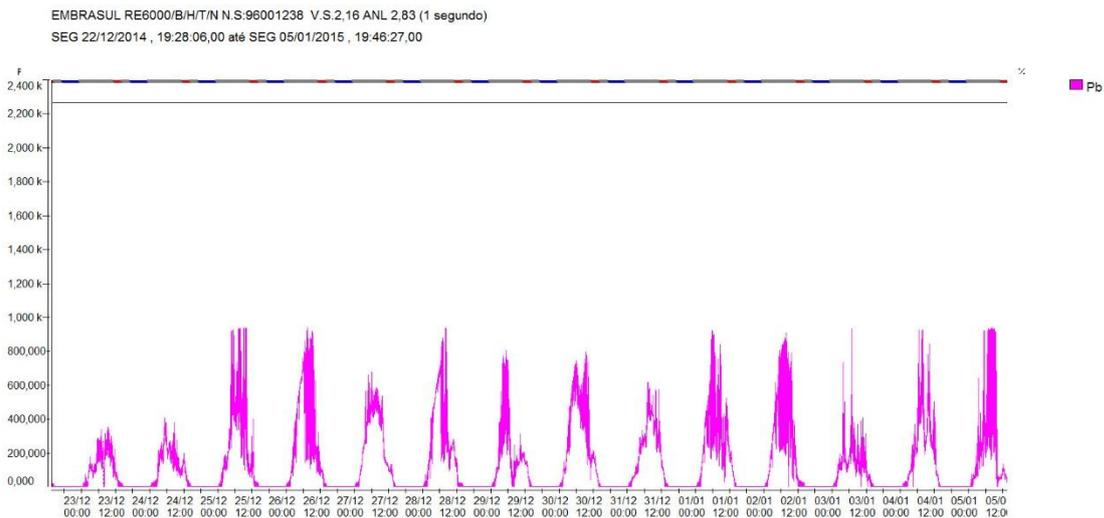


Figura 79 - Potência gerada na fase B do SFCR do EV

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado comparando-se as figuras 78 e 79, não existem grandes diferenças entre as fases A e B. As formas de onda da potência ativa em ambas as fases são praticamente iguais.

Considerando que a potência é resultante do produto entre tensão e corrente elétrica, estas duas grandezas também terão seu comportamento analisado.

Primeiramente é apresentado o resultado do comportamento das tensões A, B e AB durante todas as 336 horas nas quais o analisador de energia esteve

realizando as medições. Durante todas estas horas as tensões mantiveram-se em níveis constantes, embora os valores na fase A fosse ligeiramente superiores aos encontrados na fase B.

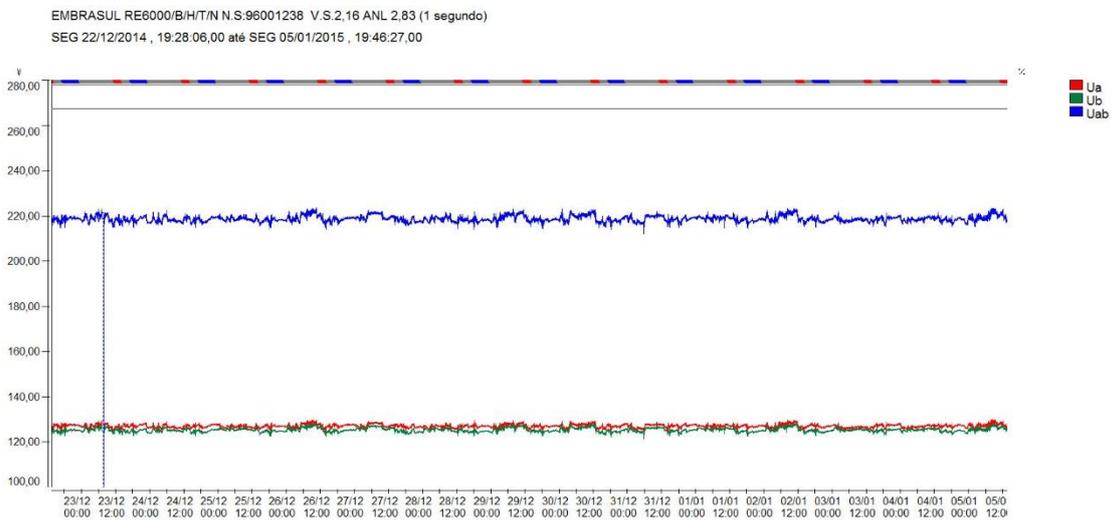


Figura 80 – Tensões A, B e AB.

Fonte: Autoria própria.

Utilizando-se a ferramenta Distribuição de tensões do software ANL6000, obteve-se os seguintes dados:

Tabela 16 - Dados das tensões A e B.

	Ua	Ub
Total de leituras	1210139	1210139
Leituras zero	0 – 0,00%	0 – 0,00%
Leituras válidas	1210137 (100,00%)	1210137 (100,00%)
Leituras adequadas	1210137 (100,00%)	1210137 (100,00%)
Leituras precárias (inferior)	0 – 0,00%	0 – 0,00%
Leituras precárias (superior)	0 – 0,00%	0 – 0,00%
Leituras precárias (total)	0 – 0,00%	0 – 0,00%
Leituras críticas (inferior)	0 – 0,00%	0 – 0,00%
Leituras críticas (superior)	0 – 0,00%	0 – 0,00%
Leituras críticas (total)	0 – 0,00%	0 – 0,00%
Tensão média	127,22 V	125,47 V
Tensão mínima	123,40 V	121,35 V
Tensão máxima	129,98 V	128,55 V

Fonte: Autoria própria.

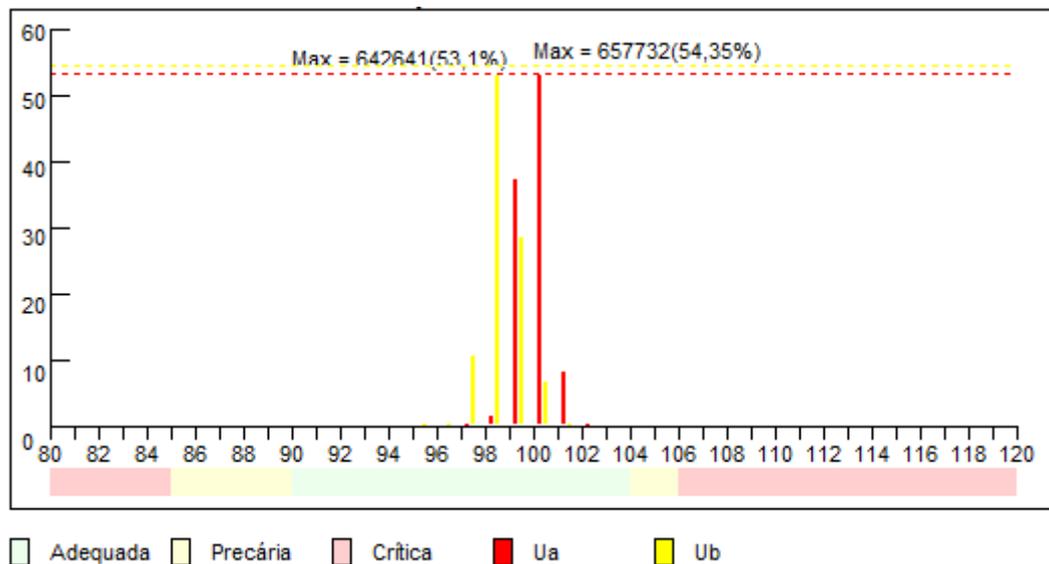


Figura 81 – Distribuição gráfica das tensões A e B

Fonte: Autoria própria

Para a figura 81, as categorias foram definidas de acordo com as seguintes porcentagens:

Tabela 17 - Faixas de variação para classificação das tensões.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$91,0\% \leq U \leq 104,0\%$
Precária	$86,0\% \leq U < 91,0\%$ ou $104,0\% < U \leq 106,0\%$
Crítica	$U < 86,0\%$ ou $U > 106,0\%$

Fonte: Autoria própria, adaptado de PRODIST

A definição de valores adequados, precários e críticos foi baseada no módulo 8 do PRODIST, revisão 6, anexo I – “Faixas de Classificação de Tensões – Tensões de Regime Permanente”.

Para os valores das tensões do SFCR do EV, inferiores a 1 kV (220/127), temos as seguintes classificações:

Tabela 18 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202)$ ou $(231 < TL \leq 233)$ $(110 \leq TL < 117)$ ou $(133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(191 < TL$ ou $TL > 233) / (TL < 110$ ou $TL > 135)$

Fonte: PRODIST, Módulo 8, Revisão 6.

Configurando a escala de tensão para utilizar faixas de cores para a classificação das tensões, pode-se observar graficamente que durante todo o período as tensões foram classificadas como adequada.

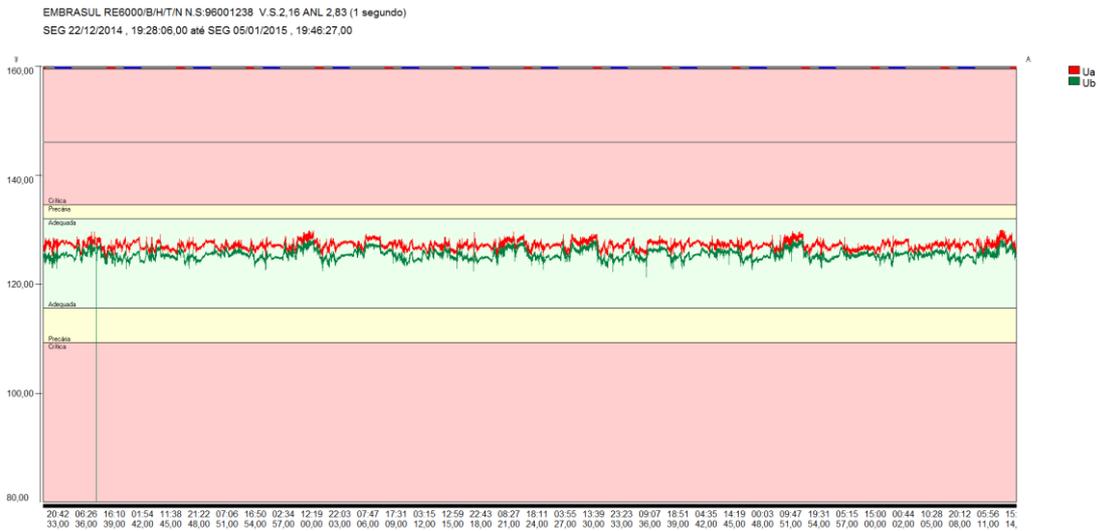


Figura 82 – Gráfico das tensões A e B com classificações.

Fonte: Autoria própria.

Para a corrente elétrica, o seu comportamento durante as duas semanas foram distintos ao das tensões. Nas figuras 83 e 84 são apresentados os valores eficazes da corrente para as fases A e B:

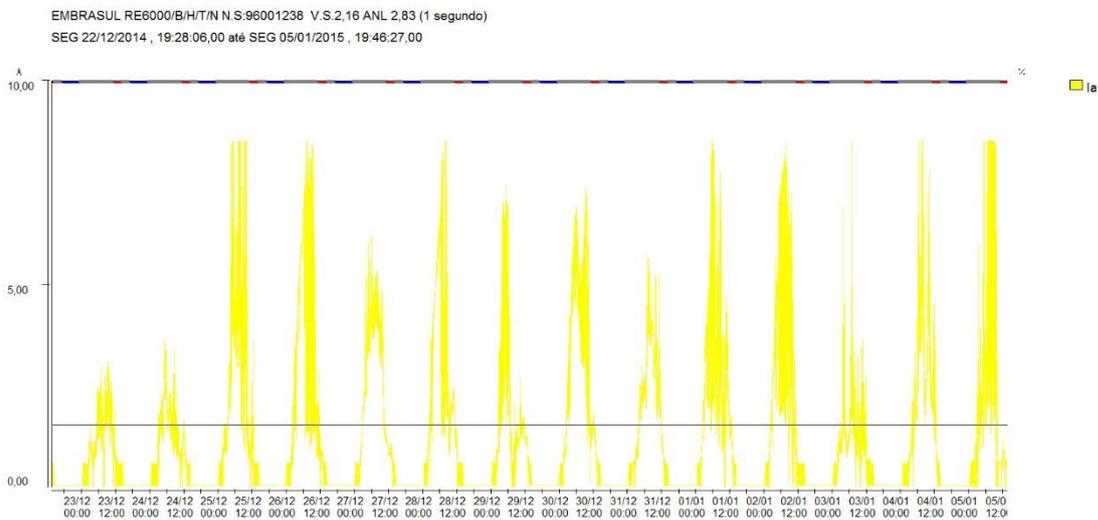


Figura 83 – Corrente na fase A no período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.

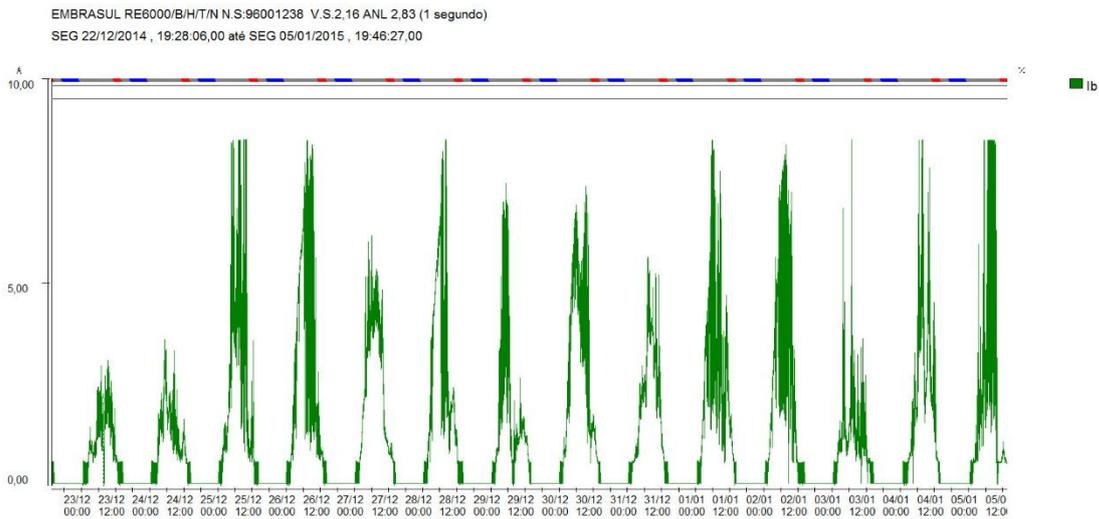


Figura 84 – Corrente na fase B no período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.

Embora as duas correntes apresentem desempenhos parecidos, existe uma diferença considerável de um dia para outro. A seguir os valores médios para a corrente também são apresentados:

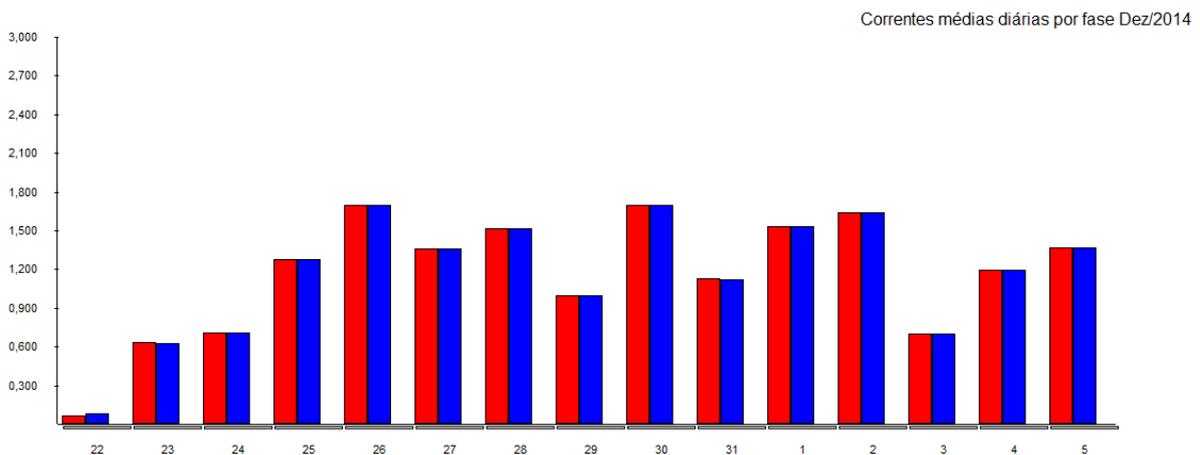


Figura 85 – Correntes médias diárias no período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.

Em relação as distorções, primeiramente serão apresentados as taxas de distorção das tensões, tanto para a total como para as individuais.

As DHTu nas fases A e B são mostradas abaixo, em escala de 0 a 100%:

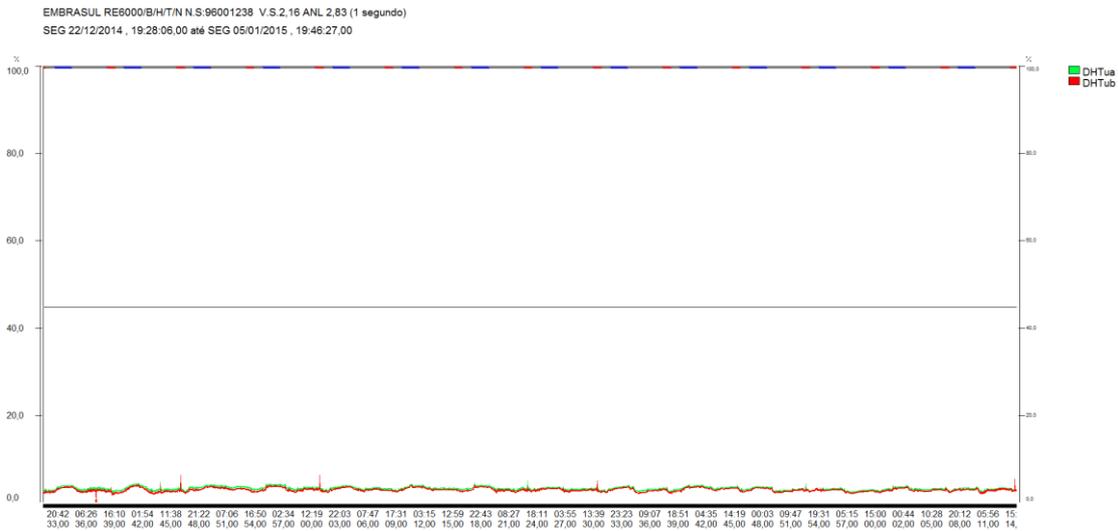


Figura 86 – DHTu nas fases A e B no período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.

As distorções de tensão restringiram-se ao intervalo entre 1,72% e 4,44%, registradas nos dias 03 de Janeiro e 29 de Dezembro, respectivamente.

Plotando-se as curvas de tensão e de DHT de tensão na fase, obtemos a figura 87. Comparando as curvas, não é possível encontrar uma relação entre as duas.

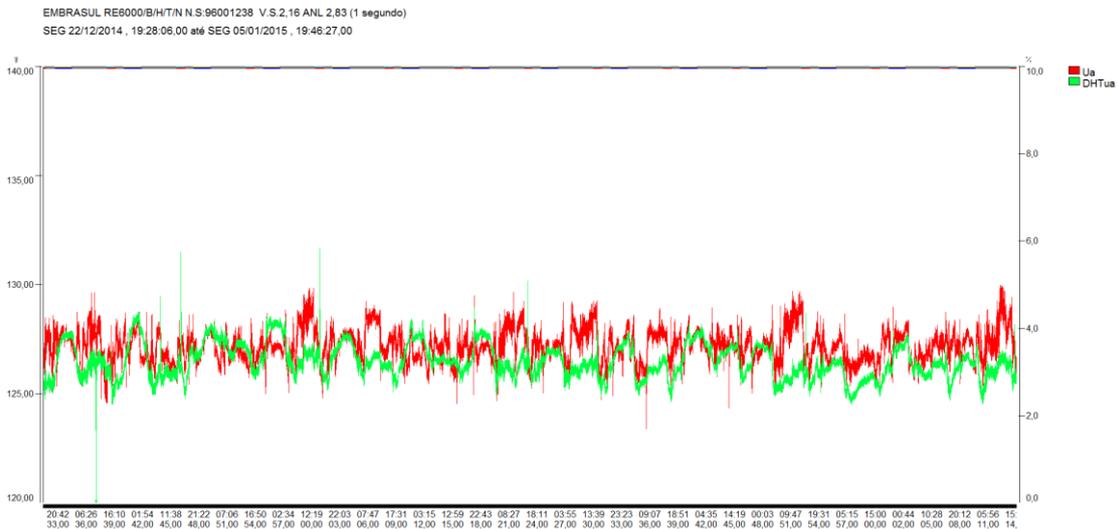


Figura 87 – Tensão e DHTu na fase A no período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.

Segundo o PRODIST, módulo 8, revisão 6, os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão são os seguintes:

Tabela 19 – Limites para DHT de tensão.

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10%
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8%
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6%
$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	3%

Fonte: Autoria própria (adaptado de PRODIST)

Considerando-se as grandezas do SFCR do EV, os valores encontrados para as DHTu nas fases A e B encontram-se de acordo com as regulamentações do PRODIST.

Na mesma seção do PRODIST, temos a regulamentação para os níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão, relativas ao componente fundamental.

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$		$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Figura 88 – Tabela com os limites de DHI de tensão.

Fonte: PRODIST.

Com base na tabela contida na figura 88, os dados referentes aos harmônicos, suas ordens e magnitudes são apresentados a seguir.

Segundo o Relatório Global de harmônicas gerado pelo ANL6000, temos indicados quais registros possuíram as maiores taxas de distorção e os maiores números de ordens harmônicas. Estes registros são apresentados nas figuras 89 e 90.

EMBRASUL RE6000/B/H/T/N N.S:96001238 V.S.2,16 ANL 2,83 (1 segundo)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase A
Número total de registros 72225

Registro com maior DHT
Registro 32285 00:12:13,00 de 29/12/2014
DHT calculada: 4,44 %
Registro com menor DHT
Registro 59982 10:38:19,00 de 03/01/2015
DHT calculada: 2,26 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 138 19:37:03,00 de 22/12/2014
Número de componentes harmônicas 6
Registro com menor no. de componentes
Registro 70005 09:24:56,00 de 05/01/2015
Número de componentes harmônicas 3

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 136 19:36:33,00 de 22/12/2014
Harmônica de mais alta ordem 11

Sinal considerado: Tensão - fase B
Número total de registros 72225

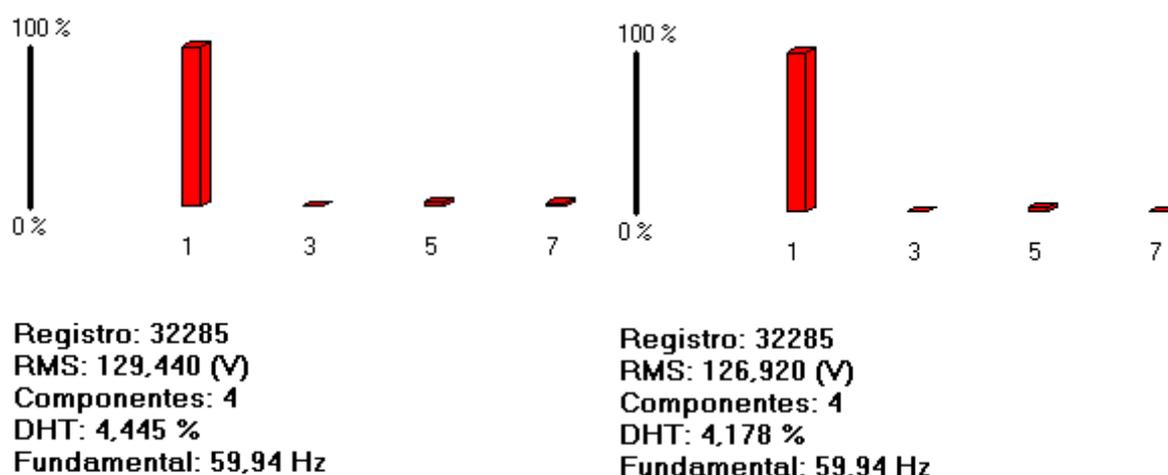
Registro com maior DHT
Registro 32285 00:12:13,00 de 29/12/2014
DHT calculada: 4,17 %
Registro com menor DHT
Registro 5257 19:18:32,00 de 23/12/2014
DHT calculada: 1,72 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 3684 11:54:52,00 de 23/12/2014
Número de componentes harmônicas 6
Registro com menor no. de componentes
Registro 15143 16:48:19,00 de 25/12/2014
Número de componentes harmônicas 3

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 3684 11:54:52,00 de 23/12/2014
Harmônica de mais alta ordem 11

Figura 89 – Relatório Global de harmônicas do período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.



A fase é exibida em graus

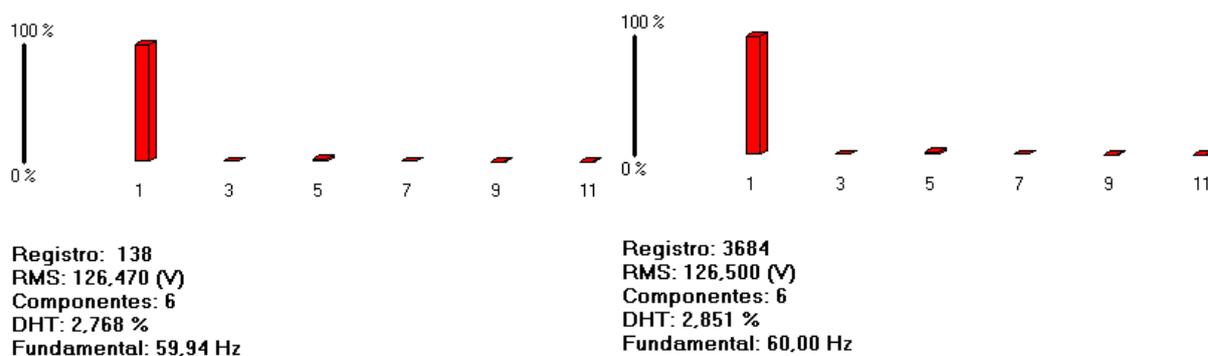
IMPARG	RMS(V)	%FUND	FASE
1	129,312	100,00	152,66
3	1,613	1,24	46,14
5	4,953	3,83	181,23
7	2,428	1,87	223,59
9			
11			

A fase é exibida em graus

IMPARG	RMS(V)	%FUND	FASE
1	126,809	100,00	272,63
3	1,240	0,97	327,43
5	4,654	3,67	50,40
7	2,206	1,73	345,67
9			
11			

Figura 90 – Registros com maior distorção nas fases A e B, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.



A fase é exibida em graus

IMPARG	RMS(V)	%FUND	FASE
1	126,421	100,00	321,63
3	1,564	1,23	176,39
5	2,754	2,17	299,48
7	1,352	1,06	343,91
9	0,407	0,32	274,52
11	0,472	0,37	40,64
13			

A fase é exibida em graus

IMPARG	RMS(V)	%FUND	FASE
1	126,449	100,00	39,77
3	1,015	0,80	17,09
5	3,253	2,57	352,26
7	0,902	0,71	193,53
9	0,580	0,45	262,48
11	0,483	0,38	220,91
13			

Figura 91 - Registro com maior número de componentes harmônicos nas fases A e B, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

Em nenhum destes registros foi encontrado algum harmônico de ordem par.

Considerando-se as grandezas do SFCR do EV e os harmônicos de tensão encontrados, as tensões das fases A e B encontram-se de acordo com as regulamentações do PRODIST.

Não foram encontrados nenhum registro de sag ou de swell.

As distorções de corrente, diferentemente das de tensão, mostraram-se com grande variação no decorrer das medições. Nas figuras 92 e 93 estas variações podem ser observadas:

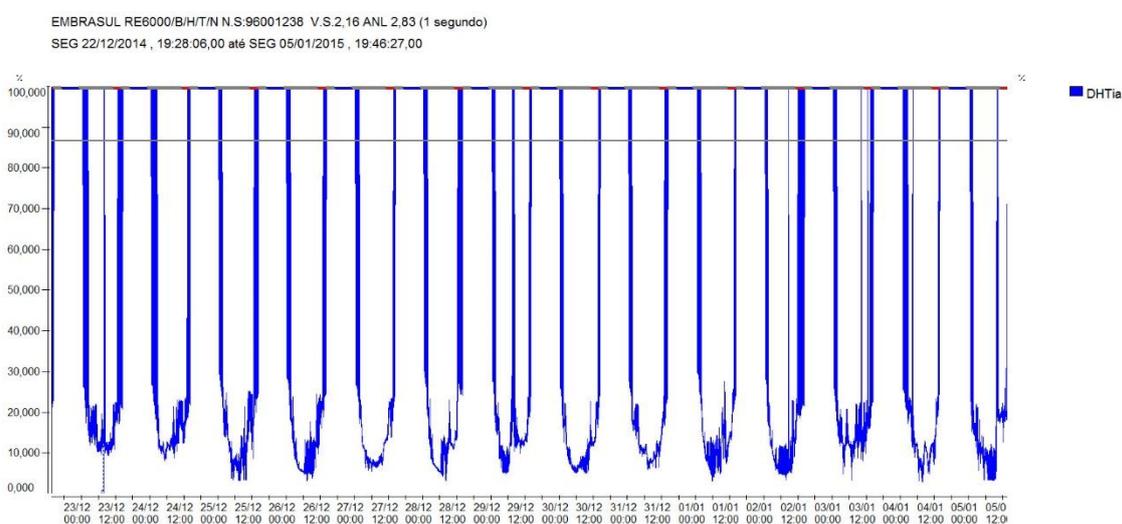


Figura 92 – DHT de corrente na fase A no período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.

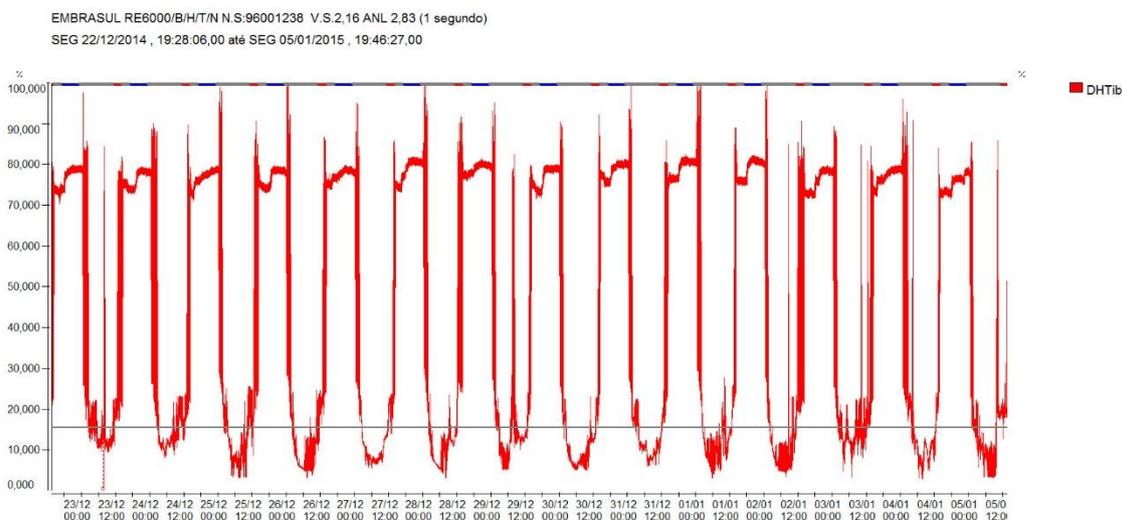


Figura 93 - DHT de corrente na fase B no período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.

Novamente as fases A e B possuem um comportamento muito parecido. Este comportamento é diretamente influenciado pelo valor absoluto da corrente de fase. Colocando os gráficos da corrente e da DHTi da fase B no mesmo gráfico, é possível fazer esta relação.

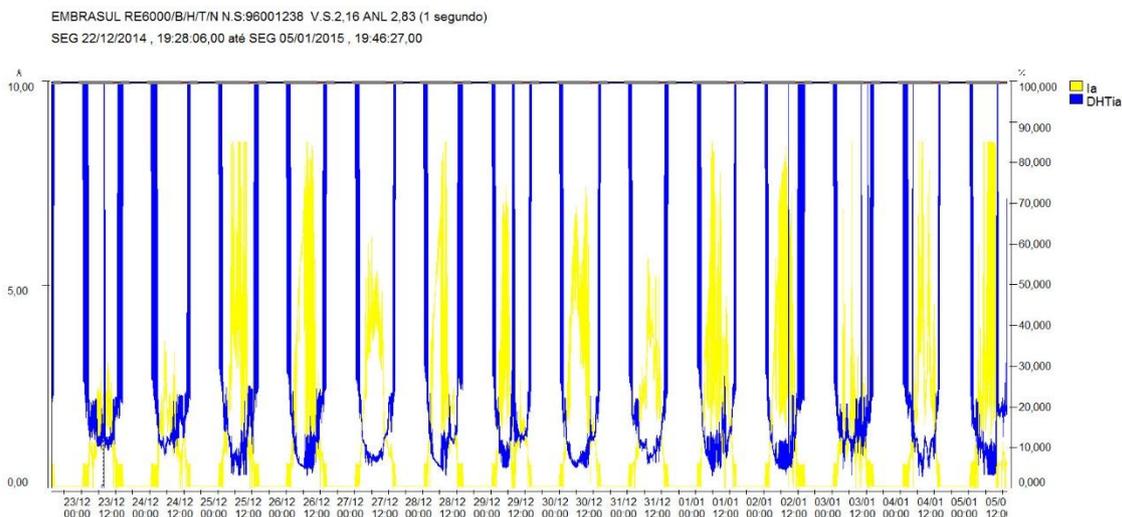


Figura 94 – Corrente e DHTi na fase A no período de 22/12 até 05/01.

Fonte: Autoria própria.

À medida que temos uma maior corrente, temos a diminuição da distorção total de corrente. Ao isolarmos um dia de medição é possível observar este

fenômeno no decorrer do dia. O dia escolhido foi 01 de Janeiro. O gráfico da irradiação sobre Curitiba durante este dia é apresentado na figura 95 (não contempla variações climáticas):

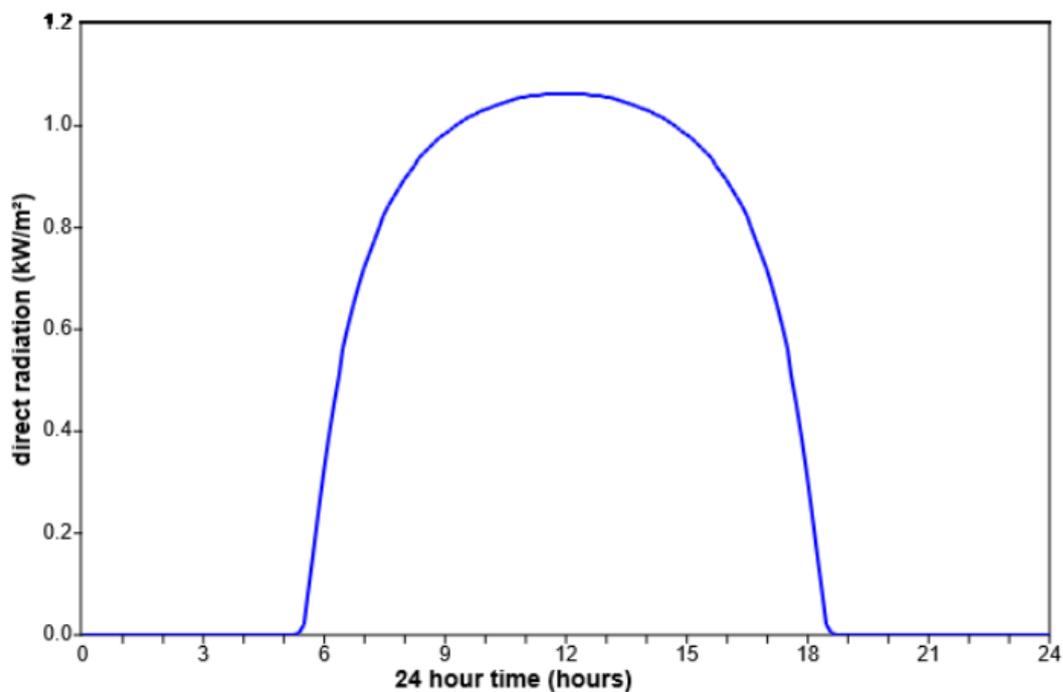


Figura 95 – Irradiância em Curitiba para o dia 01/01.

Fonte: Pveducation.

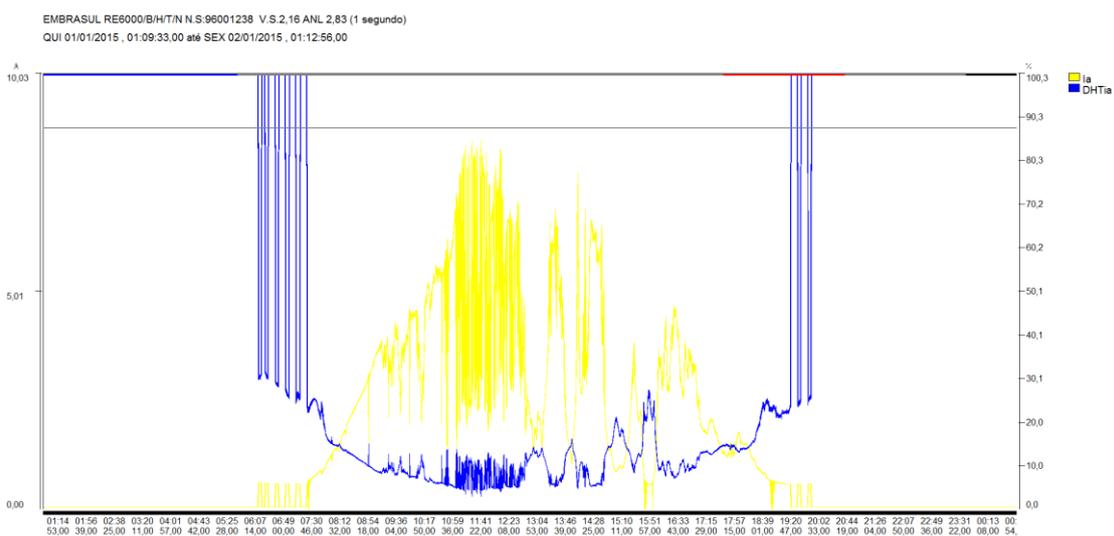


Figura 96 – Corrente e DHTi na fase A no dia 01/01.

Fonte: Autoria própria.

Pela parte da manhã, tem-se o aumento da corrente a medida que a irradiação também aumenta. No período entre 11:00 e 15:00 tem-se a maior irradiação, logo a corrente também é maior, assim como a potência. Chegando próximo ao fim da tarde, com a diminuição da incidência solar sobre os módulos, a corrente e a potência também diminuem. O comportamento da distorção harmônica total é exatamente o oposto disso, sendo as taxas de distorção nas fases A e B mais altas durante a manhã e à tarde.

Um ponto interessante a ser observado é o que acontece durante as horas de menor irradiação do dia. Nos períodos entre 6:20 até 7:40 e 19:40 até 20:10, o inversor apresenta certa intermitência de funcionamento, ficando ligado por cinco minutos e desligado por mais cinco minutos. Durante os cinco minutos em que fica desligado, uma mensagem de erro é mostrada no display do inversor. Esta mensagem (*Fault 0200 0000 Power Low*) indica que a potência gerada pelo SFCR foi inferior a 60W por cinco minutos, não sendo suficiente para manter o funcionamento do inversor.

Para as distorções harmônicas individuais de corrente, o Relatório Global de harmônicas do *software* não poderá ser usado, visto que quando o inversor não está gerando, a corrente é muito próxima de zero e os harmônicos são extremamente elevados, chegando até a 146,78% com todas as 50 componentes lidas pelo analisador. A figura 97 mostra os componentes harmônicos juntamente com as formas de onda de corrente para uma distorção de 146%, registrado as 19:35 do dia 03 de Janeiro. O valor RMS desta corrente foi de 0,175A.

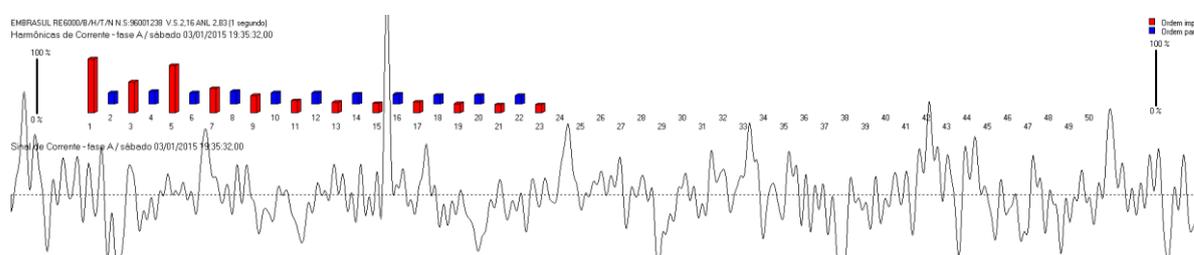


Figura 97 – Harmônicos e forma de onda de corrente para DHTi de 146%.

Fonte: Autoria própria.

Assim, serão apresentados gráficos mostrando o comportamento das principais ordens harmônicas de corrente, juntamente com a análise durante um dia, visando detalhar ordens, magnitudes e formas de onda.

A seguir, temos a distribuição dos harmônicos ímpares, da 3ª até a 11ª ordem. Como era esperado, o comportamento é muito próximo ao da distorção total. A medida que a irradiação aumenta, a distorção reduz. O começo e o fim do dia são os períodos onde as maiores distorções podem ser vistas.

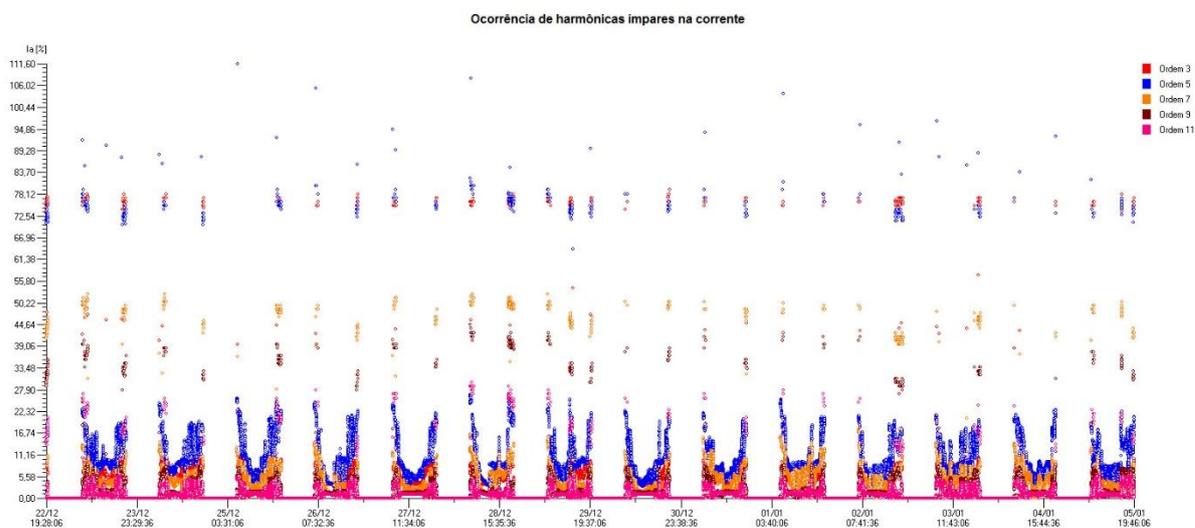


Figura 98 – Harmônicos na fase A no período de 22/12 a 05/01.

Fonte: Autoria própria.

Isolando novamente o dia 01 de Janeiro, a distribuição ocorre de maneira análoga:

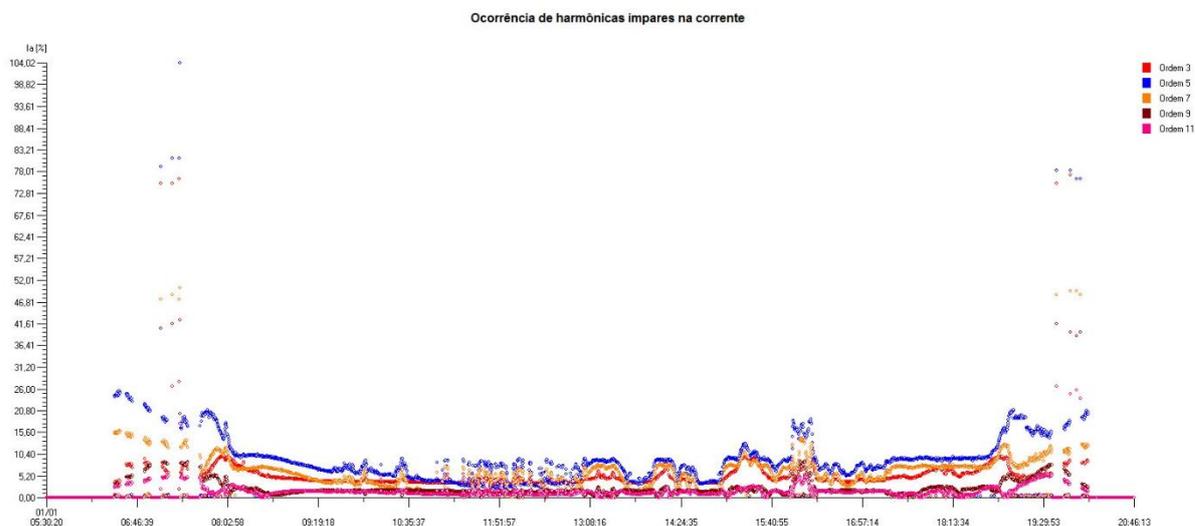


Figura 99 – Harmônicos de corrente na fase A no dia 01/01.

Fonte: Autoria própria.

Nas primeiras horas do dia, temos distorções de até 21%, principalmente na 5ª ordem, enquanto que próximo das 11:00 estes valores ficam próximos de 3%. A seguir é mostrado o detalhamento dos harmônicos em determinados instantes do dia. Primeiramente pela manhã, depois próximo ao meio dia e finalmente ao fim da tarde.

O primeiro registro apresentado será das 7:46. Nota-se que além dos harmônicos mostrados anteriormente na figura 59, também existe a presença de harmônicos ímpares, até a 24ª ordem. Todos estes fatores contribuem para uma forma de onda completamente distorcida, conforme ilustrado na figura 100.

Neste registro, o valor RMS da corrente foi de 0,700A, com 47 componentes e DHT igual a 24,706%.

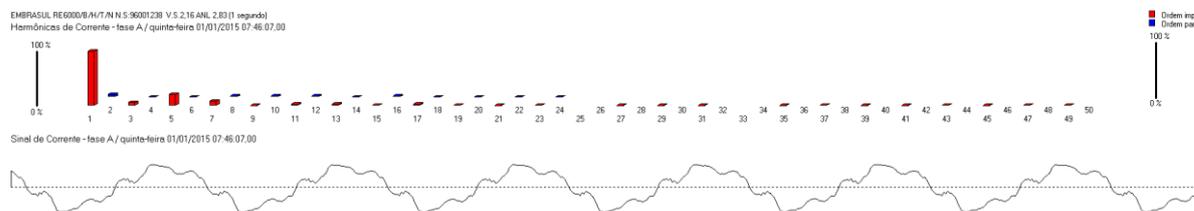


Figura 100 – Harmônicos e forma de onda para DHTi de 24,706%.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 - Componentes harmônicos para DHTi de 24,706%.

Ímpar	RMS(A)	%Fund	Fase (°)	Par	RMS(A)	%Fund	Fase (°)
1	0,679	100,00	55,67	2	0,038	5,55	332,09
3	0,041	6,08	230,49	4	0,002	0,28	256,24
5	0,142	20,97	350,24	6	0,002	0,33	219,15
7	0,059	8,74	259,93	8	0,009	1,30	107,57
9	0,002	0,33	164,17	10	0,009	1,35	5,00
11	0,014	2,12	136,62	12	0,004	0,62	228,82
13	0,013	1,88	57,17	14	0,003	0,38	53,78
15	0,009	1,30	30,32	16	0,006	0,91	247,50
17	0,015	2,27	358,68	18	0,002	0,33	310,38
19	0,005	0,82	247,23	20	0,002	0,33	163,87
21	0,004	0,53	321,76	22	0,003	0,48	112,71
23	0,006	0,91	227,41	24	0,003	0,43	274,48
25				26			
27	0,002	0,28	275,40	28			
29	0,002	0,28	93,03	30			
31	0,003	0,48	67,71	32			
33				34			
35	0,003	0,48	162,20	36			
37	0,005	0,77	66,40	38			
39	0,002	0,33	320,14	40			
41	0,003	0,43	230,05	42			
43	0,004	0,62	114,60	44			
45	0,004	0,57	351,56	46			
47	0,005	0,77	219,06	48			
49	0,004	0,62	104,15	50			

Fonte: Autoria própria.

O próximo registro apresentado foi gravado as 11:51. A diferença com o anterior é extrema. O valor da corrente RMS é mais de dez vezes maior, enquanto que a DHT é apenas 15,7% da anterior. Também deve-se notar a quantidade de componentes harmônicos presentes no sinal, de apenas 8, todos ímpares.

A forma de onda, embora não esteja livre de distorções, é muito próxima de uma senoide pura.

Neste registro, o valor RMS da corrente foi de 8,297A, com 8 componentes e DHT igual a 3,898%.

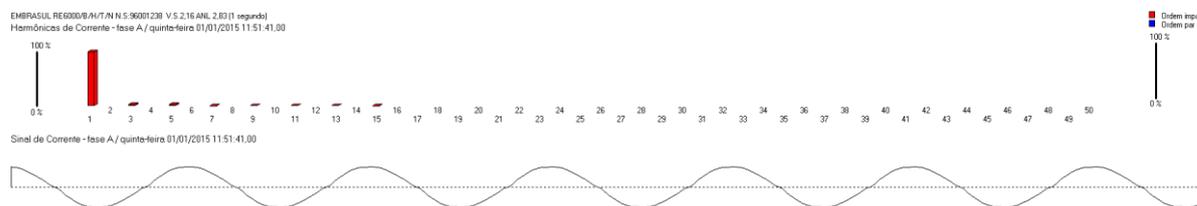


Figura 101 - Harmônicos e forma de onda para DHTi de 3,898%.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 - Componentes harmônicos para DHTi de 3,898%.

Ímpar	RMS(A)	%Fund	Fase (°)	Par	RMS(A)	%Fund	Fase (°)
1	8,291	100,00	5,93	2			
3	0,230	2,77	84,68	4			
5	0,180	2,17	235,28	6			
7	0,040	0,48	355,64	8			
9	0,092	1,11	231,15	10			
11	0,054	0,64	48,47	12			
13	0,063	0,75	228,55	14			
15	0,044	0,52	35,46	16			
17				18			
19				20			

Fonte: Autoria própria.

O terceiro registro a ser apresentado foi efetuado às 17:04. Este caso seria um intermediário entre os dois primeiros.

A distorção da forma de onda neste caso é clara, embora seja significativamente menor que no registro da manhã.

Neste terceiro registro, o valor RMS da corrente foi de 2,984A, com 17 componentes harmônicos e DHT igual a 10,657%.

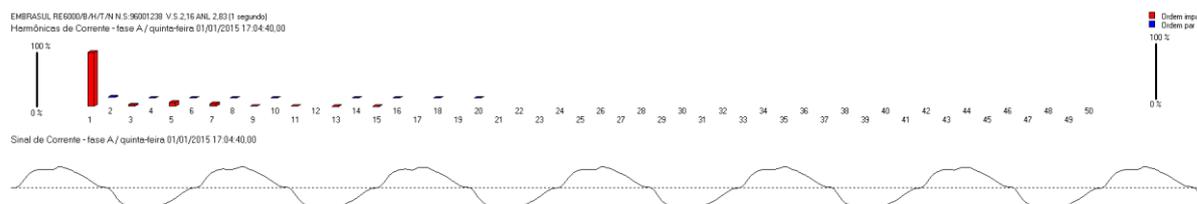


Figura 102 - Harmônicos e forma de onda para DHTi de 10,657%.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 – Componentes harmônicos para DHTi de 10,657%.

Ímpar	RMS(A)	%Fund	Fase (°)	Par	RMS(A)	%Fund	Fase (°)
1	2,967	100,00	270,21	2	0,037	1,23	10,45
3	0,125	4,20	154,99	4	0,014	0,47	293,64
5	0,231	7,80	125,37	6	0,010	0,35	156,22
7	0,155	5,22	49,65	8	0,009	0,29	210,80
9	0,044	1,48	75,67	10	0,010	0,33	135,30
11	0,046	1,56	7,95	12			
13	0,016	0,53	287,35	14	0,013	0,45	101,64
15	0,010	0,33	336,13	16	0,013	0,45	318,86
17				18	0,010	0,33	94,35
19				20	0,011	0,37	279,49
21				22			
23				24			

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 INVERSOR DESLIGADO

No dia 17 de Janeiro, foram realizadas medições em diferentes situações de funcionamento do SFCR: ponto de conexão desligado, barramento DC desligado, barramento AC desligado. A ideia destas medições é verificar se existe influência do inversor na qualidade de energia do SFCR.

A medição foi dividida em 6 etapas:

- 1 – Barramentos AC e DC ligados;
- 2 – Barramento DC desligado e AC ligado;
- 3 – Com o barramento DC desligado e AC ligado, o inversor também foi desligado pelo erro 0200;
- 4 – Barramento DC ligado e AC ligado;
- 5 – Barramento AC desligado e DC ligado;
- 6 – Barramento AC ligado e DC ligado;

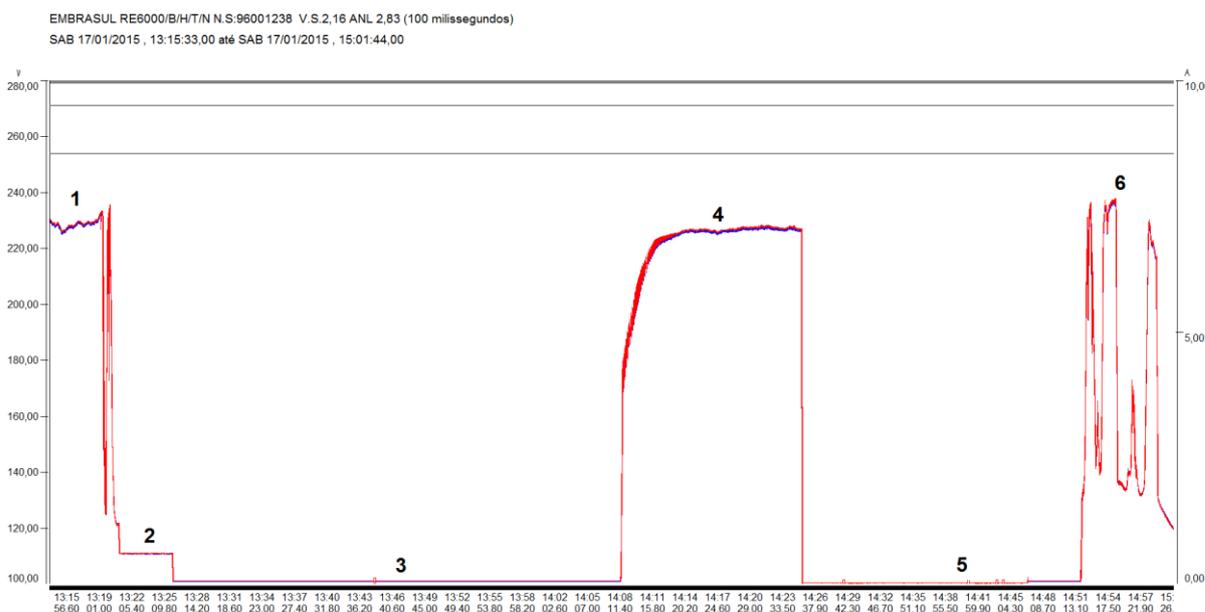


Figura 103 – Corrente nas fases A e B nas 6 etapas do teste.

Fonte: Autoria própria.

A figura 103 mostra as correntes nas fases A e B durante o teste. Os valores tiveram pequenas variações. Observa-se na figura 104 que quando a corrente RMS cai, a tensão também tende a diminuir. Este fato pode ser observado quando a chave DC é desligada (2) a corrente cai bruscamente porém só chega próxima à zero quando o inversor é desligado pelo erro 0200, pela falta de geração (3). Quando a chave DC é ligada novamente (4) o sistema volta a operar em seu estado normal. Testando a resposta do barramento AC (5), a corrente cai para zero e quando a chave AC é ligada e o inversor volta ao seu funcionamento normal (6) porém apresenta instabilidade de geração devido questões meteorológicas. Em todos estes casos ocorreu esta relação. Entretanto, não pode ser afirmado que a causa direta da mudança da tensão é a ligação / desligamento das chaves, visto que na etapa (6), com todas as chaves ligadas, o mesmo fato ocorreu. Neste caso, as quedas na corrente foram causadas por nuvens, diminuindo a irradiação sobre os módulos fotovoltaicos.

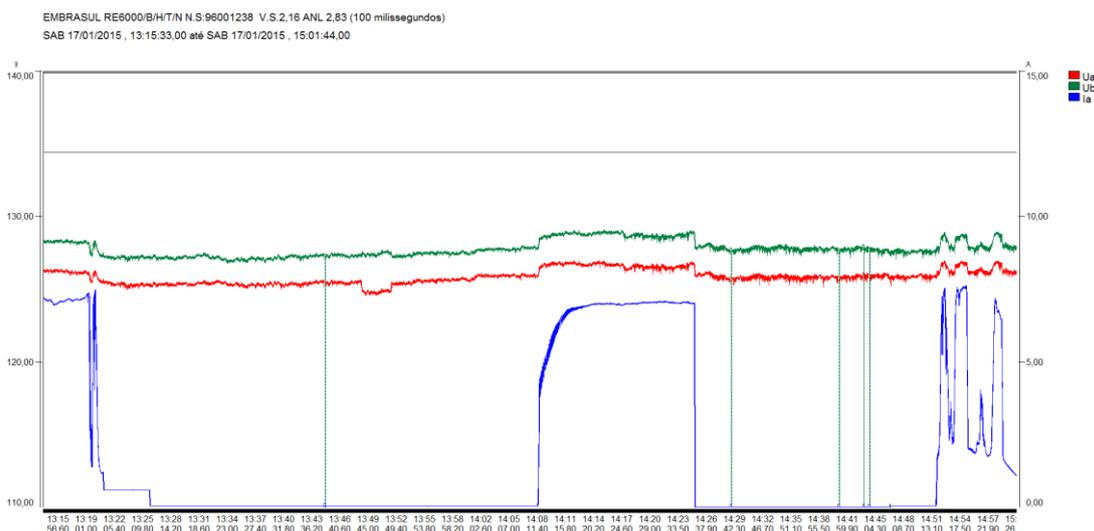


Figura 104 – Comportamento das tensões em relação a corrente.

Fonte: Autoria própria.

Conforme as regulamentações PRODIST descritas anteriormente, as leves variações de tensão são aceitáveis, ainda ficando dentro da categoria adequada.

Em relação a distorção harmônica total de tensão, não houve mudança no seu comportamento devido as diferentes configurações testadas.

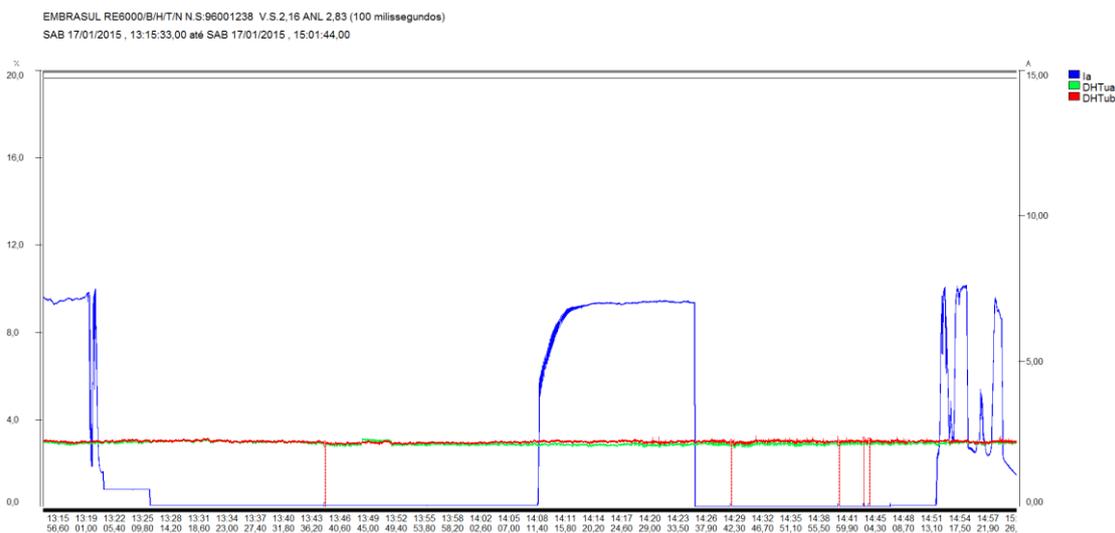


Figura 105 – DHTu nas fases A e B durante testes de desligamento.

Fonte: Autoria própria

Utilizando-se a ferramenta “Relatório Global de harmônicas”, tem-se que a DHTu na fase A variou entre 2,68 e 3,13%, enquanto que na fase B o intervalo foi de

2,83 a 3,17%. Abaixo, na figura 105, são apresentadas as ordens harmônicas e as formas de onda para as tensões A e B. O registro ilustrado foi onde a maior DHTu foi registrada (3,17% para fase B).

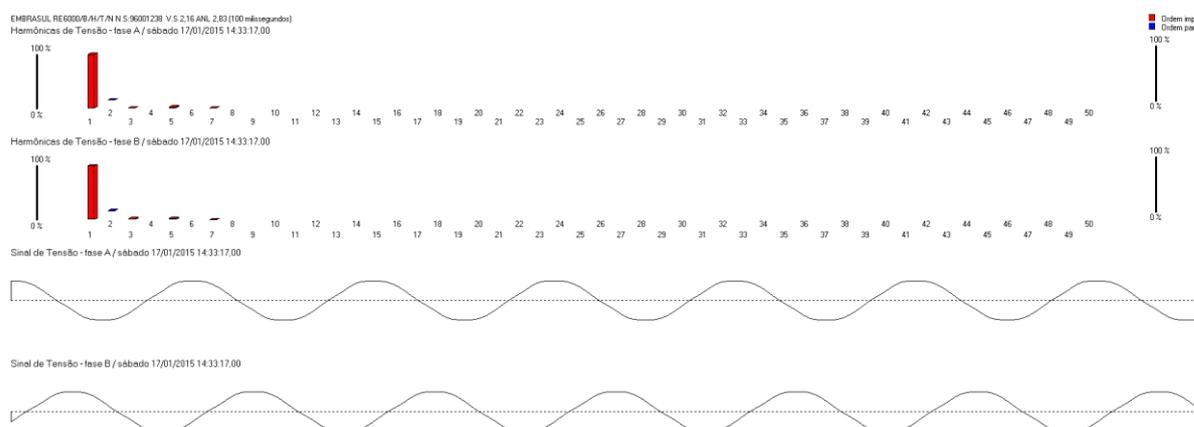


Figura 106 – Harmônicos e formas de onda nas fases A e B.

Fonte: Autoria própria

3.2.3.1 CONCLUSÕES PARCIAIS

Conforme a medição realizada no dia 17 de Janeiro, analisando todas as etapas e seus comportamentos, não foi possível observar uma influência direta do desligamento do inversor na qualidade de energia do sistema. Embora o desligamento cause uma pequena diminuição na tensão, próxima de 1V para ambas as fases. Esta queda aparenta estar relacionada ao fato que quando o inversor é a fonte de alimentação, a impedância da rede não está presente. No entanto, esta queda, segundo o PRODIST não é suficiente para que a tensão deixe de ser considerada como adequada.

3.2.4 TRANSIENTES

No dia 17 de Janeiro, foram realizadas medições durante o desligamento do ponto de conexão do inversor, em busca de transientes de corrente e tensão e para identificar o tempo de desligamento do inversor.

As figuras 107 e 108 abaixo mostram o momento em que o disjuntor entre o inversor e a rede é desligado. Os quatro gráficos são, respectivamente: Tensão na fase A, tensão na fase B, corrente na fase A e corrente na fase B.

Pode-se perceber o momento em que a conexão é aberta, existe uma mudança brusca na forma de onda das tensões. Na corrente, embora seja possível observar pequenos distúrbios na figura 107, a forma de onda mantém-se próxima a original, até chegar em zero.

Um ponto interessante a se notar é que a tensão não cai a zero, diferentemente da corrente. O valor das tensões leva aproximadamente 60 milissegundos para se estabilizar, em valores próximos a 20 V. Este comportamento deve-se ao fato que, após o desligamento, ainda existe cargas no sistema.

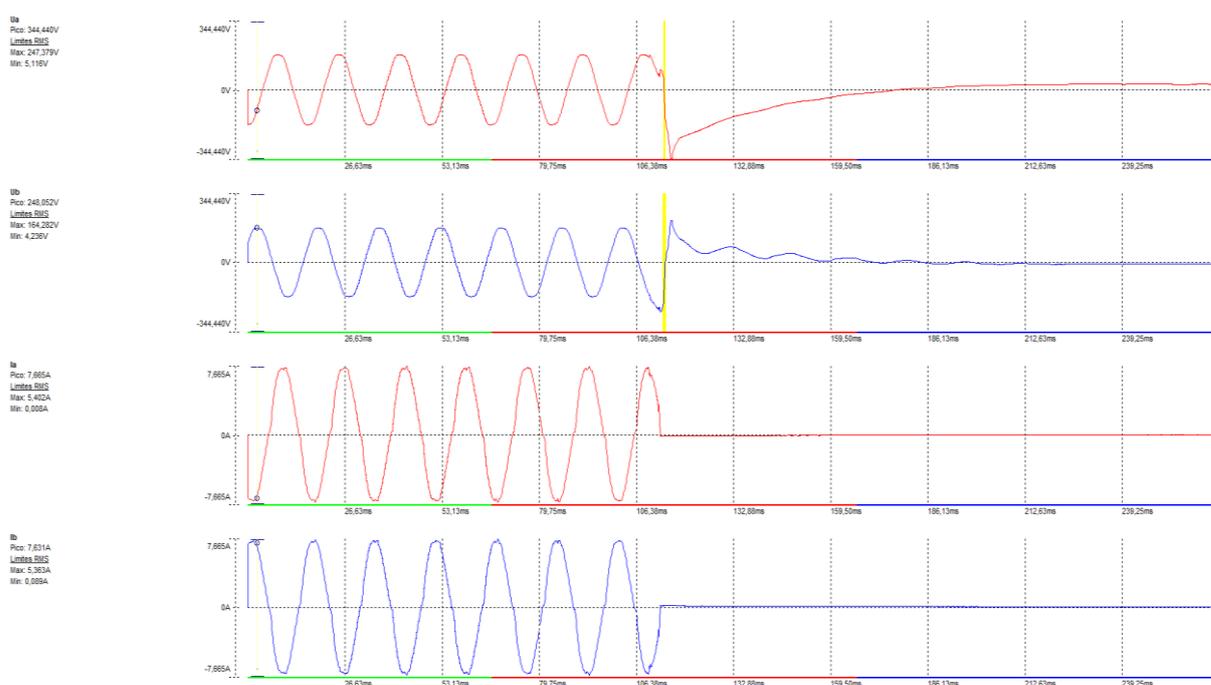


Figura 107 – Transientes de tensão e corrente durante desligamento

Fonte: Autoria própria.

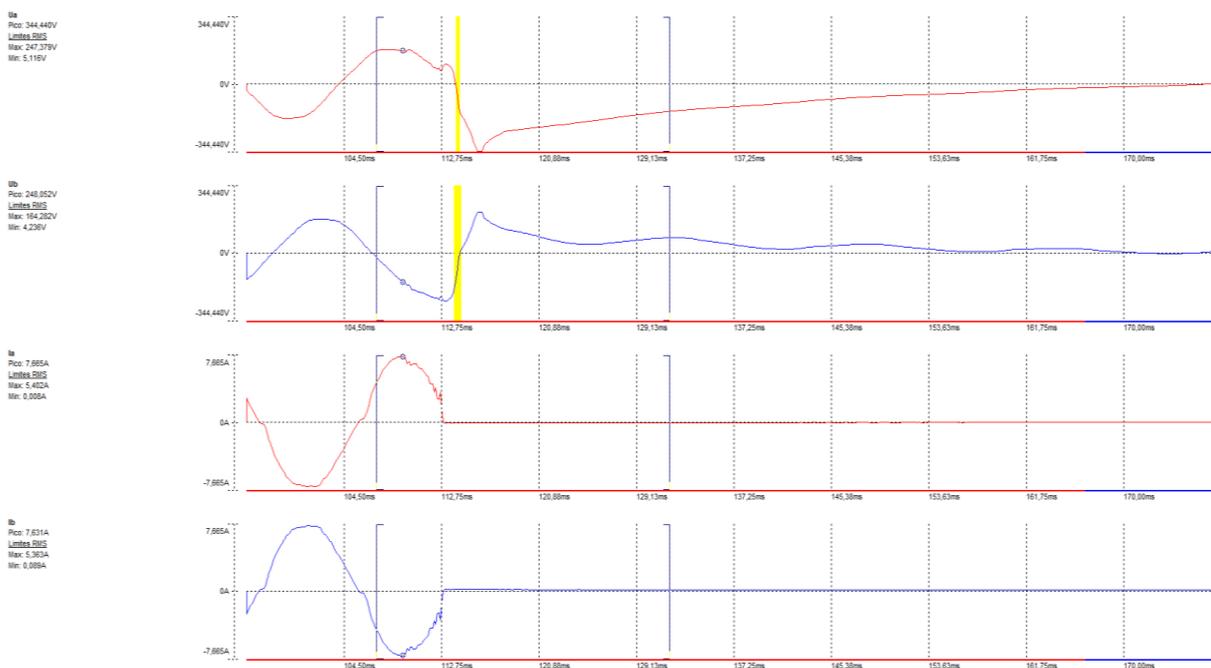


Figura 108 - Transientes de tensão e corrente durante desligamento

Fonte: Autoria própria.

No momento que a chave é ligada novamente, também é possível observar alguns transientes de tensão e de corrente. Ao ligar-se o disjuntor, percebe-se que a tensão volta ao seu valor nominal, enquanto que a corrente, embora exista um pico próximo a 1A, continua com valores muito baixos, próximos a 50 mA.

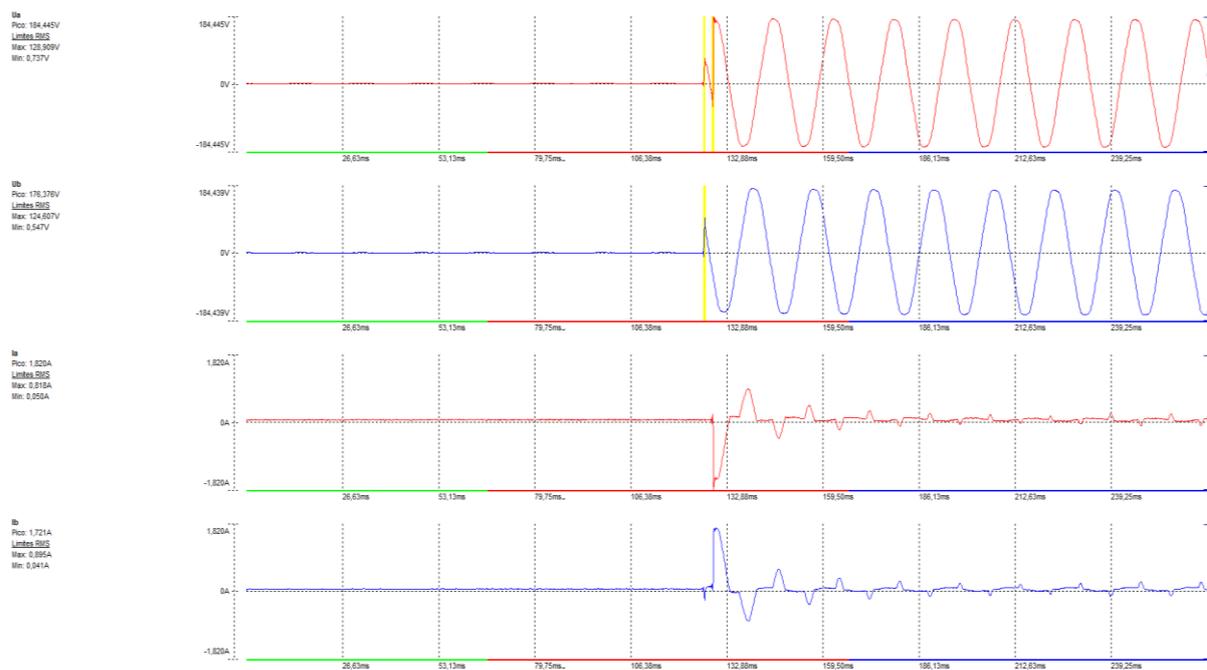


Figura 109 - Transientes de tensão e corrente durante conexão do inversor.

Fonte: Autoria própria.

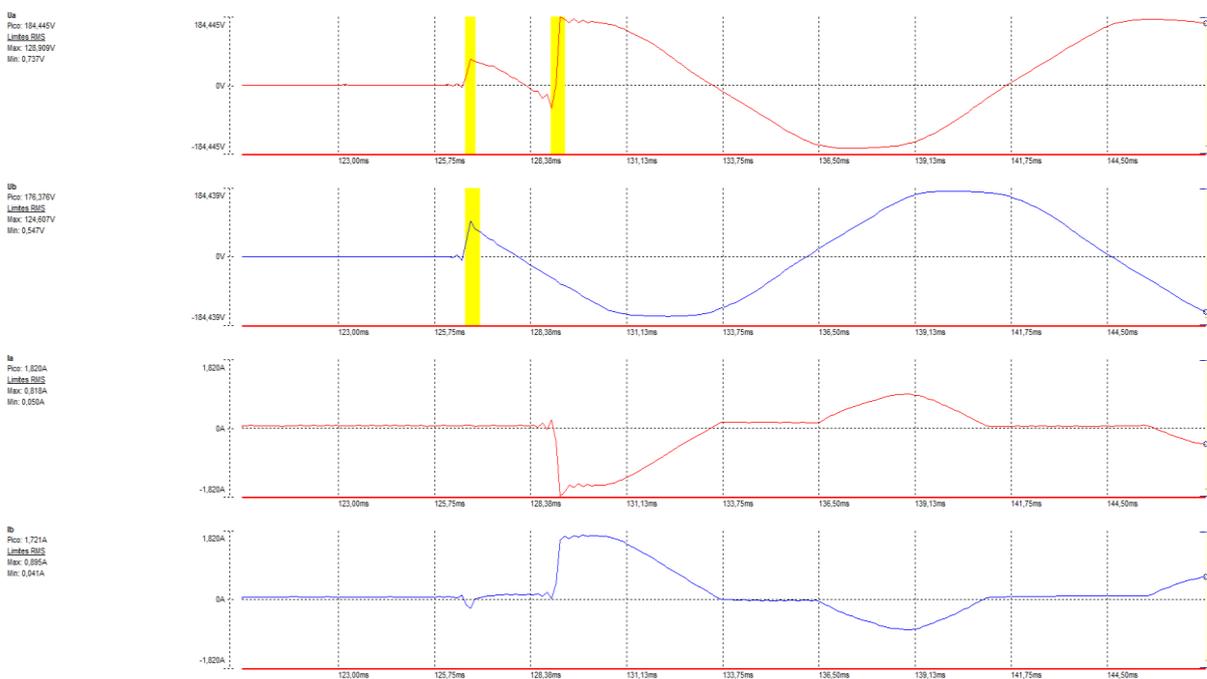


Figura 110 - Transientes de tensão e corrente durante conexão do inversor.

Fonte: Autoria própria.

Cinco minutos após a conexão ser reestabelecida, a corrente volta aos valores normais de geração (neste caso, 5A).

Em relação aos harmônicos, não foi possível fazer a análise. Conforme os gráficos acima, os tempos dos transientes são baixos demais para o analisador. Embora seja possível captar dados no modo transientes, o menor tempo de integração no qual o RE6000 é capaz de operar, tempo no qual a coleta de harmônicos é baseada, é superior aos transitórios.

Quando o inversor voltou ao seu funcionamento normal, também houve um comportamento transitório. A figura 111 ilustra isto. Nos primeiros dois minutos de funcionamento, enquanto a corrente RMS aumentava, foi possível observar uma certa oscilação na corrente. Colocando o gráfico da distorção total na mesma imagem, é possível perceber uma oscilação contrária a de corrente.

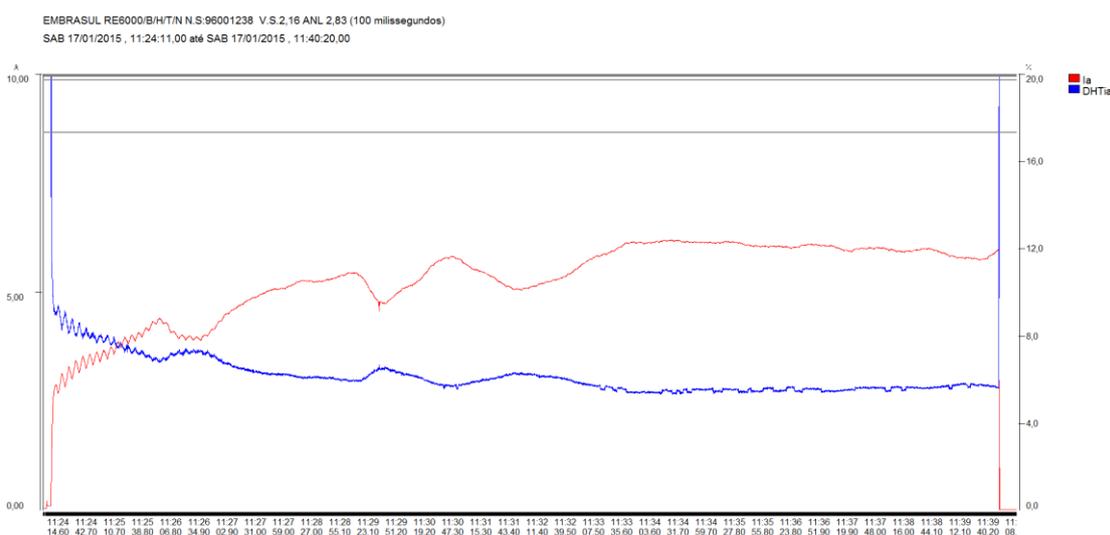


Figura 111 – Corrente e distorção total de corrente na fase A.

Fonte: Autoria própria.

Analisando os harmônicos individualmente, percebe-se um comportamento diferente para as ordens harmônicas. Percentualmente, na figura 112, as ordens 5 e 7 apresentam um desempenho muito parecido com a DHTi. Já a terceira ordem manteve-se constante em aproximadamente 4%. Quando o gráfico é plotado em valores RMS, figura 113, percebe-se o inverso, 5^o e 7^o harmônicos permanecem com valores constantes, enquanto que a componente de 3^a ordem oscila seguindo o comportamento observado na corrente RMS da fase A.

Este comportamento ajuda a entender por que a distorção total de corrente varia com o inverso do valor RMS da mesma. Enquanto que algumas componentes variam junto com a corrente, outras tendem a permanecer constantes, ou variar menos. Sendo o valor RMS destas últimas componentes menos variáveis, elas afetam percentualmente a distorção quando a corrente RMS é reduzida.

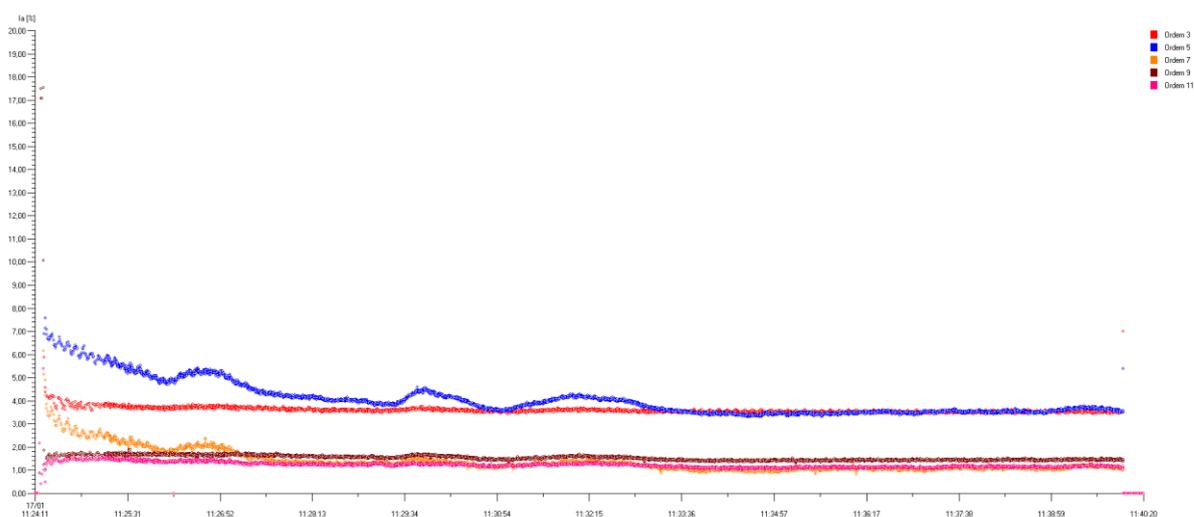


Figura 112 – Harmônicos de corrente de ordem ímpar na fase A relativos a fundamental.

Fonte: Autoria própria.

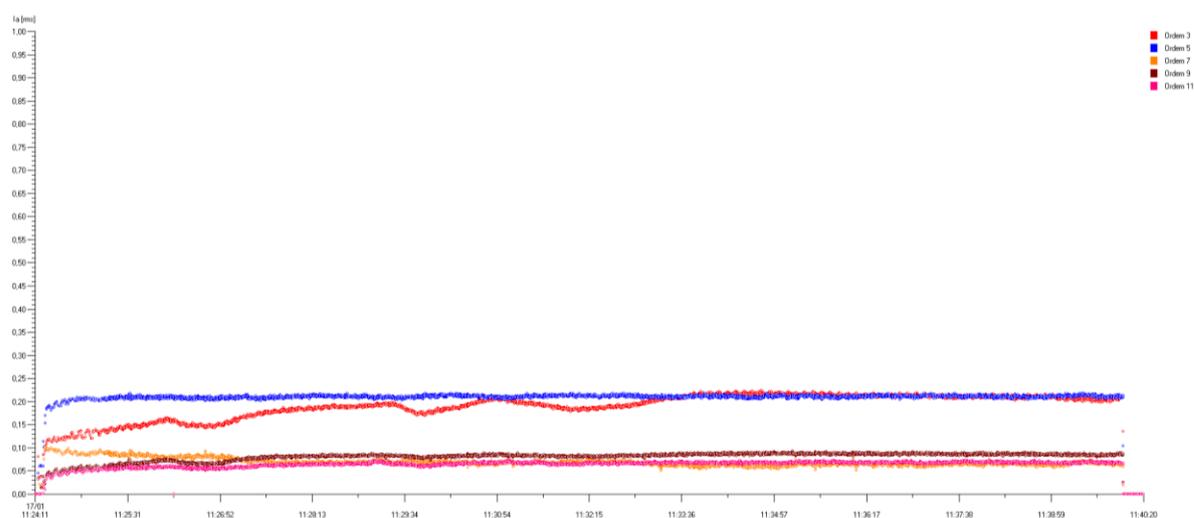


Figura 113 – Harmônicos de corrente de ordem ímpar na fase A em valor RMS.

Fonte: Autoria própria.

4. CONCLUSÃO

A partir da metodologia apresentada, foi possível atingir os objetivos específicos e o objetivo geral deste trabalho.

Quanto à qualidade da energia pode ser observado nas medições utilizando o analisador de energia RE6000 da Embrasul, que quando o inversor CC-CA do SFCR do Escritório Verde (EV) entra em operação ocorre uma elevação de tensão, tanto para a fase A quanto para a B. Outro ponto observado, foi a existência de uma redução na taxa de harmônicos de tensão fornecida para a carga, com cargas com características semelhantes, evidenciando uma melhora da qualidade de energia. Isto se deve ao fato de que quando o inversor é a fonte de alimentação, a impedância da concessionária não está presente. Já em relação à taxa de distorção harmônica de corrente (TDHi) verificou-se que não existe uma significativa mudança da sua porcentagem independente da operação do inversor. Foi possível constatar que quando o circuito estava em plena carga, a TDHi obedeceu os limites estipulados pelas normas apresentadas. No entanto, quando a carga demandava pouca corrente, estes valores foram ultrapassados significativamente. Foi observado uma diminuição da taxa de distorção harmônica de tensão quando o inversor operava em seu máximo, ou seja, em um dia com elevada irradiância solar. Os dias em que a irradiância era baixa, logo a geração era baixa, a presença da distorção harmônica total era elevada em porcentagem, porém baixa em valores RMS.

No momento em que o inversor é ligado e desligado, os picos de corrente e tensão são notáveis, porém não possuem grandezas elevadas. Foi observado que a distorção total de corrente varia com o inverso do valor RMS da mesma. Enquanto que algumas componentes variam junto com a corrente, outras tendem a permanecer constantes, ou variar menos. Sendo o valor RMS destas últimas componentes menos variáveis, elas afetam percentualmente a distorção quando a corrente RMS é reduzida.

Ao analisar o inversor desligado, a qualidade de energia não é afetada de forma significativa. Pequenos distúrbios foram aferidos porém inconclusivos devido as diversas variáveis presentes, como tempo, irradiação solar, poucas cargas atuando.

De modo geral a qualidade de energia no ponto de conexão com a carga, do inversor do escritório verde, está dentro das normas encontradas. Algumas variações de tensão e corrente, e taxa de distorção harmônica foram encontradas em diversos momentos e situações, mas todas elas condizem com os requisitos mínimos exigidos.

Algumas dificuldades foram encontradas durante o trabalho, sendo elas:

A dificuldade em encontrar um analisador de qualidade de energia que tenha tempos mínimos capazes de aferir transientes de forma clara; irradiação solar extremamente variável; cargas do escritório verde baixíssimas (algumas lâmpadas LEDs e os servidores em funcionamento apenas).

REFERÊNCIAS

ALVES, M.F., **Crítérios para Especificação e Projeto de Filtros de Harmônicas**, Eletricidade Moderna, Junho de 1994.

ARRILAGA, J. W. **Power System Harmonics** 2ª Edição. John Wiley & Sons, 2004.

CASTRO, Rui M.G. **Energia Renováveis e Produção Descentralizada Introdução à Energia Fotovoltaica**. Edição 0. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico – DEEC/ Secção de Energia, 2002.

CRESESB, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, Rio de Janeiro, 1999.

CRESESB, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, Rio de Janeiro, 2014.

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. **Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**, segunda edição, Eletrobrás/Procel, Editora da EFEI, 2001.

Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie (DGS). **Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers**. - 2nd edition, 2008.

DUGAN, R.C. etalli. **Electrical Power Systems Quality**, second edition, McGraw-Hill, 2002.

GREEN, Martin A.; EMERY, Keith; HISHIKAWA, Yoshirio; WARTA, Wilhelm; DUNLOP, Ewan D. Solar Cell Efficiency Tables (version 40). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**.

Haebberlin, H. **Evolution of Inverters for Grid connected PV-Systems from 1989 to 2000**. *measurement 2* (2001): 1.

IEC. **IEC - Global Reach**, 2014. Disponível em IEC: <<http://www.iec.ch/about/globalreach/?ref=menu>>. Acesso em 18 de Janeiro de 2015

IEC. **Norma IEC 61000 - Electromagnetic compatibility (EMC)**, 2005.

IEEE. **IEEE Brasil**, 2014. Disponível em IEEE: <<http://www.ieee.org.br/>>. Acesso em: Acesso em 18 de Janeiro de 2015.

IEEE. **IEEE Standard 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, 1992.

Macêdo, Wilson Negrão. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. São Paulo, 2004

MARTINS LOPES, S. **Avaliação de parâmetros de qualidade de energia em sistemas de microgeração**, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos : o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**, LABSOLAR, 2004.

ROCHA, Joaquim. Notas de aula, disponível em <<http://pessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/?id=102>>. Acesso em 01 fev. 2014.

SILVEIRA, Miguel F. **Análise do Impacto da Geração Distribuída sobre a Rede Elétrica de Distribuição Devido à Utilização de Geradores Fotovoltaicos**, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2013.

SIMÕES FRADE, P. **Microgeração como solução reparadora da qualidade de energia eléctrica**, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbana: sua influência na qualidade da energia eléctrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**, 2010.

URBANETZ JUNIOR, J. ; TIEPOLO, G. M. ; FUSANO, R. H. ; CASAGRANDE JUNIOR, E. F. ; CANGIOLIERI JUNIOR, O. **Análise do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede eléctrica do Escritório verde da UTFPR**, revista SODEBRAS, v. 8, p. 46-49, 2013.

WENHAM, Stuart R.; GREEN, Martin A.; WATT, Muriel E.; CORKISH, Richard. **Applied Photovoltaics**. Second Edition, Londres, Earthscan, 2007.

ANEXOS

ANEXO A

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL
RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012

Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

O DIRETOR-GERAL DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, no uso de suas atribuições regimentais, de acordo com deliberação da Diretoria, tendo em vista o disposto na Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nos art. 4º, início XX, Anexo I, do Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997, na Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, no Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, o que consta no Processo nº 48500.0004924/2010-51, e considerando: nas contribuições recebidas na Consulta Pública nº 15/2010, realizada por intercâmbio documental no período de 10 de setembro a 9 de novembro de 2010 e as contribuições recebidas na Audiência Pública nº 42/2011, realizadas no período de 11 de agosto a 14 de outubro de 2011, resolve:

CAPÍTULO III

DO SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

I. deverá ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B, ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A, conforme o caso.

II. o consumo a ser faturado, referente à energia elétrica ativa, é a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto horário, quando for o caso, devendo a distribuidora utilizar o excedente que não tenha sido compensado no ciclo de faturamento corrente para abater o consumo medido em meses subsequentes.

III. caso a energia ativa injetada em um determinado posto horário seja superior à energia ativa consumida, a diferença deverá ser utilizada, preferencialmente, para compensação em outros postos horários dentro do mesmo ciclo de faturamento, devendo, ainda, ser observada a relação entre os valores das tarifas de energia, se houver.

IV. os montantes de energia ativa injetada que não tenham sido compensados na própria unidade consumidora poderão ser utilizados para compensar o consumo de outras unidades previamente cadastradas para este fim e atendidas pela mesma distribuidora, cujo titular seja o mesmo da unidade com sistema de compensação de energia elétrica, ou cujas unidades consumidoras forem reunidas por comunhão de interesses de fato ou de direito.

V. o consumidor deverá definir a ordem de prioridade das unidades consumidoras participantes do sistema de compensação de energia elétrica.

VI. os créditos de energia ativa gerada por meio do sistema de compensação de energia elétrica expirarão 36 (trinta e seis) meses após a data do faturamento, não fazendo jus o consumidor a qualquer forma de compensação após o seu vencimento, e serão revertidos em prol da modicidade tarifária.

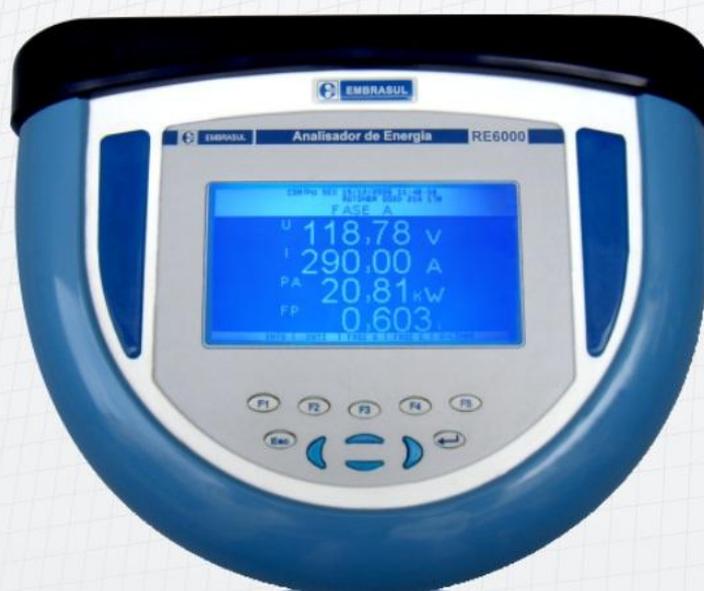
VII. a fatura deverá conter a informação de eventual saldo positivo de energia ativa para o ciclo subsequente, em quilowatt-hora (kWh), por posto horário, quando for o caso, e também o total de créditos que expirarão no próximo ciclo.

VIII. os montantes líquidos apurados no sistema de compensação de energia serão considerados no cálculo da sobrecontratação de energia para efeitos tarifários, sem reflexos na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, devendo ser registrados contabilmente, pela distribuidora, conforme disposto no Manual de Contabilidade do Serviço Público de Energia Elétrica (ANEEL, 2012)

ANEXO B



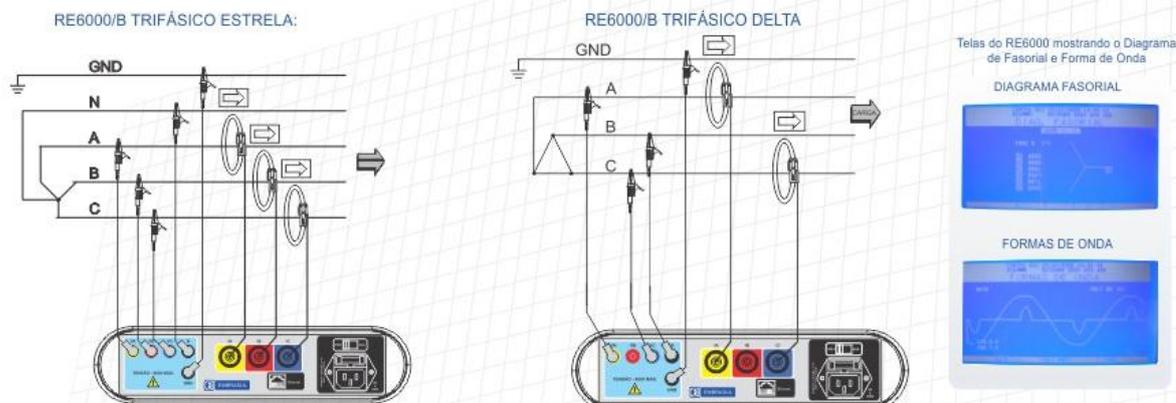
Analizador de Energia RE6000



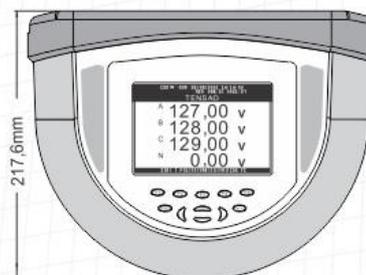
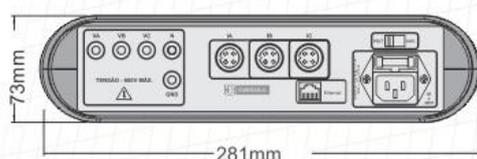
- Funções completas para análise de sistemas elétricos
- Curva de carga de motores, geradores e transformadores
- Medição e diagnóstico de distorções harmônicas
- Registro e avaliação de perturbações e transientes
- Estudos de eficiência energética
- Dimensionamento de bancos para correção do FP.

**EMBRASUL**

Diagrama de Ligação



Dimensões



Especificações Técnicas

Alimentação	80 à 300Vac/Vcc
Consumo	8VA
Temperatura de operação	0 à 50°C
Medição de tensão	30 à 500Vac (Fase-neutro) 0,5 à 100V (Entrada de neutro - RE6000/N)
Erro máximo de tensão	0,5% entre 30 e 100V 0,2% entre 100 e 500V 0,5% entre 0,5 e 100V (RE6000/N)
Medição de corrente	Através de sensor flexível ou alicate de corrente
Erro máximo de corrente	0,2% entre 5% e 100% da escala de corrente
Erro máximo de ângulo de fase	< 0,3 graus
Frequência	50/60Hz

Isolação	2,5kV CATIII
Dimensões	281 x 291,7 x 73 mm
Display	LCD gráfico 240x128 pixels
Peso	1,7kg
Comunicação	TCP/IP - Ethernet
Período de Integração	100ms à 30 min
Capacidade de memória	256MB
Amostragem	A/D de 16 bits, 133 amostras por ciclo (8kHz). Simultaneamente em todos os canais
Harmônicas	1ª a 50ª ordem, pares e ímpares, simultaneamente em todos os canais
Transientes	Duração mínima para detecção: 130us (amostragem de 8kHz)
Análise dos dados	Software ANL6000



Embrasul Indústria Eletrônica Ltda
Av. Bahia, 684 - Porto Alegre - RS - Brasil
90240.551
Fone: 51 3358.4000 - Fax: 51 3358.4022
embrasul@embrasul.com.br
www.embrasul.com.br

Agente Técnico

ANEXO C



Procedimentos de Distribuição

Assunto:	Seção:	Revisão:	Data de Vigência:	Página:
Qualidade do Produto	8.1	6	01/01/2015	33 de 75

ANEXO I: Faixas de Classificação de Tensões – Tensões de Regime Permanente

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,93TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,93TR$ ou $TL > 1,07TR$

Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,07TR$

Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Tabela 4 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233) / (110 \leq TL < 117$ ou $133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191$ ou $TL > 233) / (TL < 110$ ou $TL > 135)$

Tabela 5 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

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

Assunto:	Seção:	Revisão:	Data de Vigência:	Página:
Qualidade do Produto	8.1	6	01/01/2015	34 de 75

Tabela 6 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (254/127)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(234 \leq TL \leq 267) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(221 \leq TL < 234 \text{ ou } 267 < TL \leq 269) / (110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 221 \text{ ou } TL > 269) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Tabela 7 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (440/220)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(405 \leq TL \leq 462) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(383 \leq TL < 405 \text{ ou } 462 < TL \leq 466) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 383 \text{ ou } TL > 466) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Tabela 8 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (208/120)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(191 \leq TL \leq 218) / (110 \leq TL \leq 126)$
Precária	$(181 \leq TL < 191 \text{ ou } 218 < TL \leq 220) / (104 \leq TL < 110 \text{ ou } 126 < TL \leq 127)$
Crítica	$(TL < 181 \text{ ou } TL > 220) / (TL < 104 \text{ ou } TL > 127)$

Tabela 9 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (230/115)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(212 \leq TL \leq 242) / (106 \leq TL \leq 121)$
Precária	$(200 \leq TL < 212) \text{ ou } (242 < TL \leq 244) / (100 \leq TL < 106 \text{ ou } 121 < TL \leq 122)$
Crítica	$(TL < 200 \text{ ou } TL > 244) / (TL < 100 \text{ ou } TL > 122)$

Tabela 10 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (240/120)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(221 \leq TL \leq 252) / (110 \leq TL \leq 126)$
Precária	$(209 \leq TL < 221 \text{ ou } 252 < TL \leq 254) / (104 \leq TL < 110 \text{ ou } 126 < TL \leq 127)$
Crítica	$(TL < 209 \text{ ou } TL > 254) / (TL < 104 \text{ ou } TL > 127)$

Assunto: Qualidade do Produto	Seção: 8.1	Revisão: 6	Data de Vigência: 01/01/2015	Página: 35 de 75
----------------------------------	---------------	---------------	---------------------------------	---------------------

Tabela 11 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/110)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (101 \leq TL \leq 116)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (96 \leq TL < 101 \text{ ou } 116 < TL \leq 117)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 96 \text{ ou } TL > 117)$

Tabela 12 – Faixas aplicadas às tensões nominais inferiores a 1 kV para formação das Tabelas 4 a 11

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Nominal (TN)
Adequada	$0,92TN \leq TL \leq 1,05TN$
Precária	$0,87TN \leq TL < 0,92TN \text{ ou } 1,05TN < TL \leq 1,06TN$
Crítica	$TL < 0,87TN \text{ ou } TL > 1,06TN$