

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUÍS PAULO CUSTÓDIO

**COMPARATIVO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA
INSTALAÇÃO INDUSTRIAL ANTES E APÓS A INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

LUÍS PAULO CUSTÓDIO

**COMPARATIVO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA
INSTALAÇÃO INDUSTRIAL ANTES E APÓS A INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Pinho
Co-orientador: Prof. Luiz Amilton Peplow

CURITIBA

2017

Luís Paulo Custódio

Comparativo da qualidade de energia elétrica em uma instalação industrial antes e após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição

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 Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 20 de abril de 2017

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

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Luiz Amilton Peplow, Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Co-orientador

Prof. Luiz Amilton Peplow, Me. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Co-orientador

Prof. Jair Urbanetz Junior, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Joaquim Eloir Rocha, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

O homem científico não pretende alcançar um resultado imediato. Ele não espera que suas ideias avançadas sejam imediatamente aceitas. Seus trabalhos são como sementes para o futuro. Seu dever é lançar as bases para aqueles que estão por vir e apontar o caminho.

O dia em que descobriremos exatamente o que é a eletricidade, isso irá marcar um evento provavelmente maior, mais importante que qualquer outro na História da Humanidade. Então, será apenas uma questão de tempo para que o Homem consiga ligar suas máquinas diretamente à própria natureza. Imagine o que está por vir...

(Nikola Tesla)

RESUMO

CUSTÓDIO, LUÍS. P. Comparativo da qualidade de energia elétrica em uma instalação industrial antes e após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição. 112p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Existe uma tendência crescente na utilização de fontes alternativas tanto por parte econômica, ambiental e logística. Com esse cenário em ascensão são necessários estudos e pesquisas envolvendo outras formas de geração de energia por fontes alternativas, e como foco deste trabalho, um estudo sobre a energia solar fotovoltaica aplicada em uma instalação industrial. Com este princípio, existe uma carência de informações sobre o assunto envolvendo a qualidade de energia elétrica (QEE) em sistemas fotovoltaicos, sendo assim, esta pesquisa tem o objetivo geral de difundir a pesquisa sobre qualidade de energia elétrica sob o ponto de vista da inserção de um sistema fotovoltaico (SFV), mostrando qual é o impacto de um sistema desses em uma instalação, neste caso, industrial. Como objetivos específicos foram realizados o acompanhamento da instalação do sistema fotovoltaico, a descrição do sistema, conceitos e normas sobre SFV e qualidade de energia elétrica, além das coletas de dados por meio de um analisador de energia. Com isso, foram realizadas duas etapas de medições na empresa em questão, sendo a primeira antes de instalar o SFV e a outra depois de instalar o SFV. As medições mostraram o comportamento da tensão, níveis de distorções harmônicas totais (DHT) de tensão e corrente, fator de potência, a potência consumida (e depois a potência gerada) e a frequência. Os resultados após o SFV ser inserido no sistema mostram que o sistema teve mudanças significativas principalmente na DHT de corrente e no fator de potência, os quais estão muito fora dos níveis aceitos em normas, como consta no Prodist – Módulo 8: Qualidade de energia elétrica. Contudo, a geração de energia mostrou-se capaz de atender uma parte da demanda por potência ativa da instalação e também, em alguns momentos, conseguir transmitir o excedente para a rede.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede. Qualidade de Energia. Energia Solar Fotovoltaica. Energia Alternativa. Geração de Energia.

ABSTRACT

CUSTÓDIO, LUÍS. P. Comparison of the power quality in an industrial installation before and after the installation of a photovoltaic system connected to the distribution grid. 112p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

There is a growing trend in the use of alternative sources, both economically, environmentally and logistically. With this growing scenario, studies and research involving other forms of energy generation by alternative sources are needed, and as a focus of this work, a study on photovoltaic solar energy applied in an industrial installation. With this principle, there is a lack of information on the subject involving the quality of electric power (QEP) in photovoltaic systems, and thus, this research has the general objective of disseminating the research on electric power quality from the point of view of the insertion of a photovoltaic system (PVS), showing what the impact of such a system is on an installation, in this case industrial. As specific objectives were performed the installation of the photovoltaic system, the description of the system, concepts and norms on PVS and quality of electric energy, in addition to data collection by means of an energy analyzer. Thus, two measurement steps were performed in the company in question, the first one before installing the PVS and the other after installing the PVS. The measurements showed the voltage behavior, total harmonic distortion levels (THD) of voltage and current, power factor, power consumed (and then power generated) and frequency. The results after the PVS is inserted in the system show that the system had significant changes mainly in current THD and in the power factor, which are well outside of the levels accepted in standards, as stated in "Prodist – Módulo 8: Qualidade de energia elétrica". However, power generation was able to meet a portion of the active power demand of the facility and also, at times, to transmit the surplus to the grid.

Keywords: Photovoltaic systems connected to the grid. Power quality. Photovoltaic solar energy. Renewable energy. Power generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Capacidade de geração do Brasil – novembro/2015.....	16
Figura 2 – Capacidade de geração do Brasil – maio/2017	16
Figura 3 – SFV sendo instalado no barracão	20
Figura 4 – Efeito fotovoltaico em uma célula fotovoltaica de material semicondutor	26
Figura 5 – Alguns dos principais distúrbios elétricos em uma onda senoidal.....	31
Figura 6 – Decomposição da onda distorcida	36
Figura 7 – Triângulo de potências.....	39
Figura 8 – Representação do fator de potência com harmônicos	41
Figura 9 – Fluxograma mostrando as etapas da implantação da definição dos indicadores e padrões de qualidade	53
Figura 10 – Técnicos da COPEL instalando o sistema de medição	54
Figura 11 – Aviso da COPEL para indicar geração distribuída no local.....	55
Figura 12 – Exemplos de equipamentos existentes na empresa	57
Figura 13 – Barracão e a fachada da empresa com módulos FV instalados	57
Figura 14 – Esquemático do SFVCR utilizado na empresa.....	59
Figura 15 – Curvas características das células FV	61
Figura 16 – Curvas características dos módulos FV da radiação solar e temperatura	61
Figura 17 – Módulos fotovoltaicos instalados no barracão	62
Figura 18 – Topologia básica de um inversor CC/CA conectado a um módulo FV... 63	
Figura 19 – Inversores de 20 kW para conexão dos módulos FV ao SFVCR.....	64
Figura 20 – Medidor eletrônico bidirecional com sistema de comunicação sem fio .. 65	
Figura 21 – Transformadores de corrente para medição.....	66
Figura 22 – Transformadores isoladores trifásicos	67
Figura 23 – Diagrama unifilar simplificado do sistema e o ponto de medição.....	68
Figura 24 – Ilustração da ligação do analisador de energia	69
Figura 25 – Instalação do analisador de energia no disjuntor de entrada no quadro de distribuição geral.....	69
Figura 26 – Gráfico das tensões nas fases e neutro (09/05/15 – 11/05/15)	71
Figura 27 – Gráfico das tensões nas fases e neutro (11/05/15 – 13/05/15)	71
Figura 28 – Gráfico das tensões nas fases e neutro (13/05/15 – 16/05/15)	71
Figura 29 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (09/05/15 – 11/05/15).. 72	
Figura 30 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (11/05/15 – 13/05/15).. 73	
Figura 31 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (13/05/15 – 16/05/15).. 73	
Figura 32 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (09/05/15 – 11/05/15) 74	
Figura 33 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (11/05/15 – 13/05/15) 74	
Figura 34 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (13/05/15 – 16/05/15) 74	
Figura 35 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (09/05/15 – 11/05/15)	75

Figura 36 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (11/05/15 – 13/05/15)	76
Figura 37 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (13/05/15 – 16/05/15)	76
Figura 38 – Gráfico das potências trifásicas (09/05/15 – 11/05/15)	77
Figura 39 – Gráfico das potências trifásicas (11/05/15 – 13/05/15)	77
Figura 40 – Gráfico das potências trifásicas (13/05/15 – 16/05/15)	78
Figura 41 – Gráfico da frequência nas fases A, B e C (09/05/15 – 11/05/15)	79
Figura 42 – Gráfico da frequência nas fases A, B e C (11/05/15 – 13/05/15)	79
Figura 43 – Gráfico da frequência nas fases A, B e C (13/05/15 – 16/05/15)	79
Figura 44 – Gráfico das tensões nas fases e neutro (13/09/16 – 16/09/16)	82
Figura 45 – Gráfico das tensões nas fases e neutro (27/09/16 – 30/09/16)	82
Figura 46 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (13/09/16 – 16/09/16) ..	83
Figura 47 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (27/09/16 – 30/09/16) ..	83
Figura 48 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (13/09/16 – 16/09/16)	84
Figura 49 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (27/09/16 – 30/09/16)	84
Figura 50 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (13/09/16 – 16/09/16)	85
Figura 51 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (27/09/16 – 30/09/16)	86
Figura 52 – Gráfico das potências trifásicas (13/09/16 – 16/09/16)	87
Figura 53 – Gráfico das potências trifásicas (27/09/16 – 30/09/16)	87
Figura 54 – Gráfico do consumo/geração de potência ativa (13/09/16 – 16/09/16) ..	88
Figura 55 – Gráfico do consumo/geração de potência ativa (27/09/16 – 30/09/16) ..	88
Figura 56 – Gráficos da potência gerada pelo SFV no período de 13 a 19 de setembro de 2016	89
Figura 57 – Gráficos da potência gerada pelo SFV no período de 24 a 30 de setembro de 2016	89
Figura 58 – Medidor Schneider instalado no quadro geral	90
Figura 59 – Curvas de irradiação em Curitiba registrado no período de 13 a 16 de setembro de 2016	91
Figura 60 – Curvas de irradiação em Curitiba registrado no período de 27 a 30 de setembro de 2016	91
Figura 61 – Gráfico da frequência nas fases A, B e C (14/09/16 – 16/09/16)	92
Figura 62 – Gráfico da frequência nas fases A, B e C (27/09/16 – 30/09/16)	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo da situação dos empreendimentos e potência associada (maio/2017)	15
Tabela 2 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração	35
Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	37
Tabela 4 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)	38
Tabela 5 – Etapas do processo de solicitação de acesso	46
Tabela 6 – Níveis de tensão considerados para conexão de micro e minicentrals geradoras	48
Tabela 7 – Requisitos mínimos em função da potência instalada	48
Tabela 8 – Variação de tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127)	52
Tabela 9 – Variação de tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)	52
Tabela 10 – Tensões máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C e neutro	70
Tabela 11 – DHT de tensão máxima, média e mínima nas fases A, B, C	72
Tabela 12 – DHT de corrente máxima, média e mínima nas fases A, B, C	73
Tabela 13 – Fatores de potência máximo, médio e mínimo nas fases A, B, C e total	75
Tabela 14 – Potências trifásicas	77
Tabela 15 – Frequência máxima, média e mínima nas fases A, B e C	78
Tabela 16 – Tensões máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C e neutro	81
Tabela 17 – DHT de tensão máxima, média e mínima nas fases A, B, C	83
Tabela 18 – DHT de corrente máxima, média e mínima nas fases A, B, C	84
Tabela 19 – Fatores de potência máximo, médio e mínimo nas fases A, B, C e total	85
Tabela 20 – Potências trifásicas consumo/geração	86
Tabela 21 – Frequência máxima, média e mínima nas fases A, B e C	92
Tabela 22 – Tensões máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C e neutro, antes e depois de instalado o SFVCR	94
Tabela 23 – DHTs de tensão máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C, antes e depois de instalado o SFVCR	95
Tabela 24 – DHTs de corrente máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C, antes e depois de instalado o SFVCR	95
Tabela 25 – Fatores de potência (indutivos e capacitivos) máximos, médios e mínimos nas fases A, B, C e trifásicos, antes e depois de instalado o SFVCR	95
Tabela 26 – Potências máximas, médias e mínimas, antes e depois de instalado o SFVCR	96
Tabela 27 – Frequências máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C, antes e depois de instalado o SFVCR	96

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Distorção Harmônica Total	29
Equação 2 – Distorção Harmônica Individual	30
Equação 3 – Potência Ativa	31
Equação 4 – Potência Ativa Trifásica de Fase	31
Equação 5 – Potência Ativa Trifásica de Linha.....	31
Equação 6 – Potência Reativa	31
Equação 7 – Potência Ativa Trifásica de Fase	31
Equação 8 – Potência Ativa Trifásica de Linha.....	31
Equação 9 – Potência Aparente	32
Equação 10 – Ângulo Phi	32
Equação 11 – Fator de Potência	33
Equação 12 – Potência Aparente com Potência de Distorção.....	33

LISTA DE SIGLAS

A	Ampère
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
BIG	Banco de Informações de Geração
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCD	Conexão às Instalações de Distribuição
CLP	Controlador Lógico Programável
CNPJ	Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas
CPF	Cadastro de Pessoas Físicas
CUSD	Contrato de Uso do Sistema de Distribuição
ddp	Diferença de Potencial (elétrico)
DHT	Distorção Harmônica Total
DHI	Distorção Harmônica Individual
DPS	Dispositivos de Proteção contra Surtos
ICMS	Imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e sobre prestações de serviços de transporte interestadual e intermunicipal e de comunicação
IEC	Comissão Internacional Eletrotécnica (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IGBT	Transistor bipolar de porta isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
FP	Fator de Potência
FV	Fotovoltaico
IEM	Interferências Eletromagnéticas
kVA	Quilo-Volt-Ampère
kVAr	Quilo-Volt-Ampère-Reativo
kW	Quilo-Watt
NTC	Normas Técnicas COPEL
MW	Mega-Watt
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PMP	Ponto de Máxima Potência

pu	Por Unidade
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SFV	Sistema Fotovoltaico
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
TC	Transformador de Corrente
V	Volts
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ACRÔNIMOS

Abinee	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
Cobei	Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações
Copel	Companhia Paranaense de Energia
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia
Prodist	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 TEMA	17
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	18
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 Objetivo Geral.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 JUSTIFICATIVAS.....	19
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2 CONCEITOS E NORMAS RELACIONADAS AO SISTEMA FOTOVOLTAICO E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	23
2.1 EXEMPLOS DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA	23
2.1.1 Energia solar e energia fotovoltaica	25
2.2 CONCEITOS PARA O ESTUDO DE UM SFVCR	26
2.3 IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	29
2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS DISTÚRBIOS DA ENERGIA ELÉTRICA	30
2.4.1 Variação de tensão	31
2.4.2 Distorções Harmônicas	35
2.4.3 Fator de potência	38
2.5 RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687/15 – ANEEL	41
2.6 NTC 905200-COPEL.....	43
2.7 PRODIST MÓDULO 3: ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	45
2.8 PRODIST MÓDULO 8: QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	50
2.9 PROCEDIMENTO ADOTADO PELA COPEL PARA LIGAÇÃO DO SFVCR	53
3 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO DO SFVCR	56
3.1 CONEXÃO DE UM SFVCR.....	58
3.1.1 Módulo fotovoltaico	60
3.1.2 Inversor.....	62
3.1.3 Medidor bidirecional.....	64
3.1.4 Transformador isolador para adequação de tensão da rede local	66
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS ANTES DO SFV	68
4.1 TENSÃO	70
4.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA	72
4.3 FATOR DE POTÊNCIA	75
4.4 FREQUÊNCIA	78
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	80
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DEPOIS DO SFV	81
5.1 TENSÃO	81
5.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA	82
5.3 FATOR DE POTÊNCIA	85
5.4 FREQUÊNCIA	90
5.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	93
5.6 AGRUPAMENTO DOS DADOS.....	94
6 CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS	
100	
ANEXO A – Datasheet Módulo fotovoltaico – Astronergy.....	104

ANEXO B – Datasheet Inversor CPS SCA 10KTL-DOHE.....	106
ANEXO C – Datasheet Inversor CPS SCA 20KTL-DO.....	108
ANEXO D – Catálogo do analisador de energia EMBRASUL RE7000.....	110

1 INTRODUÇÃO

É fato que a energia elétrica é um elemento precioso para a humanidade, visto que desde sua geração, transmissão e distribuição para todos os segmentos que a utilizam, houve um estrondoso crescimento tanto por parte da tecnologia quanto da qualidade de vida. Ela está presente no dia a dia em diferentes formas, podendo estar armazenadas em baterias para os dispositivos eletrônicos, em iluminação e alimentação de cargas em residências, comércios e indústrias.

O Brasil possui em sua maior parte a geração de energia elétrica por hidrelétricas. Para o país, a hidroeletricidade é muito vantajosa devido a geografia dos rios e terrenos com alto potencial para esse tipo de geração (GAZOLI, VILLALVA, 2012), mas também, sua construção pode gerar grandes impactos ao meio ambiente, pela necessidade de se construir barragens, e tendo como consequência, grandes áreas alagadas, tendo influência direta na fauna, flora e também na população que vive nas proximidades.

Entretanto, quando o resultado esperado dos períodos de chuvas não é satisfatório, o país carece da energia gerada pelas usinas hidrelétricas, e neste momento, as usinas termelétricas são acionadas para complementar o fornecimento de energia. Porém o custo de geração de energia elétrica pelas termelétricas é maior que o das hidrelétricas, encarecendo a energia pelo seu uso contínuo (ROSA, 2007).

A energia elétrica é um produto com parâmetros padronizados de qualidade e comercializada pelo preço estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), agência reguladora da energia elétrica no sistema elétrico do Brasil, que impõe regras e normas para a utilização e venda da energia elétrica (ANEEL, 1997).

O cenário atual de demanda energética vem preocupando a todos, desde o simples usuário residencial que percebe em sua fatura de energia o aumento devido ao custo de geração, as indústrias que precisam diminuir o ritmo de produção causando prejuízos, tanto pelo aumento da tarifa aplicada quanto pelas demissões e férias coletivas de seus colaboradores para tentar ajustar-se nestes períodos de crise energética e dos operadores do sistema elétrico do país que contornam a situação para que o sistema não entre em colapso.

Embora essa problemática ainda esteja presente, é imprescindível que não falem orientações para mudar esse quadro. Dentre as várias medidas para diminuir

o desperdício de energia estão as campanhas e incentivos inculcando hábitos conscientes da população, e acima disso, melhorar a tecnologia dos equipamentos para que se tornem mais eficientes tanto para o setor residencial quanto industrial. Isso impulsionou uma geração de energia descentralizada como a eólica, biogás, solar térmica, fotovoltaica, etc. Ou seja, não dependendo somente da energia potencial dos rios ou da queima do petróleo concentrada em grandes usinas. De acordo com a ANEEL as participações das fontes de energia ditas renováveis vêm crescendo dentro da matriz energética do país (ANEEL, 2016). A Tabela 1 mostra o resumo da situação dos empreendimentos de geração de energia (maio de 2017):

Resumo da Situação Atual dos Empreendimentos		
Fonte de Energia	Situação	Potência Associada (kW)
172 empreendimento(s) de fonte Eólica	Construção não iniciada	3.940.950
160 empreendimento(s) de fonte Eólica	Construção	3.733.700
427 empreendimento(s) de fonte Eólica	Operação	10.434.043
74 empreendimento(s) de fonte Fotovoltaica	Construção não iniciada	1.916.997
37 empreendimento(s) de fonte Fotovoltaica	Construção	1.063.400
44 empreendimento(s) de fonte Fotovoltaica	Operação	23.761
174 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	Construção não iniciada	2.403.971
38 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	Construção	2.300.939
1264 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	Operação	98.729.614
1 empreendimento(s) de fonte Maré	Construção não iniciada	50
132 empreendimento(s) de fonte Termelétrica	Construção não iniciada	4.953.589
32 empreendimento(s) de fonte Termelétrica	Construção	4.300.506
2926 empreendimento(s) de fonte Termelétrica	Operação	42.949.495

Tabela 1 – Resumo da situação dos empreendimentos e potência associada (maio/2017)
Fonte: ANEEL, 2017

A Tabela 1, obtida no site do Banco de Informações de Geração (BIG), mostra os números referentes à potência instalada (outorgada pela ANEEL) e também a porcentagem que representam as fontes de energia mostradas na Figura 1, onde mostra a participação de cada fonte de geração de energia em novembro de 2015. A Figura 2, pode-se comparar com a Figura 1, mostra o avanço dos projetos de usinas geradoras (maio de 2017).

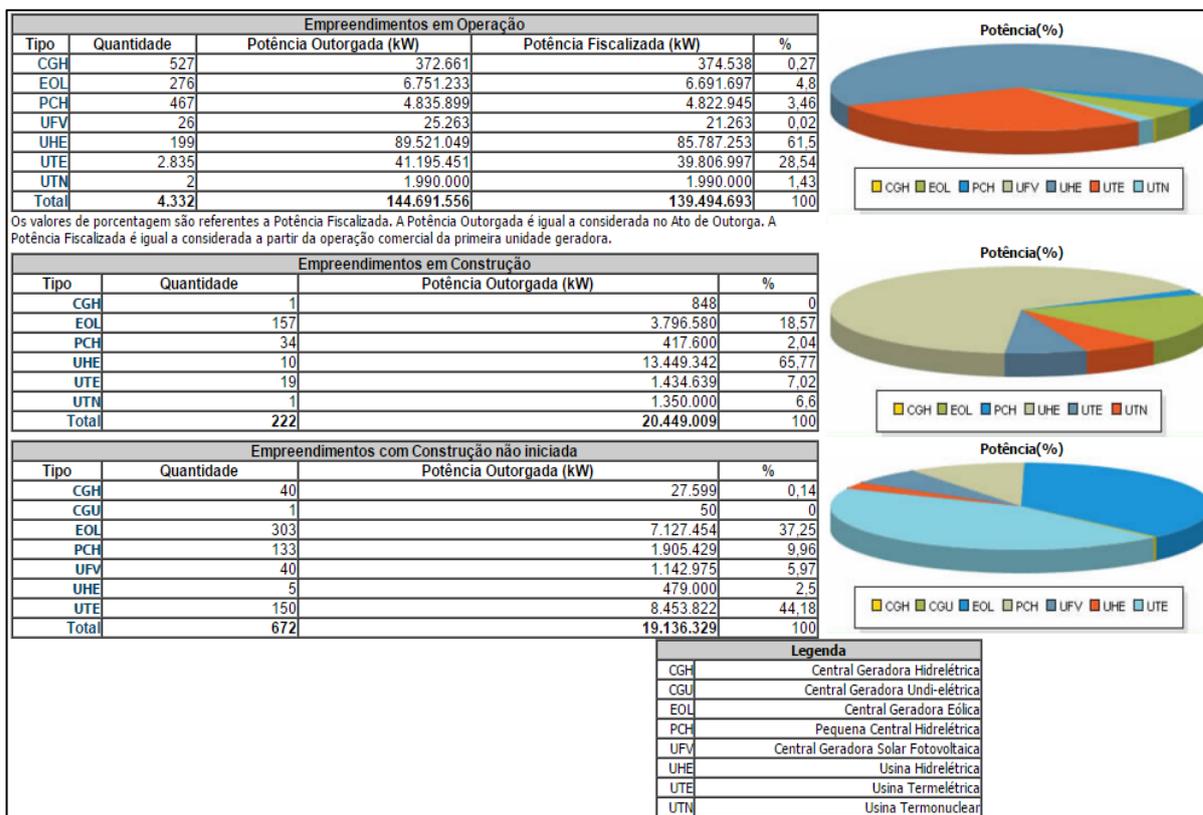


Figura 1 – Capacidade de geração do Brasil – novembro/2015

Fonte: ANEEL, 2015

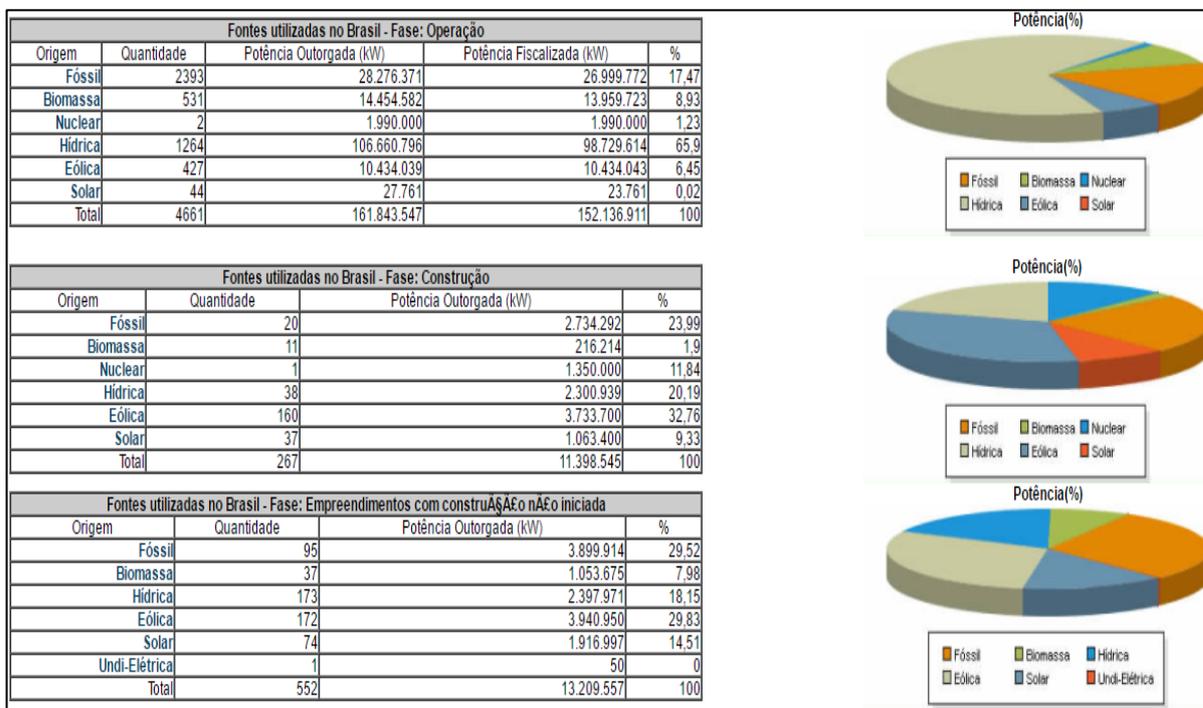


Figura 2 – Capacidade de geração do Brasil – maio/2017

Fonte: ANEEL, 2017

Lentamente vem se percebendo a diminuição dos preços dos equipamentos devido às novas tecnologias e também por parte de alguns estados (por exemplo: São

Paulo, Minas Gerais, Goiás e Pernambuco) existe a isenção do Imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e sobre prestações de serviços de transporte interestadual e intermunicipal e de comunicação (ICMS) na compensação da energia produzida (CONVÊNIO ICMS, 2015), ou seja, a energia que é produzida não deveria ser taxada pelo imposto, e também pela relevância destes sistemas alternativos para tentar evitar gargalos no sistema elétrico.

No contexto de geração distribuída, este trabalho aborda sistemas fotovoltaicos (SFV), visto que esta forma de geração de energia vem se tornando a cada ano mais acessível à população, tornando-se uma forma de geração mais simples e interessante.

O trabalho está estruturado em capítulos que abordam conceitos acerca do assunto de qualidade de energia e sobre os sistemas fotovoltaicos; as normas pertinentes ao estudo; os detalhes dos processos construtivos e técnicos para interligar os inversores à rede de distribuição e; capítulos específicos sobre os resultados encontrados e analisados pelas medições.

1.1 TEMA

A temática deste trabalho é a comparação da qualidade de energia elétrica de uma empresa, na qual está instalado um sistema fotovoltaico, utilizando como base de dados valores obtidos em medições das principais grandezas elétricas, antes e depois da instalação do SFV.

1.1.1 Delimitação do Tema

São descritos também o estudo do comportamento das cargas existentes na empresa, na concepção do projeto de um SFV e as possíveis diferenças que podem ocorrer na instalação do mesmo. A abordagem é realizada conforme o objetivo geral.

O problema identificado quando da proposição deste trabalho está relacionado à necessidade de comparar a qualidade de energia elétrica gerada em um SFV e o

comportamento das principais grandezas elétricas (níveis de tensão, distorções harmônicas totais de tensão e corrente, e outros distúrbios elétricos) associadas com a geração de energia solar fotovoltaica. Para isso foi avaliado a situação do sistema antes da instalação do SFV, e também após a instalação, se o comportamento do sistema e as cargas operam adequadamente com a energia do SFV, tendo como base as normas referentes às instalações do SFV e de QEE.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A ideia inicial da concepção deste trabalho comparar o efeito na qualidade de energia em uma instalação industrial quando um sistema fotovoltaico é conectado à rede, concomitantemente, apresentar os equipamentos e a estrutura realizada na concepção do SFV. A análise da QEE requer o uso de equipamentos confiáveis e calibrados para que as medições possam ser válidas para o estudo, portanto, existe a necessidade da utilização de um analisador de energia para a obtenção dos dados com precisão.

Com a adição de um SFV na instalação, observa-se uma melhora na qualidade de energia injetada na rede, e com isso, aumenta-se a eficiência da instalação, minimizando as perdas tanto para o sistema elétrico quanto para os equipamentos, sendo esta a conclusão relatada em estudos (URBANETZ, 2010), contudo, o objetivo deste trabalho foi comparar o efeito de instalar um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) e observar mudanças na qualidade energética da empresa em questão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Comparar a qualidade de energia elétrica no sistema de distribuição interna de uma indústria antes e após a instalação de um sistema fotovoltaico trifásico de 50,4 quilowatts (kW) pico instalado.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar conceitos sobre qualidade de energia em sistemas industriais e de energia gerada em sistemas fotovoltaicos.
- Efetuar estudo preliminar do comportamento e características elétricas, classificando as cargas existentes no sistema industrial estudado para identificar possíveis interferências no SFV.
- Coletar os dados das grandezas elétricas necessárias para verificar a qualidade de energia elétrica na empresa antes e após a instalação do SFV.
- Descrever o procedimento adotado pela concessionária local (COPEL) para ligação do sistema fotovoltaico à rede;

1.4 JUSTIFICATIVAS

A tendência em utilizar fontes alternativas vem se acentuando principalmente com apelo ambiental, logístico e também econômico. Portanto, estudar e pesquisar outras formas de geração de energia por fontes alternativas vem crescendo, principalmente no meio industrial e acadêmico.

Existe a necessidade de avaliar os índices da qualidade de energia injetada no sistema elétrico através destas fontes de energia alternativa, tendo como escopo deste trabalho, a produção de energia solar fotovoltaica.

O tratamento para a resolução deste trabalho requer atenção às normas vigentes sobre a qualidade de energia entregue para o sistema, possuindo os equipamentos, utilizados para o projeto, devidamente certificados pelas entidades competentes e também para a ligação do SFV à rede.

A intenção de produzir este trabalho é difundir os conhecimentos adquiridos, e aplicá-los em futuras instalações, tanto para área de pesquisas quanto para o mercado especializado neste ramo de geração de energias alternativas.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O procedimento inicial do estudo foi apresentar alguns conceitos e elucidar terminologias advindas dos assuntos sobre sistemas fotovoltaicos e Qualidade de Energia Elétrica (QEE).

Toda a estrutura do local foi concebida para o sistema fotovoltaico. Ou seja, o telhado com as águas direcionadas ao norte e dispostas como mostra a Figura 3, foram projetadas exatamente para receber os módulos fotovoltaicos.



Figura 3 – SFV sendo instalado no barracão
Fonte: Autoria própria

As medições consistiram em duas etapas. A primeira etapa de medições foi feita com o analisador de energia da EMBRASUL RE 7000. Este equipamento é patrimônio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e foi utilizado para a realização deste trabalho. Ele foi programado para coletar dados do sistema elétrico da empresa, como tensão, corrente, potência, harmônicas, surtos, e a cada período pré-determinado, as informações foram descarregadas para novas aquisições. Esta primeira parte de medições foram realizadas nos dias 09 a 16 de maio de 2015.

Após a instalação do SFV, uma nova etapa de medições da QEE, foi realizada em 14 a 16 e 27 a 30 de setembro de 2016, onde foram coletados mais dados para registrar o comportamento do sistema fotovoltaico em funcionamento.

Após as medições, os resultados foram discutidos e avaliados, assim como, a relevância da instalação do sistema fotovoltaico tanto em relação à energia convertida quanto aos níveis de qualidade de energia propostos pela instalação do SFV.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é composta pelos seguintes capítulos:

Capítulo 1: introdução, explicitando objetivos e apresentando os métodos e a organização de como os estudos foram realizados;

Capítulo 2: revisão bibliográfica, sendo a parte conceitual para o entendimento e apresentação de terminologias explicitadas durante o texto, mencionando fontes alternativas utilizadas para geração de energia; a energia solar e o efeito fotovoltaico; explicação de cada item necessário para se realizar um estudo e projeto de um SFV; conceitos de qualidade de energia; distúrbios da energia elétrica, citando e exemplificando os mais representativos; foram apresentadas as normas nacionais a respeito de geração de energia por meio de fontes alternativas, com ênfase a energia solar fotovoltaica, e quais são os parâmetros que devem ser seguidos para a correta implantação de um SFVCR; foram demonstrados os procedimentos que a concessionária local (COPEL) realiza os testes para a ligação dos inversores à rede elétrica; sobre a qualidade de energia – métodos de como avaliar uma instalação elétrica.

Capítulo 3: parte do trabalho onde descreve a empresa, descrição das cargas mais significativas, como o projeto foi concebido para a instalação dos módulos fotovoltaicos; assim como, os principais equipamentos que compõe o sistema fotovoltaico.

Capítulo 4: primeira etapa de medições, demonstração dos resultados para o levantamento dos dados da empresa, da real situação da qualidade energética do local antes de instalar o SFV, compreensão dos dados adquiridos durante todas as medições;

Capítulo 5: na segunda etapa de medições, o mesmo método de medição demonstrado na primeira parte, e também, a monitoração dos parâmetros elétricos do SFV, porém em épocas diferentes. Foram comparados os aspectos gerais da QEE que determinou as mudanças significativas após a implantação do SFV e a constatação dos níveis de qualidade de energia através dos gráficos gerados pelo *software* do analisador utilizado. Também foi mostrado o perfil de geração de energia, fornecido pelo *software* do inversor e do analisador; compreensão e comparação dos dados adquiridos durante todas as medições.

Capítulo 6: as conclusões que foram obtidas de todos os registros apresentados durante o processo de realização deste trabalho, aliando todas as medições e finalizando o estudo do impacto que o sistema fotovoltaico teve sobre a QEE da empresa.

2 CONCEITOS E NORMAS RELACIONADAS AO SISTEMA FOTOVOLTAICO E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo são abordados conceitos contendo exemplos de fontes alternativas de energia encontradas no país, explicações ao que tange o estudo sobre SFVs, da caracterização dos principais distúrbios elétricos e normas pertinentes relacionadas aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) e a qualidade de energia elétrica (QEE).

2.1 EXEMPLOS DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

O desenvolvimento de um país e de seus habitantes está diretamente relacionado à produção e à qualidade da energia elétrica, portanto a produção de energia deve acompanhar este crescimento, sem deixar de se preocupar com os recursos naturais utilizados e o meio ambiente.

Para tanto, é preciso além de melhorar a capacidade das fontes de energia já existentes, investir em novas formas de geração de energia que não causem tanto impacto negativo para o ambiente. Essa é a ideia do conceito de fontes alternativas de energia. Alguns exemplos que já estão sendo utilizados em várias partes do mundo, e com grande aceitação pela comunidade, são a geração de energia solar fotovoltaica, eólica, biomassa, geração de energia por pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e pelo movimento das marés (maremotriz) (ELETROBRAS, 2015).

A energia solar fotovoltaica pode ser aproveitada para a produção de eletricidade através do fenômeno fotovoltaico, onde os módulos fotovoltaicos captam a energia solar, convertendo-a em eletricidade. Este tipo de geração de energia é utilizado em larga escala pela Europa, principalmente na Alemanha e Itália, e com um grande crescimento econômico na Ásia; a China é uma forte concorrente na corrida em geração de energia fotovoltaica (UNISINOS, 2014). No Brasil, é uma tecnologia que está crescendo e obtendo cada vez mais adesão da população, mesmo com diversos impasses a serem resolvidos, tanto por parte do governo, quanto a nível operacional dentro do sistema elétrico.

Uma notícia publicada pelo site da ANEEL, em maio de 2017, mostrou que “o número de conexões de micro e minigeração de energia ultrapassou 10 mil instalações no Brasil, sendo que até o dia 11 de maio de 2017, apresentou 10.385 micro e mini usinas com potência instalada de 113.195,48 quilowatts (kW). Indica também que a fonte renovável mais utilizada pelos consumidores-geradores é a solar com 10.280 adesões, seguida da eólica com 50 instalações. O estado com o maior número de micro e minigeradores era Minas Gerais (2.225 conexões), seguido de São Paulo (2.094) e Rio Grande do Sul (1.096)” (ANEEL, 2017).

A energia eólica é a energia fornecida através dos ventos e correntes de ar que movimentam as pás de uma turbina acoplada em um eixo de um gerador (aerogerador). Esses aerogeradores podem ser utilizados em locais isolados ou conectados com a rede elétrica e é uma das formas mais promissoras de geração de energia. No Brasil, diversos parques eólicos já estão em funcionamento, como no caso da Central Geradora Eólica Casa Nova, na Bahia; o Complexo Eólico Cerro Chato, no Rio Grande do Sul, na fronteira com o Uruguai; no Paraná, o parque eólico de Palmas com potência estimada de 2,5 megawatts (MW), e outros projetos que devem entrar em operação nos próximos anos (ELETROBRAS, 2015).

A chamada biomassa utiliza materiais de origem orgânica, dejetos de animais, lixo orgânico e resíduos de processos industriais (como o bagaço da cana de açúcar, da casca do arroz e indústrias de papel) para geração de gás, eletricidade e calor. Essa forma de geração de energia é obtida por um equipamento chamado de biodigestor, o qual transforma dejetos e resíduos em biogás e adubo. Alguns exemplos de projetos são: O Projeto Alto Uruguai que é uma parceria entre a Eletrobras, a Eletrosul, a Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó), o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano e Regional (IPPUR/UFRJ), o Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB) e as 29 prefeituras da região (ELETROBRAS, 2015).

Uma usina hidrelétrica é considerada uma PCH quando sua capacidade instalada é superior a 1 MW e igual ou inferior a 30 MW e a área do seu reservatório tem até 3 km². As PCHs geram poucos impactos ambientais, podendo produzir energia em regiões isoladas que possuem rios pequenos e médios. A Eletrobras investe em projetos do gênero, como as PCHs Barra do Rio Chapéu e João Borges, localizadas em Santa Catarina (ELETROBRAS, 2015).

A energia cinética produzida pelos movimentos do mar (maremotriz) é outra forma de se obter energia. Para isso são construídos diques que envolvem uma praia, e quando a maré sobe, a água entra e fica armazenada neste dique. Quando a maré baixa, a água sai pelo dique, como em qualquer outra barragem. Este sistema não é tão eficiente e possui limitações em seu uso, como por exemplo, necessitar de grandes diferenças de amplitude nas marés altas e baixas (com pelo menos 5,5 metros). Existem poucos lugares no mundo propícios para a instalação destes diques, existindo unidades na França, Estados Unidos e Escócia (PORTAL ENERGIA, 2010).

2.1.1 Energia solar e energia fotovoltaica

A energia solar pode ser aproveitada de várias maneiras, sendo que as mais utilizadas para gerar eletricidade, são em forma de calor e pela radiação. Existem diversas usinas que utilizam coletores e refletores para melhorar a captação desse calor com objetivo de esquentar a água, e transportá-lo para produzir vapor e acionar uma turbina acoplada a um gerador (GAZOLI, VILLALVA, 2012).

Muitas vezes, os coletores solares térmicos, utilizados em residências, para aquecer a água de forma simples, são confundidos com os módulos fotovoltaicos, os quais utilizam o efeito fotovoltaico para geração de energia elétrica.

O efeito fotovoltaico, o qual foi observado pela primeira vez por Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, é o fenômeno no qual a luz do Sol incide sobre a célula fotovoltaica, composta por materiais semicondutores do tipo P e N, e observa-se uma diferença de potencial elétrico (ddp) proporcional a intensidade da luz (limitado pela transferência máxima de elétrons que os materiais semicondutores aguentam) e enquanto houver incidência de luz (pois não se trata de um elemento com capacidade de armazenamento de energia) (GHENSEV, 2006).

As camadas semicondutoras da célula fotovoltaica são compostas tipicamente pela junção de dois tipos de semicondutores, um do tipo P (positivo) e outro do tipo N (negativo). Quando estas camadas entram em contato, quimicamente falando, os materiais do tipo P apresentam menos elétrons em sua estrutura molecular, possuindo lacunas, enquanto que os elementos do tipo N possuem excedentes de elétrons.

No momento em que a luz incide nessa junção semicondutora, a energia descarregada sobre os elétrons gera um campo elétrico que cria uma ddp (no caso do silício, da ordem de 0,6 V) criando um fluxo entre os elétrons (os quais migram das bandas de valência para bandas de condução) do semicondutor do tipo N para o tipo P, e as lacunas do material do tipo P para o do tipo N, originando uma corrente elétrica contínua (NASCIMENTO, 2004). A Figura 4 mostra o esquema de uma célula fotovoltaica.

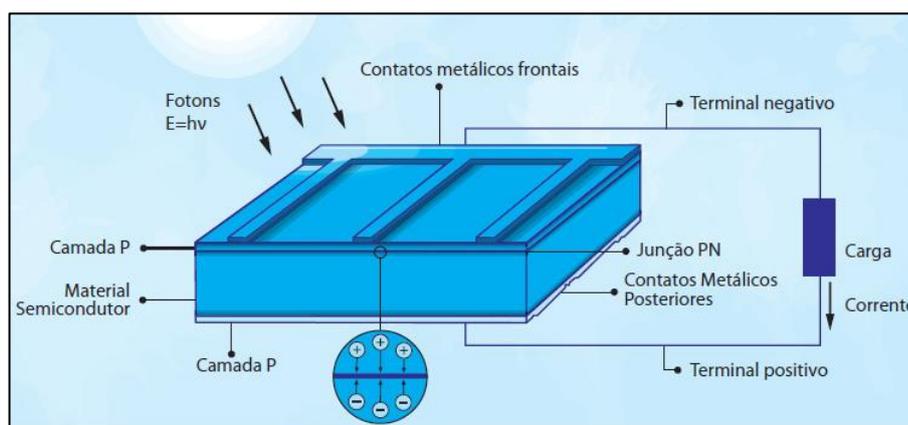


Figura 4 – Efeito fotovoltaico em uma célula fotovoltaica de material semicondutor
Fonte: Prysmian Club, 2011

O silício é o material mais utilizado, até então, para a fabricação das células fotovoltaicas. Em sua forma pura ele é um mau condutor elétrico, e para alterar sua composição química, é realizado o processo de dopagem, no qual é adicionado um elemento como o fósforo, obtendo um material com elétrons livres (tipo N) e para um elemento com elétrons livres, utiliza-se, por exemplo, o Boro, obtendo um material com cargas positivas livres (tipo P) (NASCIMENTO, 2004).

2.2 CONCEITOS PARA O ESTUDO DE UM SFVCR

Este tópico aborda de forma sucinta alguns conceitos necessários para o entendimento do projeto e da instalação de um SFVCR, baseados nos conceitos explicitados por Gazoli, Villalva (2012):

- Radiação solar – constituída de ondas eletromagnéticas, transmite a energia do Sol proporcional à frequência da onda. Ela pode ser classificada como

radiação direta (corresponde aos raios solares emitido diretamente em um plano horizontal), em radiação indireta (corresponde aos raios solares que sofrem reflexões, seja pelas nuvens, poeira ou outros objetos) e a radiação global (soma de todas as radiações solares).

- Irradiância – grandeza utilizada para quantificar a radiação solar, expressa por W/m^2 (potência por área). Na superfície terrestre, esse valor é próximo de $1000 W/m^2$, sendo este valor utilizado na prática para especificação de módulos fotovoltaicos pelos fabricantes.
- Irradiação – grandeza utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma superfície ao longo de um tempo (Wh/m^2), por exemplo, em um dia. Esse tipo de informação é necessário para estimar a geração de energia em um determinado local.
- Massa de ar – corresponde a espessura atravessada pelos raios solares na atmosfera que depende do ângulo zenital do Sol (ângulo zenital do Sol é zero quando ele se encontra acima do observador), onde o espectro solar correspondente a 1,5 AM (em inglês *air mass*).

Em relação à orientação dos módulos, os seguintes termos são comumente encontrados na literatura sobre o assunto:

- Ângulo azimutal – ângulo de orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico, portanto, durante o dia este ângulo varia. Meio dia solar significa ângulo azimutal zero, quando o observador vê o Sol exatamente a sua frente. Quando no hemisfério sul, o ângulo coincidir com o norte polar da Terra, e quando no hemisfério norte, ele é medido em relação ao sul geográfico. Este conceito reflete na posição dos módulos.
- Declinação solar – ângulo dos raios solares com relação a linha do Equador. Varia durante o ano com a inclinação da Terra. Nos equinócios, este ângulo é zero, e nos períodos de solstícios o ângulo é máximo.
- Altura solar – depende da posição do Sol no dia durante todo o ano. Varia conforme localização do observador em relação a linha do equador (mais próximo, alturas solares menores e mais longe, alturas maiores).
- Ângulo de incidência dos raios solares – os raios solares dependem da posição do Sol (ângulos azimutal e zenital e altura solar). Quando os raios incidem

perpendicularmente nos módulos fotovoltaicos, significa que o ângulo de instalação deve ser tal que esta situação ocorra para que haja uma maximização da captação de energia solar.

- Ângulo de instalação – é relacionado com qual ângulo os módulos devem estar para obter melhor eficiência na captação da energia solar. Os módulos devem tentar sempre ficar dispostos para a linha do Equador. Um primeiro passo para determinar o ângulo, parte da latitude geográfica na qual a cidade está localizada.
- Sombreamento – fenômeno no qual existem sombras projetadas nos módulos, fazendo com que a produção de energia seja afetada. Portanto, deve-se evitar áreas sombreadas, seja por árvores, prédios próximos, e também, observando a direção do Sol, para que os módulos não produzam sombras em outros módulos próximos.

Os seguintes pontos referem-se aos dados pertinentes para dimensionar o SFV, de modo que atenda as especificações técnicas, financeiras e normativas:

- Levantamento de dados de produção de energia – referem-se aos dados geográficos para o estudo de implantação do sistema, envolvendo características ambientais como temperatura e latitude.
- Características do sistema e Levantamento das cargas – características do sistema como entrada de energia, demanda, e quais cargas serão supridas pelo SFV devem ser conhecidas para o correto dimensionamento.
- Quanto se deseja atender a demanda (parcial ou total) – esta pode ser uma decisão do responsável pela contratação do serviço de instalação, havendo como fatores limitantes, recursos financeiros e área disponível de instalação dos módulos para atender a demanda requisitada.
- Equipamentos utilizados – os equipamentos devem atender aos requisitos das normas de qualidade impostas pelo Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Deve-se optar por equipamentos com maiores eficiência e reconhecimento no mercado.
- Orçamento e *payback* – decisão que deve ser tomada ainda na fase de projeto, tendo consciência sobre qual o tempo de retorno do investimento, levando em

consideração custos de implantação e possíveis mudanças na estrutura elétrica/estrutural do local.

- Projeto e aceitação pela concessionária – somente é possível a ligação de um SFVCR após aceitação do projeto junto à concessionária local, devidamente orientado pelas normas referentes. Após a instalação, haverá um comissionamento garantindo o correto funcionamento do sistema. Substituições nas medições de energia podem ocorrer no momento da conexão à rede (substituição de medidores de energia pelos modelos eletrônicos bidirecionais).

2.3 IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Na essência do termo qualidade de energia, Dugan (1996) descreve-o como sendo “qualquer problema manifestado em forma de tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou não operação do equipamento do consumidor”. Martinho (2014) define qualidade de energia como “um meio de caracterizar variações de tensão e frequência, sejam elas em regime transitório ou permanente, que podem causar um mau funcionamento e até mesmo a falha dos equipamentos elétricos”. Acrescentando, Antunes, Leão, Sampaio, (2014) definem que “qualidade de energia elétrica é a condição do sinal elétrico de tensão e corrente que permite que equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e vida útil”.

Como a energia elétrica um produto, existe a necessidade de órgãos fiscalizadores e normativos para tratar a questão da qualidade da energia gerada e distribuída. Os parâmetros e normas são decididos em conjunto com a ANEEL, concessionárias de energia elétrica e também, fabricantes de equipamentos elétricos para entrar em um consenso.

Existem vários níveis de preocupação em relação à qualidade de energia fornecida, desde as concessionárias, que estão preocupadas em fornecer continuamente energia elétrica com níveis de tensão e frequência normalizados, assim como nas indústrias, onde a qualidade é mensurada, por exemplo, na

quantidade de interrupções devido a falhas no sistema elétrico, como também, fabricantes de equipamentos eletro-eletrônicos, em desenvolver equipamento que não sejam “poluidores elétricos” e estabelecer parâmetros de eficiência, níveis de interferências eletromagnéticas (IEM), distorções e variações máximas de tensão e corrente que seus equipamentos podem transmitir para o sistema elétrico.

Estas preocupações são motivadas pela maior exigência do mercado consumidor e dos equipamentos que utilizam tecnologia de sistemas microcontrolados, que são afetados por estes distúrbios, assim como pelo fator financeiro, acarretando gastos desnecessários com adequações nos sistemas e possíveis substituições de equipamentos.

Além das indústrias, os consumidores residenciais podem sentir os efeitos de uma qualidade de energia precária, afetada pelos distúrbios elétricos, sejam estes efeitos causados pela ausência de energia como também pela possível avaria dos equipamentos eletrodomésticos.

Por meio de medições é possível monitorar os distúrbios encontrados e determinar os impactos causados por estes distúrbios e tomar as decisões apropriadas para cada caso. Dentre os objetivos das medições estão em diagnosticar incompatibilidades entre a fonte de energia e a carga, medir o desempenho, analisar as causas e avaliar o desempenho de equipamentos e dispositivos (ANTUNES, LEÃO, SAMPAIO, 2014).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS DISTÚRBIOS DA ENERGIA ELÉTRICA

Nos itens a seguir serão explanados alguns dos distúrbios da energia elétrica mais comumente encontrados nos diversos segmentos industriais. Estes distúrbios modificam a forma de onda, seja pela variação da amplitude e/ou alterando a forma de onda senoidal característica. A Figura 5 mostra alguns dos principais distúrbios encontrados, entre eles estão: *SAG*, *SWELL*, interrupção, harmônicos e surtos.

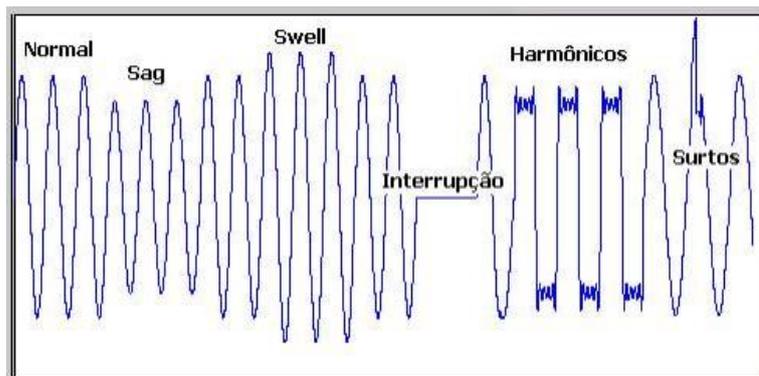


Figura 5 – Alguns dos principais distúrbios elétricos em uma onda senoidal
Fonte: FRANCO, Qualidade de Energia – Causas, Efeitos e Soluções, 2013

Os termos em inglês *SAG* e *SWELL* mostrados na Figura 5 são usados frequentemente nas literaturas internacionais onde representam, respectivamente, um afundamento e elevação de tensão. Os conceitos apresentados têm referência das normas IEEE, sendo que para normas nacionais, atende-se pelas normas do PRODIST.

2.4.1 Variação de tensão

O termo variação de tensão compreende uma modificação na amplitude da forma de onda da rede elétrica. Esta variação pode ser para mais ou para menos em relação ao seu valor nominal, portanto, ela é caracterizada como um afundamento (subtensão, *SAG* ou *DIP*) ou elevação (sobretensão, *SWELL* ou *SURGE*) na amplitude da tensão. Outro fator que implica nessa caracterização é o tempo que perdura este fenômeno, classificando-o em variação de tensão de curta duração e variação de tensão de longa duração. Há também os extremos deste comportamento, levando a caracterizar os fenômenos de interrupção e transitórios.

Martinho (2013) define variação de longa duração como desvios acerca do valor eficaz da forma de onda (senoidal), sendo considerada de longa duração para tempos maiores de 1 minuto. Ela pode ser classificada como subtensão e sobretensão. Estes efeitos geralmente não são resultados de faltas no sistema, mas causados pela variação de carga e operações de chaveamento no sistema. Além disso, fatores como a temperatura, a distância, fator de potência, cogeração ou geração própria (dependendo de como ela foi projetada) podem alterar a impedância do circuito, causando variações na tensão.

Com relação a subtensão, Dugan (1996) descreve como um fenômeno no qual há um decréscimo na tensão eficaz para menos de 90% do valor nominal e com duração maior que 1 minuto. Este fenômeno resulta de energizações de grandes cargas, desconexão de bancos de capacitores e circuitos muito carregados, podendo causar subtensão no sistema. Existindo um equipamento regulador de tensão, este irá regular a tensão dentro dos limites toleráveis, ou seja, regular para a tensão nominal fornecida.

A subtensão dentro de um sistema poderá causar diversos comportamentos indesejáveis, como desligamento de equipamentos sensíveis, como em controladores lógicos programáveis (CLPs), perdas de dados, falhas no envio de informações, elevação de corrente nos motores e o acionamento de proteções para casos de subtensão e sobrecorrente, gerando paralisação nos processos industriais (MARTINHO, 2013).

A sobretensão é um fenômeno onde a tensão eficaz ultrapassa 10% do seu valor nominal, com duração maior que 1 minuto (norma IEEE). Também explica que geralmente é resultado de desligamento de cargas e energização de banco de capacitores, ou também, a configuração incorreta no *tap* do transformador pode causar sobretensão no sistema (DUGAN, 1996).

Uma das causas mais comuns para isso é o uso de banco de capacitores fixos para correção de fator de potência por gerar reativos em horários fora de ponta, ou seja, horários onde não há consumo de reativos por motores e máquinas, isso causa um aumento de tensão nas linhas de distribuição, podendo causar também, queima de equipamentos e paradas indesejadas nos processos industriais (MARTINHO, 2013).

Variações de curta duração podem ser causadas por condições de falta, energização de grandes cargas as quais requerem altas correntes de partida ou também, por perdas de conexões intermitentes de energia. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, podem ocorrer variações de curta duração (aumento ou diminuição da amplitude da tensão) durante a falta, sendo cessada pelos dispositivos de proteção adequados.

Um afundamento de tensão de curta duração, também chamado de *SAG* (termo mais usado nos Estados Unidos para afundamento de tensão) ou *DIP* (termo definido pela IEC - *International Electrotechnical Commission* para afundamento de

tensão), é definido como um decréscimo de tensão ou corrente eficaz entre 0,1 e 0,9 pu, com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto (DUGAN, 1996).

Baseado em Bollen (2000), SAGs são causados por curto circuitos, sobrecargas e partidas de grandes motores, os quais afetam diversos equipamentos, tais como *drives* de ajuste de velocidade, equipamentos de controle de processos e equipamentos sensíveis. As curtas interrupções e a maioria das interrupções longas originam no local de distribuição, enquanto que SAGs nos terminais do equipamento pode ser devido a um curto circuito a centenas de quilômetros em um sistema de transmissão.

Uma elevação de tensão de curta duração, também chamado de *SWELL* é definido como um acréscimo da tensão ou corrente eficaz entre 1,1 e 1,8 pu com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto. Assim como SAG, é geralmente associado com sistemas sob condições de falta (durante uma falta fase-terra). Podem ser causados por desligamento de grandes cargas ou energização de um grande banco de capacitores. O impacto produzido por *SWELL* é em função da localização da falta, a impedância e a qualidade do aterramento do sistema, principalmente pela falta fase-terra que pode ocorrer (DUGAN, 1996).

Dependendo desta elevação de tensão, se não houver dispositivos de proteção para atuar, pode ser muito prejudicial aos equipamentos conectados neste sistema, podendo deixá-los inutilizáveis, ou também, aquecendo-os pela alta energia injetada reduzindo drasticamente a vida útil destes equipamentos, além de provocar paradas indesejáveis em um sistema de produção industrial, por exemplo.

Os transitórios (ou também conhecido por transiente ou *SURGE*) são tidos como fenômenos momentâneos, ou seja, eles ocorrem de forma muito rápida (podendo ocorrer na ordem de microssegundos), porém, podendo causar grandes danos nos equipamentos. Podem aparecer de diversas formas, mais frequentemente como: descargas atmosféricas (diretas ou indiretas), religamento de um circuito, chaveamento de cargas indutivas ou capacitivas, ou também, por mau funcionamento de equipamentos. Os transitórios são divididos em duas categorias: impulsivo (devido às descargas atmosféricas) e oscilatório (devido ao chaveamento de cargas) (MARTINHO, 2013).

O transitório impulsivo acontece devido às descargas atmosféricas, que provocam uma frente de onda perturbando o sistema (em regime permanente), a qual

possui uma frequência acima da frequência nominal do sistema causando picos de tensão de curta duração. As descargas atmosféricas são fenômenos imprevisíveis, portanto, podem percorrer condutores, causar uma ddp muito grande em uma malha de aterramento, podendo causar elevadas descargas em animais ou pessoas que estiverem por perto e até mesmo, ocorrendo faíscas iniciando incêndios. Para mitigar os danos causados por este fenômeno, são utilizados DPS (Dispositivos de Proteção contra Surtos) para proteção de circuitos, além de projetos de SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas) e aterramentos corretamente dimensionados (MARTINHO, 2013).

O transitório oscilatório ocorre pela alteração na tensão/corrente de forma brusca, sendo suas principais causas: a energização de linhas, desligamento de cargas indutivas, energização de bancos de capacitores e transformadores e também em situações de eliminação de faltas. A duração deste distúrbio ocorre na ordem de microssegundos e milissegundos com frequências menores de 5 kHz podendo ser maiores que 500 kHz. Novamente, equipamentos sensíveis estão susceptíveis a danos por causa deste fenômeno. Formas de mitigar este distúrbio podem ser utilizados filtros de alta frequência e transformadores isoladores para os circuitos mais sensíveis a alterações bruscas deste nível (MARTINHO, 2013).

A Interrupção é definida por valores de tensão menores que 0,1 pu e também pela ausência de tensão, podendo ocorrer em alguns ciclos não excedendo a 1 minuto. Basicamente o que pode acontecer é a parada total indesejada em um sistema de produção acarretando perdas financeiras, tanto pelo tempo parado quanto pelo tipo de produto e maquinário utilizado no processo. A causa deste distúrbio pode estar ligada a faltas no sistema de distribuição de energia, ou também, mau funcionamento de equipamentos causando este tipo de efeito na forma de onda (DUGAN, 1996).

Caso a interrupção persista, as possíveis causas podem ser um curto circuito nas linhas de transmissão ou distribuição, interrupção das linhas ou também a queda de um poste ou torre de transmissão.

Dugan (1996) descreve variação de curta duração como um fenômeno que pode ser designado como instantâneo, momentâneo ou temporário, compreendendo os fenômenos de interrupção, *SAG* e *SWELL* (dependo da duração do distúrbio e da magnitude da tensão) em relação a forma de onda da rede em seu valor nominal.

Em relação a designação de instantânea, a duração típica para este efeito compreende de 0,5 a 30 ciclos. Para o fenômeno de interrupção, a magnitude é menor que 0,1 pu; SAG, entre 0,1 a 0,9 pu e; SWELL, entre 1,1 a 1,8 pu. A Tabela 2 mostra a classificação das variações de tensão, segundo o módulo 8 do Prodist (Tabela 9 do documento):

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Tabela 2 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração
Fonte: Prodist – Módulo 8, Revisão 6, 2015

2.4.2 Distorções Harmônicas

Segundo a definição do Prodist - Módulo 8 (2015), “as distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental”. Com base em Dugan (1996) a distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares, os quais não possuem a corrente proporcional a tensão aplicada, ou seja, se aplicada uma tensão senoidal, o resultado será uma corrente distorcida. Este fenômeno causa uma alteração na forma de onda, e diferentemente das variações de tensão, onde os efeitos em sua maioria são temporários, as distorções harmônicas são distúrbios de natureza constante.

Uma forma de onda distorcida se comparada com a qual foi originada, pode ser indícios de presença harmônica. Essa onda distorcida pode ser modelada

matematicamente graças a série de Fourier, onde toda função periódica e não senoidal pode ser representada pela soma de expressões a qual é composta pela frequência fundamental e por frequências que são múltiplas dessa frequência fundamental, e possivelmente, uma componente contínua. Uma mostra da série de Fourier é vista na Figura 6, decomposta em suas frequências harmônicas:

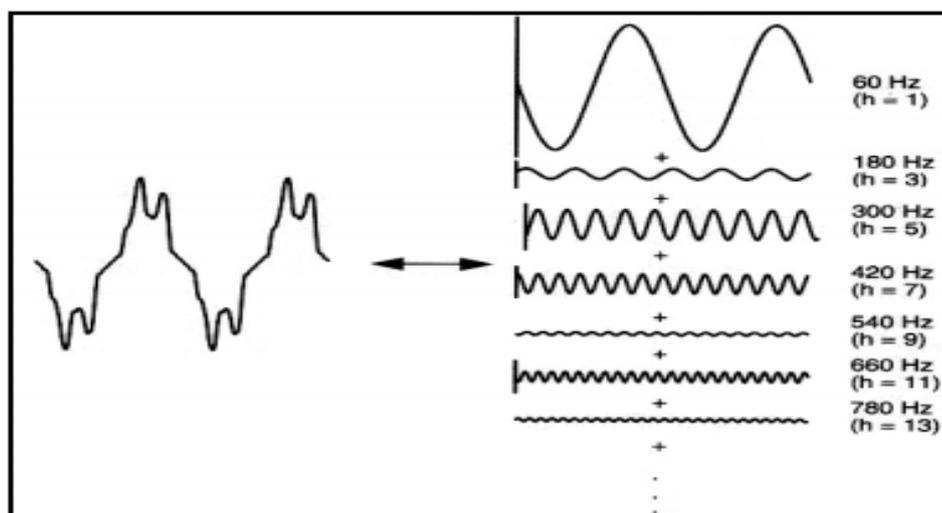


Figura 6 – Decomposição da onda distorcida
Fonte: DUGAN, 1996

A deformação da onda senoidal pode aparecer tanto na forma de onda da corrente quanto na tensão, sendo que na tensão ocorre devido a circulação de correntes com teor harmônico em função das impedâncias do circuito. Além disso, com a alteração na forma de onda, seu valor de pico, e também seu valor eficaz, podem aumentar.

Inúmeros problemas podem ocorrer em instalações elétricas, como: disparos intempestivos de disjuntores, sobreaquecimento de transformadores e motores, corrente excessiva nos condutores de neutro, explosões de bancos de capacitores (pelo fenômeno de ressonância causado pela associação de elementos indutivos e capacitivos), entre outros, tendo como principal causa a presença de harmônicos, decorrente de equipamentos não lineares, levando a um estado permanente de poluição harmônica no sistema (ANTUNES, LEÃO, SAMPAIO, 2014).

Em função do nível de poluição harmônica existente em um circuito, equipamentos sensíveis a este distúrbio podem não funcionar, ou funcionar de maneira inadequada. Dugan (1996) mostra que pode significar uma dessas três situações:

- A distorção da tensão é muito grande para determinar devidamente o controle de disparos de tiristores, por exemplo;
- As correntes harmônicas são muito altas para a capacidade de um determinado equipamento, assim como transformadores;
- A distorção harmônica de tensão é muito alta devido às altas correntes harmônicas produzidas pelos dispositivos, dadas as condições do sistema.

Portanto, para cada caso de efeitos harmônicos, deve ser tratado de forma diferente, porém sempre analisando qual é a fonte desses harmônicos e quais os efeitos que estão causando, assim como a relação entre eles.

Segundo Santos (2007), a questão das distorções harmônicas tem aumentado consideravelmente nos diversos pontos constituintes do sistema elétrico. Por isso, os órgãos responsáveis e consumidores têm demonstrado uma grande preocupação por este indicador elétrico, e por isso, recomendações internacionais e nacionais procuram estabelecer limites para estas distorções.

A Distorção Harmônica Total (DHT) é uma medida do quanto a onda está distorcida em relação à senoide de frequência fundamental da rede elétrica. Ele valor é dado em porcentagem e é nulo quando não apresenta componentes harmônicos. Ela é calculada por:

$$DHT_X(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n X_h^2}}{X_1} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde X, pode representar tanto a grandeza tensão quanto à corrente, determinando assim, a DHT de tensão e a DHT de corrente. A Tabela 3, do documento do Prodist – Módulo 8 (2015), mostra em relação às distorções harmônicas totais permitidas nas classes de tensão:

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

Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Fonte: Prodist – Módulo 8, Revisão 6, 2015

Para medir a Distorção Harmônica Individual (DHI), ou fator harmônico, utiliza-se:

$$DHI_X(\%) = \frac{C_h}{C_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde C_h é a componente harmônica (tensão ou corrente) de ordem h em relação à componente fundamental C_1 . A Tabela 4 indica os níveis admissíveis para distorções harmônicas individuais em relação à ordem harmônica e a classe de tensão do circuito:

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
Ímpares múltiplas de 3	>25	1,5	1	1	0,5
	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
Pares	>21	1	0,5	0,5	0,5
	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	

Tabela 4 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)

Fonte: Prodist – Módulo 8, Revisão 6, 2015

2.4.3 Fator de potência

Definido por Antunes, Leão, Sampaio (2014), o fator de potência (FP) é uma medida que indica a eficiência entre a potência ativa que uma carga retira para realizar trabalho em relação à sua potência aparente. Para casos onde não há incidência de harmônicos (somente em circuitos com cargas de comportamento linear na frequência industrial de 60 Hz), este termo é chamado preferivelmente de Fator de deslocamento, onde a relação entre a potência ativa e aparente é igual ao cosseno do ângulo formado entre elas. Na Figura 7 é representado o triângulo de potências:

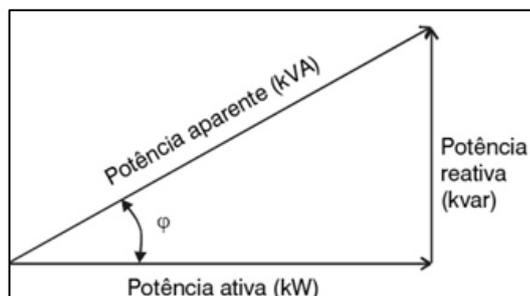


Figura 7 – Triângulo de potências
Fonte: Engenharia, 2010

A potência ativa é a potência que realiza trabalho efetivamente, sendo sua unidade no sistema internacional o Watt (W). Pode ser obtida pela multiplicação entre a tensão, a corrente (eficazes) e o cosseno do ângulo φ :

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

E em sistemas trifásicos, o produto entre a tensão e a corrente de fase (eficazes) e o cosseno do ângulo φ , multiplicados por 3:

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

Ou também, pelo produto da raiz quadrada de 3 pela tensão e a corrente de linha (eficazes) e pelo cosseno do ângulo φ :

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

A potência reativa é a componente que não realiza trabalho efetivamente, existindo nos circuitos devido às características das impedâncias presentes. A unidade pelo sistema internacional é o Volt-Ampère-reactivo (var), obtido em sistemas monofásicos pelo produto da tensão e corrente (eficazes) e o seno do ângulo φ :

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

E em sistemas trifásicos, o produto entre a tensão e a corrente de fase (eficazes) pelo seno do ângulo φ , multiplicados por 3:

$$Q = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \sin \varphi \quad (7)$$

Ou também, pelo produto da raiz quadrada de 3 pela tensão e corrente de linha (eficazes) e pelo seno do ângulo φ :

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi \quad (8)$$

A potência aparente é a soma vetorial das potências ativa e reativa, tendo sua unidade no sistema internacional como Volt-Ampère (VA), possuindo o módulo igual a raiz quadrada algébrica da soma das potências:

$$S = \sqrt{P + Q} \quad (9)$$

E o ângulo dado pelo arco tangente da razão da potência reativa pela potência ativa:

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P} \quad (10)$$

O triângulo das potências mostra que o sistema é eficaz se o ângulo entre a potência ativa e a aparente for igual a 0, sendo assim, quanto mais próximo de 1 for o cosseno do ângulo, menor será a potência reativa, diminuindo a potência necessária para criação de campos elétricos ou magnéticos. Resumindo, quanto mais próximo de 1 for o fator de potência, melhor será o rendimento do sistema. Este fato está interligado com o aproveitamento da energia gerada com a energia consumida, e isso afeta o fator de potência do circuito, além de aumentar os gastos com o sobre dimensionamento de condutores e equipamentos.

Para evitar diversos tipos de gastos, principalmente os de energia elétrica, a ANELL, em seu módulo 8 – item 3 do Prodist, regulamentou que no Brasil, o mínimo fator de potência praticado pelas indústrias é de 0,92 (indutivo para o dia e capacitivo para a noite), até o momento, e podendo ou não, as concessionárias de energia cobrar pelo baixo FP. Segundo Martinho (2013), com um fator de potência médio igual a 0,8 a conta de energia fica 15% mais cara, além do que, se tomar como referência um FP igual 1, se este mesmo FP cair para 0,7, a seção do condutor dobra, e se for para 0,5, a seção do condutor quadruplica.

Existem vários responsáveis pelo baixo fator de potência. Primeiramente, os equipamentos conectados ao circuito que são fabricados fora das normas estabelecidas, com baixa eficiência, também lâmpadas de descargas com reatores de baixo fator de potência, motores superdimensionados exigindo alta potência reativa, transformadores que operam a vazio, fornos de indução, máquinas de solda, etc. O FP total de um circuito se dá em função da somatória de equipamentos no circuito, portanto, quanto mais equipamento com baixo FP estiverem conectados nesse circuito, menor será seu FP total (MARTINHO, 2003).

O tratamento corretivo mais usual é a utilização de bancos de capacitores para a correção de fator de potência, pois normalmente o baixo FP se dá pela elevada carga indutiva conectada no sistema. Para tanto existem bancos de capacitores fixos, semiautomáticos e de acionamento automático.

Porém, para circuitos onde haja harmônicos circulando, existe uma potência de distorção que é representada pela unidade DVA (Volt-Ampère de distorção), no qual a representação de fator de potência é modificada, sendo representada como na Figura 8:

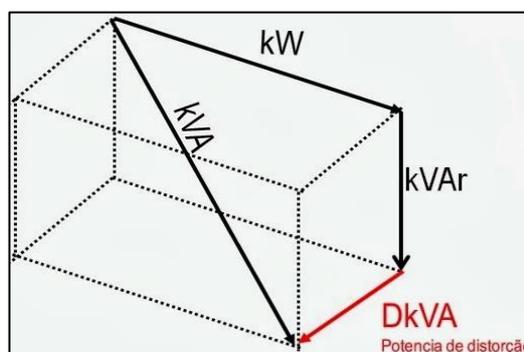


Figura 8 – Representação do fator de potência com harmônicos
Fonte: Qualidade de energia, 2014

Além disso, o fator de potência passa a ser representado pela razão do cosseno φ com a raiz quadrada de 1 mais a DHT ao quadrado:

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

Além disso, a potência aparente é dada desta forma:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (12)$$

2.5 RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687/15 – ANEEL

Em 2011, várias discussões foram geradas pelo Grupo Setorial de Energia Fotovoltaica da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) e pelo Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações (COBEI), juntamente com representantes de empresas e universidades, com o objetivo de promover a energia fotovoltaica, propondo normas para a inserção deste tipo de energia na matriz energética brasileira.

Em 17 abril de 2012 foi aprovada, pela ANEEL, a resolução normativa nº 482, a qual permite a microgeração e minigeração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, conectadas à rede de distribuição de baixa tensão. Esta resolução estabelece que é possível ter acesso aos sistemas de distribuição de energia elétrica, por meio de fontes alternativas (por exemplo, a fotovoltaica), ou seja, o consumidor

passará a ser um autoprodutor de energia, de modo que venha a complementar o consumo próprio, e também, participar do sistema de compensação de energia elétrica.

Em 24 de novembro de 2015, a ANEEL liberou a Resolução Normativa nº 687, a qual altera alguns artigos da Resolução Normativa nº 482 e os Módulos 1 e 3 do Prodist, entrando em vigor em 1º de março de 2016.

Esta norma traz conceitos, diretrizes, conhecimento e delegações às concessionárias de energia e consumidores. Define o conceito de microgeração e minigeração distribuída, sendo que a microgeração se limita a potência instalada menor ou igual a 75 kW por unidade geradora conectada à rede de distribuição por meio de unidades consumidoras (por exemplo, residências, empresas e indústrias). Já a minigeração, da mesma maneira que a microgeração, diferenciando pela potência instalada, superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, ou para demais fontes renováveis de energia elétrica.

A norma faz referência ao Prodist - Módulo 3, em atender às solicitações de acesso para microgeradores e minigeradores (também propostos na NTC 905200).

Os custos de eventuais adequações dos equipamentos de medição, serão de responsabilidade da parte interessada, devendo observar as especificações técnicas do Prodist. Após a adequação do sistema de medição, a responsabilidade de operação, manutenção e possíveis substituições, além de eventuais ampliações ou reforços no sistema de distribuição em função do sistema de geração, serão de responsabilidade da distribuidora de energia, exceto para o caso de geração compartilhada em microgeração, porém para minigeração, deverá fazer parte do cálculo da participação financeira do consumidor.

Também é de competência da distribuidora, a coleta e o envio de informações das unidades geradoras para a ANEEL. A distribuidora deverá também adequar o sistema de medição dentro do prazo, realizando a vistoria e ligação das instalações, e iniciando o sistema de compensação de energia elétrica, assim que for aprovado o ponto de conexão.

Para fins de compensação, a energia ativa excedente injetada no sistema de distribuição pelo consumidor passará a ser em forma de crédito, a ser consumido em um prazo de 60 meses (anteriormente de 36 meses). E quando for o caso, a distribuidora deve utilizar o excedente que ainda não foi compensado, para abater no

consumo dos meses seguintes. Este montante poderá ser abatido em outras unidades, nas quais o proprietário da unidade possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica (CNPJ). O sistema de compensação não elimina a obrigatoriedade de pagamento mínimo na fatura de energia, referente ao custo de disponibilidade da linha para o consumidor.

Também explicita conceitos de geração compartilhada e autoconsumo remoto, onde a primeira se caracteriza pela reunião de consumidores, de uma mesma área, composta por consórcio ou cooperativa de pessoa física ou jurídica, que possui sua unidade de geração em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada, e a segunda, por unidades consumidoras de uma mesma pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com geração distribuída em local diferente das consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, onde a energia excedente será compensada. Para casos com múltiplas unidades consumidoras e geração compartilhada, a solicitação de acesso deverá conter um documento que comprove este compartilhamento entre os integrantes.

A adesão ao sistema de compensação de energia elétrica não se aplica aos consumidores livres (possui demanda contratada igual ou maior que 3 MW, atendido em tensão maior que 69 kV, que pode adquirir energia de qualquer fonte, incentivada e/ou convencional.), ou especiais (possui demanda contratada maior ou igual a 500 kW, individualmente ou que possua o mesmo endereço, ou de direito com o mesmo CNPJ, podendo adquirir energia somente de fonte incentivada).

Caso a distribuidora de energia encontre alguma irregularidade, relacionados a erros técnicos, equipamentos em não conformidade, comprometendo a segurança de pessoas e do sistema elétrico, ela irá desconectar o sistema da rede elétrica até segundo aviso.

2.6 NTC 905200-COPEL

Esta norma técnica corresponde ao acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da COPEL, onde estabelece padrões visando à uniformização e à adoção de procedimentos, em conformidade com os módulos do Prodist, para medição, controle, segurança e operação das unidades geradoras, e com as resoluções

normativas da ANEEL, tendo como objetivo principal, fornecer os requisitos para o acesso de geradores próprios (micro e minigeradores) conectados no sistema de distribuição da COPEL por meio dos consumidores que optarem pelo Sistema de Compensação de Energia Elétrica, por meio da Resolução Normativa nº482 da ANEEL (agora sendo reportada a RN nº 687).

A norma traz os passos para que o interessado possa ter seu gerador de energia elétrica conectado à rede elétrica. Ela informa que os seguintes documentos são necessários para obter a solicitação de acesso:

- Formulário para solicitação de acesso de micro e minigeração distribuída;
- Indicação do ponto de conexão pretendido;
- Projeto das instalações de conexão, incluindo memorial descritivo, localização, arranjo físico, esquemas, e demais itens relacionados;
- Anotação de Responsabilidade Técnica (ART); e
- Licença Ambiental de Operação, ou dispensa, emitida pelo órgão ambiental competente. A Licença Ambiental não será exigida pela Copel para empreendimentos fotovoltaicos instalados sobre telhados.

Com estes documentos entregues e confirmados pela COPEL, ela irá fornecer o Parecer de Acesso, sendo um documento no qual informa as condições de acesso, (conexão e o uso) e os requisitos técnicos para a instalação do consumidor ao sistema elétrico de distribuição. Depois que as obras forem concluídas, o acessante deverá solicitar uma vistoria, onde a COPEL tem até 30 dias a partir da solicitação. A vistoria e a liberação do sistema de geração serão baseadas nos projetos enviados à COPEL e no Parecer de Acesso.

A COPEL, juntamente com o INMETRO, possui um banco de dados sobre os inversores previamente avaliados para a conexão do sistema de geração à rede elétrica. Estes inversores devem possuir sistemas de proteção (podendo estar embutidos) contra distúrbios de tensão e da frequência, um sistema de sincronismo (circuito de sincronismo do gerador só deve permitir nova sincronização num tempo maior ou igual a 2 minutos do retorno da energia) e função anti-ilhamento (para evitar que o sistema continue fornecendo energia para a rede elétrica desenergizada, seja por algum incidente, ou para operações de manutenção). Após concluída esta vistoria,

o proprietário do gerador de energia poderá ter o acesso à rede de distribuição da concessionária.

A norma também informa sobre os dispositivos de proteção, dependendo da classe de tensão fornecida ao acessante, além dos requisitos gerais de acesso, de proteção, de qualidade (propostos no Módulo 8 do Prodist) e de medição.

2.7 PRODIST MÓDULO 3: ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Este módulo do Prodist, em sua 5ª revisão (2012), estabelece condições de acesso, conexão e uso, ao sistema de distribuição do sistema elétrico, definindo critérios técnicos e operacionais, aplicando-se aos acessantes existentes e aos novos (Prodist – Módulo 3, 2012). Este módulo está referenciado neste trabalho por ser um documento que traz a possibilidade de o usuário do sistema elétrico de distribuição, ter seu gerador próprio de energia conectado à rede elétrica. A NTC 905200 é referenciada neste módulo.

Os procedimentos descritos devem ser observados pela distribuidora de energia e também pelos seus usuários, sendo eles: unidades consumidoras de energia livres e especiais, centrais geradoras de energia, distribuidoras de energia, agentes importadores ou exportadores de energia e unidades consumidoras participantes do sistema de compensação de energia elétrica (Prodist – Módulo 3, 2012). Este módulo é composto por sete seções:

A seção 3.1 – PROCEDIMENTOS DE ACESSO – descreve as etapas necessárias para obter o acesso ao sistema de distribuição da concessionária local. São basicamente 4 etapas a serem observadas:

- Consulta de acesso: deve ser entregue pelo acessante à concessionária, informações técnicas pertinentes para o estudo ao acesso do sistema de distribuição, indicando o(s) ponto(s) de conexão.
- Informação de acesso: resposta da concessionária em relação à consulta de acesso, contendo informações e características sobre o uso deste acesso, responsabilidades e prazos (acessante e a distribuidora).

- Solicitação de acesso: é o requerimento formulado pelo acessante e entregue junto à concessionária, com o objetivo de acesso à rede de distribuição. Devem ser entregues juntamente a este requerimento o contrato de concessão ou ato autorizativo, no caso de acessante central geradora de energia, o projeto elétrico das instalações, memorial descritivo, localização, arranjo físico, diagramas e demais dados solicitados pela distribuidora de energia.
- Parecer de acesso: é o documento formal apresentado pela distribuidora de energia ao acessante, onde são informadas as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso, e os requisitos técnicos que permitam a conexão das instalações do acessante, com os respectivos prazos, as características do sistema e do ponto de conexão, tarifas aplicáveis e responsabilidades do acessante (Prodint – Módulo 3, 2012).

A Tabela 5 mostra estas etapas para a solicitação de acesso:

ETAPA	AÇÃO	RESPONSÁVEL	PRAZO
1 Solicitação de acesso	(a) Formalização da solicitação de acesso, com o encaminhamento de documentação, dados e informações pertinentes, bem como dos estudos realizados.	Acessante	-
	(b) Recebimento da solicitação de acesso.	Distribuidora	-
	(c) Solução de pendências relativas às informações solicitadas na Seção 3.7.	Acessante	Até 60 (sessenta) dias após a ação 1(b)
2 Parecer de acesso	(a) Emissão de parecer com a definição das condições de acesso.	Distribuidora	i. Se não houver necessidade de execução de obras de reforço ou de ampliação no sistema de distribuição, até 30 (trinta) dias após a ação 1(b) ou 1(c). ii. Para central geradora classificada como minigeração distribuída e houver necessidade de execução de obras de reforço ou de ampliação no sistema de distribuição, até 60 (sessenta) dias após a ação 1(b) ou 1(c).
3 Contratos	(a) Assinatura dos Contratos, quando couber.	Acessante e Distribuidora	Até 90 (noventa) dias após a ação 2(a)
4 Implantação da conexão	(a) Solicitação de vistoria	Acessante	Definido pelo acessante
	(b) Realização de vistoria.	Distribuidora	Até 30 (trinta) dias após a ação 4(a)
	(c) Entrega para acessante do Relatório de Vistoria.	Distribuidora	Até 15 (quinze) dias após a ação 4(b)
5 Aprovação do ponto de conexão	(a) Adequação das condicionantes do Relatório	Acessante	Definido pelo acessante

Tabela 5 – Etapas do processo de solicitação de acesso

Fonte: Prodint – Módulo 3, Revisão 5, 2012

A seção 3.2 – CRITÉRIOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS – define os critérios técnicos e operacionais que devem ser observados para o acesso ao sistema de distribuição, abrangendo reformas no sistema de distribuição, paralelismo de centrais geradoras, e compartilhamento das conexões com as barras de subestação. Esta seção classifica os acessantes pela demanda contratada e tensões fornecidas (dentro das especificações do Prodist Módulo 8 – Qualidade de energia elétrica), por meio de especificações do sistema do acessante, como por exemplo, as cargas que serão conectadas e os tipos de proteções utilizados (Prodist – Módulo 3, 2012).

A seção 3.3 – REQUISITOS DE PROJETO – define os requisitos a serem observados pelos acessantes para elaboração de projetos de instalações de conexão, devendo ser projetadas observando as características técnicas, normas, padrões e procedimentos, presentes no memorial descritivo do projeto. Apresenta também características em relação às redes e linhas de energia, subestações, sistemas de proteção e controle das centrais geradoras, dependendo da necessidade e da demanda contratada (Prodist – Módulo 3, 2012).

A seção 3.4 – IMPLANTAÇÃO DE NOVAS CONEXÕES – trata dos critérios para implementação, vistoria, acompanhamento, recepção e aprovação de novas instalações de conexão, assim como os procedimentos adotados pela distribuidora. Por parte do acessante, deve-se elaborar o projeto executivo, submetendo-o à aprovação, executar as obras (civis e elétricas) e realizar o comissionamento, sob supervisão da concessionária local. Por parte da concessionária, a aprovação do projeto, atender às solicitações de conexão, orçamentos e prazos, realizar as devidas vistorias em relacionadas às instalações elétricas e de proteção (Prodist – Módulo 3, 2012).

A seção 3.5 – REQUISITOS PARA OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E SEGURANÇA DA CONEXÃO – apresenta diretrizes para a operação, manutenção (inspeção programada/aleatória, corretiva, preventiva, preditiva e em linha viva) e segurança das conexões (aterramento, sinalizações, equipamentos de proteção), bem como, atribui responsabilidades do acessante e da distribuidora quanto à operação e a manutenção do ponto de conexão, incluindo questões de desconexão e conexão das instalações ao sistema de distribuição, despesas e indenizações. (Prodist – Módulo 3, 2012).

A seção 3.6 – CONTRATOS – apresenta a para elaboração do Contrato de Conexão às Instalações de Distribuição (CCD) e do Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD), estabelecendo condições dos serviços prestados, compreendendo condições técnicas e comerciais, encargos de conexão, os quais definem os contratos que devem ser celebrados entre as partes, apresentando modelos de contratos no documento (Prodinst – Módulo 3, 2012).

A seção 3.7 – ACESSO DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA – descreve os procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição. As etapas para viabilização do acesso, segue conforme a seção 3.1, visando também, os prazos que deverão ser seguidos para o avanço do processo. Nos requisitos de projetos, os procedimentos são descritos na seção 3.3, e para a definição de tensão de conexão, deve ser observada a potência instalada do(s) gerador(es), conforme a Tabela 6 (Prodinst – Módulo 3, 2012).

Potência Instalada	Nível de Tensão de Conexão
< 10 kW	Baixa Tensão (monofásico, bifásico ou trifásico)
10 a 100 kW	Baixa Tensão (trifásico)
101 a 500 kW	Baixa Tensão (trifásico) / Média Tensão
501 kW a 1 MW	Média Tensão

Tabela 6 – Níveis de tensão considerados para conexão de micro e minicentrals geradoras

Fonte: Prodinst – Módulo 3, Revisão 5, 2012

EQUIPAMENTO	Potência Instalada		
	Até 100 kW	101 kW a 500 kW	501 kW a 1 MW
Elemento de desconexão ⁽¹⁾	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção ⁽²⁾	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim ⁽³⁾	Sim ⁽³⁾	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim ⁽³⁾	Sim ⁽³⁾	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Não	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Relé de sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim
Estudo de curto-circuito	Não	Sim ⁽⁴⁾	Sim ⁽⁴⁾
Medição	Sistema de Medição Bidirecional ⁽⁵⁾	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes
Ensaio	Sim ⁽⁵⁾	Sim ⁽⁵⁾	Sim ⁽⁵⁾

Tabela 7 – Requisitos mínimos em função da potência instalada

Fonte: Prodinst – Módulo 3, Revisão 5, 2012

A Tabela 7 mostra os requisitos mínimos de equipamentos em função da potência instalada. Para equipamentos conectados à rede, como o inversor, alguns elementos de proteção listados, podem vir embutidos nesses inversores, sendo desnecessário essa redundância para microgeradores.

As notas referentes à Tabela 7 estão descritas de abaixo:

- (1) Deve existir uma chave seccionadora visível e acessível para garantir a desconexão da central geradora durante manutenção em seu sistema. Para inversores conectados à rede, próprio equipamento deverá ter uma chave seccionadora.
- (2) Elemento de interrupção automático acionado por comando e/ou proteção para minigeradores distribuídos.
- (3) Não é necessário relé de proteção específico, sendo que os inversores podem ter este sistema de detecção embutido.
- (4) Se for necessário a realização de estudo de curto-circuito, cabe à acessada a responsabilidade pela sua execução.
- (5) Equipamentos devem ter certificados (nacionais ou internacionais) mostrando os ensaios submetidos por este equipamento.
- (6) O sistema de medição bidirecional deve, no mínimo, diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia injetada na rede.

A implantação de novas instalações e os requisitos para operação, manutenção e segurança, estão dispostos nas seções 3.4 e 3.5 respectivamente no documento do Prodist – Módulo 3.

O sistema de medição deve atender as exigências impostas pela concessionária local para os consumidores, com o mesmo nível de tensão atendida e gerada, com a funcionalidade de medição bidirecional, a qual deve medir a energia elétrica ativa consumida e também a energia gerada pelo sistema de micro ou minigeração, sendo de responsabilidade da concessionária instalar este sistema de medição, assim como, sua operação e manutenção, incluindo os custos de eventual substituição. A concessionária também deverá, após as instalações, verificar, aprovar e iniciar o sistema de compensação de energia elétrica no ponto de conexão em questão (Prodist – Módulo 3, 2012).

Em relação aos contratos firmados entre o acessante e a concessionária, aplicam-se os procedimentos descritos na seção 3.6 do documento (no que for cabível em cada situação prevista nessa seção).

2.8 PRODIST MÓDULO 8: QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Este módulo do Prodist trata especificamente de procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, definindo terminologias e parâmetros dos fenômenos de energia existentes, a qualidade do produto (da energia elétrica em si) e a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras, no que diz respeito à metodologia dos indicadores de continuidade e dos tempos para atender as ocorrências que podem vir acontecer em relação a este assunto, e tratando, também, do planejamento do processo de implantação dos indicadores da QEE.

Os aspectos considerados da qualidade do produto, podendo ser tanto em regime permanente ou transitório são:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variação de frequência.

Alguns destes fenômenos são tratados ao longo deste trabalho com mais detalhes, com referências deste documento (Prodist – Módulo 8). Neste documento, cada elemento citado é detalhado sob vários aspectos, caracterizando-os e estabelecendo metodologias de medições destes fenômenos elétricos, caracterizando também, pela frequência com que estes distúrbios elétricos ocorrem.

Em relação a qualidade do serviço prestado, este módulo objetiva estabelecer procedimentos realizados pelas distribuidoras aos consumidores e às distribuidoras acessantes. Além disso, propõe também em:

- Estabelecer procedimentos relativos à qualidade do serviço prestado pelas transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT aos consumidores e distribuidoras.
- Definir indicadores e padrões de qualidade de serviço de forma a:
 - a) Fornecer mecanismos para acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras e das transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão - DIT;
 - b) Fornecer subsídios para os planos de reforma, melhoramento e expansão da infraestrutura das distribuidoras;
 - c) Oferecer aos consumidores parâmetros para avaliação do serviço prestado pela distribuidora.

Em relação à variação de frequência em instalações de distribuição e geração, devem operar em condições normais dentro dos limites de 59,9 Hz e 60,1 Hz. Em casos de distúrbios, devem garantir que fiquem na faixa de 59,5 Hz e 60,5 Hz e a permanência acima de 62 Hz não devendo ultrapassar o prazo máximo de trinta segundos, assim como, permanecer abaixo de 58,5 Hz e 63,5 Hz por no máximo dez segundos e abaixo dos 57,5 Hz, no máximo cinco segundos, não podendo exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas.

Por meio de indicadores de continuidade de serviço (quanto à duração e frequência de interrupção), as distribuidoras, os consumidores e a ANEEL podem avaliar a qualidade do serviço prestado e o desempenho do sistema elétrico.

Estes indicadores são divididos em Indicadores de continuidade individuais e Indicadores de continuidade de conjunto de unidades consumidoras. Os indicadores de continuidade individuais são (Prodist – Módulo 8 - pg. 42):

- DIC: duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;
- FIC: frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em número de interrupções;
- DMIC = duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;
- DICRI = duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

Enquanto que os indicadores de continuidade de conjunto de unidades consumidoras são:

- DEC: duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;
- FEC: frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções.

Estes indicadores (estatísticos) podem ser expressos no período de um mês, a cada trimestre ou também, anualmente (como no caso do indicador de desempenho global de continuidade). As expressões para os cálculos destes indicadores encontram-se neste documento do Prodist, além de explicitar as várias situações as quais devem ser aplicadas.

O módulo 8 também trata do planejamento do processo de implantação dos indicadores de qualidade do produto energia elétrica para os fenômenos harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de tensão de curta duração.

Nas Tabelas 8 e 9 são mostrados os níveis de tensão, em regime permanente, divididos em três classes: adequada, precária e crítica, classificando as variações de tensão medidas.

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

Tabela 8 – Variação de tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127)

Fonte: Prodist – Módulo 8, Revisão 6, 2015

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

Tabela 9 – Variação de tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

Fonte: Prodist – Módulo 8, Revisão 6, 2015

São estabelecidos os procedimentos, responsabilidades e prazos para desenvolvimento das campanhas de medições para cada um dos indicadores de qualidade definidos, como mostra na Figura 9, o fluxograma disposto no documento:

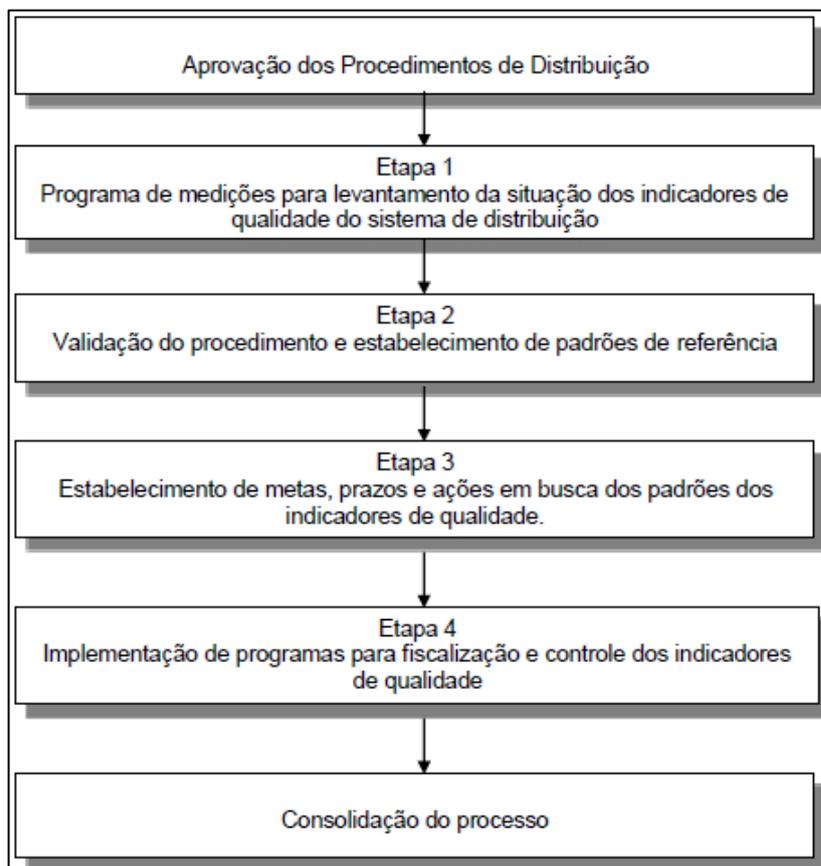


Figura 91 – Fluxograma mostrando as etapas da implantação da definição dos indicadores e padrões de qualidade

Fonte: Prodist – Módulo 8, Revisão 6, 2015

2.9 PROCEDIMENTO ADOTADO PELA COPEL PARA LIGAÇÃO DO SFVCR

Para o sistema estar efetivamente conectado na rede de distribuição da COPEL, é necessário que haja o processo de comissionamento (ato de submeter equipamentos, instalações e sistemas a testes e ensaios especificados, antes de sua entrada em operação) (NTC 905200, 2014), onde os técnicos da concessionária avaliam o sistema, as conexões realizadas, comparando com o projeto enviado anteriormente para obter o parecer de acesso.

No momento do comissionamento, a empresa teve que parar suas atividades para que fossem realizadas as tarefas e avaliações pertinentes. Os técnicos

inicialmente substituíram o equipamento de medição existente, como mostra a Figura 10, para um medidor eletrônico bidirecional juntamente com os TC's (transformadores de corrente) de medição (Figura 20 e 21 respectivamente) e realizaram as devidas conexões.



Figura 102 – Técnicos da COPEL instalando o sistema de medição
Fonte: A autoria própria

Após este procedimento, a energia foi estabelecida na empresa, e foi verificado o funcionamento do medidor e do sistema de comunicação sem fio, instalado pela COPEL para acompanhamento do consumo e produção de energia. Até aquele momento, foi informado que este sistema de comunicação estava ainda em fase de testes perante a concessionária.

Além da inspeção visual, foram realizadas inspeções mecânicas, verificando a firmeza das conexões e integridade dos equipamentos; e elétricas, em relação ao aterramento, continuidade elétrica dos condutores e medições das grandezas elétricas (tensão e corrente).

No quadro geral, foram instalados disjuntores de 50 A (chegando dos transformadores de 20 kVA) e 32 A (chegando do transformador de 10 kVA) para as proteções do lado CA do SFV (a descrição dos equipamentos é explicada com mais detalhes no Capítulo 3). O desligamento destes disjuntores foi realizado para simular uma falta de energia, e com isso, analisar o comportamento dos inversores em relação à uma falta de energia.

Os inversores devem se desconectar automaticamente, quando detectar uma falta de energia, para evitar o ilhamento do sistema, onde uma parte do sistema

elétrico, no qual existam cargas conectadas e sistemas de geração em funcionamento, é isolada do restante do sistema, mesmo após a detecção de um defeito na rede de distribuição, e a operação deste sistema não é interrompida, continuando a operar (ALMEIDA, 2011). Os inversores foram parametrizados para que após a interrupção por falta de energia ou defeito na rede elétrica, e com isso, a atuação do sistema de proteção, desconectasse do circuito principal, e realiza uma religação após 3 minutos. O módulo 3 do Prodist indica que o religamento dos inversores deve ser de no mínimo 2 minutos após a identificação da falta.

Durante a inspeção, o responsável pelo projeto acompanhou todo o processo, respondendo questionamentos pertinentes do funcionamento e das conexões realizadas no SFVCR. Finalizada a inspeção, o sistema pôde ter sua conexão na rede efetuada com sucesso. A NTC 905200 exige que seja colocado uma plaqueta, conforme a Figura 11, colocada de modo visível o mais próximo do local de instalação do medidor de energia (podendo também ser colocado no quadro geral), para que o pessoal técnico de manutenção e também os da concessionária saibam que neste local existe uma fonte geradora de energia distribuída.



Figura 11 – Aviso da COPEL para indicar geração distribuída no local
Fonte: NTC 905200, 2014

3 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO DO SFVCR

A ideia inicial deste sistema era que a geração de energia fosse exclusivamente utilizada para alimentar o barracão e o excedente ser injetado na rede do sistema de distribuição e, posteriormente, compensado pela concessionária de energia. Porém, após análises, foi proposto que houvesse a união deste barracão com a empresa em questão para que pudessem usufruir desta geração de energia. Portanto, houve um planejamento para que o SFV atendesse as cargas da empresa em um sistema conectado a rede elétrica da COPEL.

Desde a concepção da construção do barracão até a instalação do SFV, o projeto uniu a arquitetura e a melhor localização para que o SFV tivesse um rendimento ótimo, dadas as limitações geográficas e estruturais do local. Para tanto, foi determinado que o barracão suportasse o peso da estrutura e dos módulos FV e também dotado de um telhado com duas águas orientadas o mais próximo possível ao norte geográfico para que atendesse aos requisitos de projeto do SFV. Este tipo de construção foi pensado principalmente para que não houvesse gastos com estruturas para os módulos, assim tornando a construção menos onerosa por parte desta escolha, sendo que a parte estrutural (para acomodação dos módulos) é composta de perfilados e grampos para manter os módulos firmes.

O estudo de caso é realizado em uma empresa em Curitiba, Paraná, onde atua no segmento de montagens de painéis elétricos. O horário de atuação da empresa fica entre as sete horas da manhã até as dezoito horas, podendo ter horários diferentes conforme o nível de produção demandada. A empresa possui diversos equipamentos, alguns mostrados na Figura 12, entre eles estão: CNCs (*Computer Numeric Control*), máquinas de solda, compressores, talhas, guilhotinas, prensas, dobradeiras, e além disso, possui equipamentos de iluminação, computadores, ar condicionados e impressoras. O regime de operação dos equipamentos depende basicamente da produção da empresa.

A outra parte do SFV localizada na fachada da empresa foi estruturada para que os módulos pudessem estar orientados para o norte, de tal modo que atendesse o projeto especificado e também que não fugisse da estética de uma fachada. Na

Figura 13 é possível ver como é possível aliar o SFV à arquitetura sem prejudicar o desempenho de ambos.



Figura 12 – Exemplos de equipamentos existentes na empresa
Fonte: Autoria própria



Figura 13 – Barracão e a fachada da empresa com módulos FV instalados
Fonte: ELCOSUL (2016)

Com relação às características elétricas, a modalidade de conexão à rede de alimentação da empresa é trifásica em baixa tensão. O SFV é composto por 168 módulos fotovoltaicos de 300 Wp, dispostos em três sistemas totalizando um potência aproximada de 50 kW (dois sistemas de 20 kW e um de 10 kW aproximadamente), interligados por três inversores com capacidade para atender estes sistemas. Os inversores utilizados estão conectados aos transformadores isoladores (com conexão Estrela-Estrela) de potência igualmente requisitados pelo sistema, ou seja, dois transformadores de 20 kW e outro de 10 kW, para além do fator isolador do sistema, eles têm a função de adequar a tensão de entrada do sistema com nível de tensão de alimentação de 220/380 V, pois a saída do inversor utilizado é de 380 V.

3.1 CONEXÃO DE UM SFVCR

O sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFVCR) é um sistema que opera em paralelo com a rede elétrica, ou seja, ela deve ser implementada em locais que são alimentados pela rede, com o objetivo de gerar energia para o consumo próprio ou também, para gerar excedente para a rede (GAZOLI, VILLALVA, 2012).

Portanto, este tipo de sistema não utiliza acumuladores de energia (os quais possuem vida útil baixa em relação aos módulos FV e inversores) nem controladores de carga, tornando esta opção vantajosa financeiramente em relação à um sistema dito isolado, o qual não possui paralelismo com a rede de distribuição.

Outras vantagens neste tipo de sistema, citados por Câmara (2011), são:

- a energia é produzida próximo da carga, podendo ser dimensionada para atender parte ou toda a demanda do local, minimizando perdas e investimentos pela transmissão e distribuição de energia;
- a facilidade na montagem e ampliação dos módulos, em telhados e outras áreas propícias para a instalação, além de servir, como no caso, de fachada em edifícios;
- quando o consumo de energia for maior que o produzido pelo SFV, a rede irá fornecer a energia necessária para atender a carga e quando a produção for maior que a demanda, esse excedente de energia é injetado na rede;

- cita também que os SFV têm a capacidade de oferecer suporte quilo-volt-ampère-reactivo (kvar) a pontos críticos da rede de distribuição, havendo melhoria da qualidade de energia e;
- utilizando a energia do sol, é praticamente uma fonte limpa, silenciosa e inesgotável de energia elétrica (sem considerar a produção e descarte dos equipamentos).

Porém, como já fora previsto na Resolução Normativa Nº 482 da ANEEL, este sistema não poderá operar em caso de falta de energia da rede de distribuição, ou seja, este sistema não pode operar sob “ilhamento”. Havendo interrupção do fornecimento de energia da concessionária, todo o sistema deverá ser desligado. Um dos principais motivos para que houvesse essa restrição foi na questão da segurança dos operadores no momento em que houver uma falha, eles possam realizar as devidas manutenções sem que haja fluxo de energia nas linhas, provida de geradores distribuídos, pois os mesmos estão conectados na rede elétrica.

Os SFVCR são principalmente constituídos por: módulo fotovoltaico, inversor CC/CA, equipamentos de medição e dispositivos de proteção como disjuntores e fusíveis.

A Figura 14 mostra um esquemático do sistema (dispositivos de proteção não estão representados):

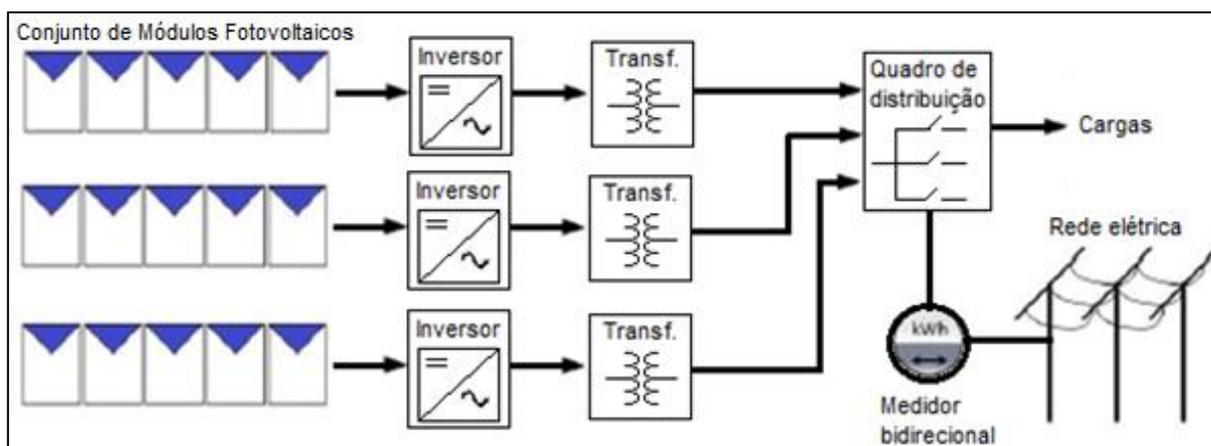


Figura 14 – Esquemático do SFVCR utilizado na empresa
Fonte: Autoria própria

A seguir, são mostradas as características de cada componente utilizado no SFV e uma breve explicação do funcionamento destes equipamentos.

3.1.1 Módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são compostos por várias células fotovoltaicas, capazes de fornecer uma tensão de aproximadamente 0,6 V, as quais captam energia solar e a transforma em energia elétrica através do fenômeno fotovoltaico, explicado anteriormente. Estes módulos produzem tensão e corrente contínua, que individualmente não é possível alimentar certos tipos de cargas e nem os inversores utilizados, por isso, associações são realizadas em série/paralelo para aumentar os níveis de tensão e corrente.

Na implantação de um SFV, deve-se utilizar módulos de mesmas características, com níveis de potência e tecnologias iguais para que não ocorra o efeito de descasamento, pelo qual os módulos de menor capacidade limitam o desempenho do conjunto, reduzindo a eficiência do sistema como um todo (MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, 2014).

As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

- Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc})
- Potência Máxima ($P_{máx}$)
- Tensão de Potência Máxima (V_{mp})
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp})

Esses módulos apresentam curvas característica de tensão por corrente e de tensão por potência. Os testes são realizados para uma irradiância de 1000 W/m², definida por ser a irradiância recebida na superfície da Terra em um dia claro, ao meio dia com uma temperatura de 25 °C na célula e espectro solar de 1,5 AM (*air mass*) (GAZOLI, VILLALVA, 2012). Baseados nestes valores que os fabricantes fornecem nos catálogos a potência máxima dos módulos.

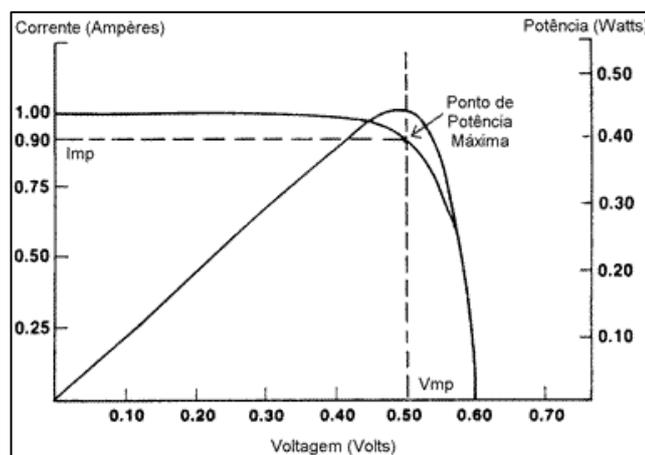


Figura 15 – Curvas características das células FV
Fonte: CRESESB-CEPEL, 2008

Esta curva, mostrada na Figura 15, trabalha com valores de tensão e corrente dos módulos, ou seja, as variáveis tensão e corrente estão relacionadas. A tensão nos módulos pode aumentar, ao ponto que a corrente diminua conforme a curva.

Existe um ponto, chamado de ponto de máxima potência (PMP), onde os valores de tensão e corrente ótimos produzem a maior potência que o módulo pode gerar. Alguns dos fatores que influenciam no desempenho dos módulos e modificam estas curvas podem ser a intensidade luminosa (onde também, deve-se evitar o fenômeno de sombreamento), a temperatura das células e também da carga conectada, mostrados na Figura 16.

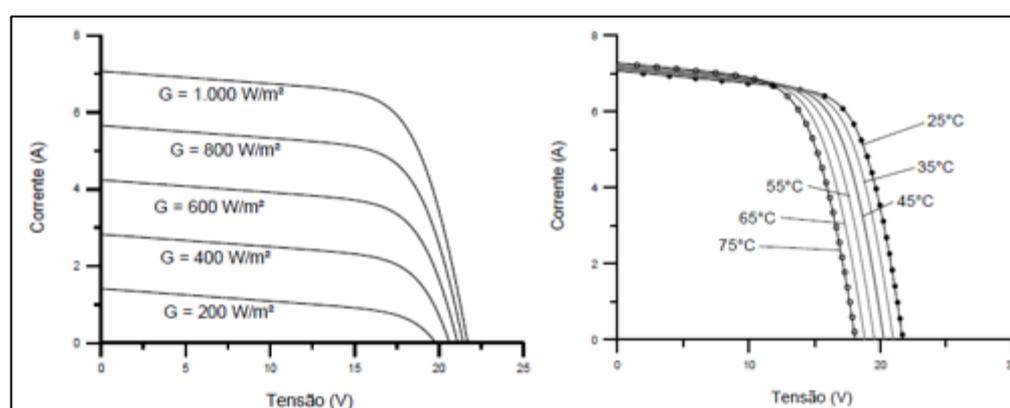


Figura 16 – Curvas características dos módulos FV da radiação solar e temperatura
Fonte: MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, 2014

Os módulos utilizados no SFV (Figura 17) na empresa foram dispostos em um conjunto de 168 módulos. As características do módulo FV utilizado no projeto estão dispostas no anexo A.



Figura 17 – Módulos fotovoltaicos instalados no barracão
Fonte: Autoria própria

3.1.2 Inversor

O inversor é um dos equipamentos mais importantes de um sistema fotovoltaico e tem a função primordial de converter a corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em uma corrente alternada senoidal com amplitude e frequência compatíveis com o sistema elétrico.

O princípio básico de funcionamento consiste em um sistema eletrônico de controle, dotado de sensores de tensão e corrente. A corrente contínua dos módulos passa por um circuito de chaveamento onde a técnica de PWM (*Pulse Width Modulation*) é utilizada para gerar a forma senoidal (muito próximo de uma senóide pura) na saída do inversor. O inversor é visto pelo sistema como uma fonte de corrente. Os inversores mais modernos são dotados de algoritmos avançados para detecção de falta (anti-ilhamento), ajustes automáticos para o ponto de máxima potência (PMP), detecção de tensão nos terminais de entrada, proteção contra sobre tensão e corrente, eficiente sincronismo com a rede elétrica, comunicação serial e até mesmo sem fio, comunicando com uma central e também com outros inversores.

Conforme Almeida (2007), é um dispositivo eletrônico composto por interruptores semicondutores de potência (seis chaves semicondutoras IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)) que permitem o controle dos disparos para condução e corte dos IGBTs através de sinais eletrônicos aplicados em seus terminais

de gatilho, gerando a forma de onda senoidal trifásica e defasada de 120° entre elas. Na Figura 18 é mostrado um esquema simplificado de uma topologia básica de um inversor CC/CA trifásico:

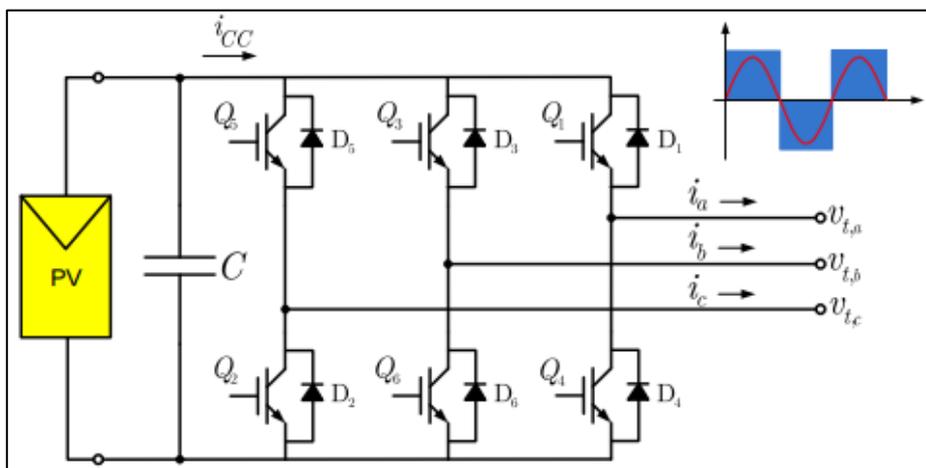


Figura 18 – Topologia básica de um inversor CC/CA conectado a um módulo FV
Fonte: ALMEIDA, 2007

Baseando-se nas análises de Eslin e Heskes (2003), alguns inversores usam como referência e sincronização os parâmetros da própria rede elétrica. Entretanto, se a rede é poluída, a referência também vai estar poluída e o controle de corrente deve ser eficiente para obter um fator de potência elevado (próximo do unitário).

Se é desejável uma forma de onda na saída senoidal, sem poluição harmônica, deve-se usar uma boa fonte para referência. Na prática, a impedância de saída do inversor como função da frequência tem que ser maior que a 40ª ordem harmônica, para evitar a poluição harmônica da corrente em função da interação com a tensão poluída. Esta interação é feita pelos seguintes parâmetros:

- A referência da forma de onda da corrente é uma cópia da tensão da rede;
- A impedância da rede, como função da frequência, é baixa;
- Alta capacitância de saída.

Para melhorar estas características, os itens a seguir devem ser realizados:

- Fonte de referência para a forma de onda senoidal deve ser gerada por um sistema processado;
- A impedância de saída, como função da frequência, deve ser alta;
- Uma baixa capacitância na saída pode ser usada como filtro.

A conclusão dos experimentos realizados por Eslin e Heskes (2003) mostra que o fenômeno de ressonância entre a rede elétrica e o inversor fotovoltaico pode ser responsável pela alta distorção harmônica. A topologia e especialmente o controle de corrente do inversor têm uma grande influência na inicialização e no tamanho dessa ressonância. Portanto, a poluição harmônica dos inversores depende da poluição da rede elétrica. A capacitância total do inversor, junto com outros equipamentos conectados no mesmo circuito, a capacitância equivalente e a reatância indutiva da rede elétrica, forma um circuito ressonante, podendo causar grandes distorções.

Os inversores utilizados no SFV da empresa são de dois tipos: um de 10 kW e dois de 20 kW (na Figura 19, os dois inversores de 20 kW). As características dos inversores estão dispostas nos anexos B e C. É possível o ajuste de fator de potência (conforme *datasheet* nos anexos B e C) destes inversores, porém este ajuste não foi configurado no período de medições.



Figura 19 – Inversores de 20 kW para conexão dos módulos FV ao SFVCR
Fonte: Autoria própria

3.1.3 Medidor bidirecional

O medidor bidirecional é um dispositivo eletrônico de energia elétrica o qual foi instalado na empresa, sendo capaz de medir energia (ativa e/ou reativa) em ambos os sentidos de fluxo de corrente, possuindo também, registradores para cada sentido de fluxo. O medidor poderá medir a qualidade de energia e deverá atender, no mínimo,

os seguintes requisitos (NTC 905200 - ACESSO DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DA COPEL, 2014):

- Método de medição conforme a IEC81000-4-30, classe B;
- Monitoramento de conformidade da norma EN50160;
- Análise de harmônicos e inter-harmônicos conforme IEC 61000-4-7.

No caso da empresa, a medição é feita de modo indireto, sendo assim, foi previsto a instalação de uma caixa tipo DN para a instalação dos transformadores de corrente. Estes TC's foram dimensionados e instalados com base no projeto levado à COPEL para que a capacidade deles esteja em conformidade com a corrente do sistema da empresa. Juntamente com este medidor, para fins de telemedição, foi instalado uma interface de comunicação. Estes equipamentos (medidor bidirecional, TC's e a interface de comunicação) foram instalados pela COPEL no momento do comissionamento realizado para a conexão efetiva do SFV na rede de distribuição. O medidor analógico existente foi substituído pelo medidor bidirecional juntamente com os TCs de medição, conforme as Figuras 20 e 21, respectivamente.

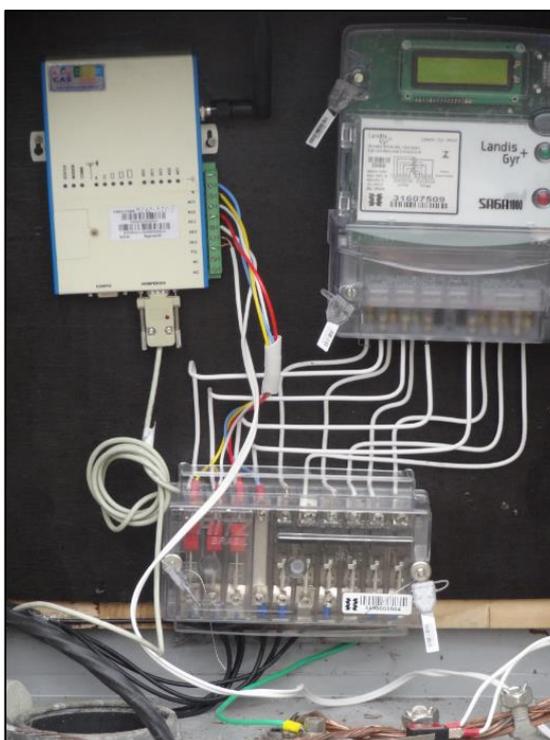


Figura 20 – Medidor eletrônico bidirecional com sistema de comunicação sem fio
Fonte: Aatoria própria

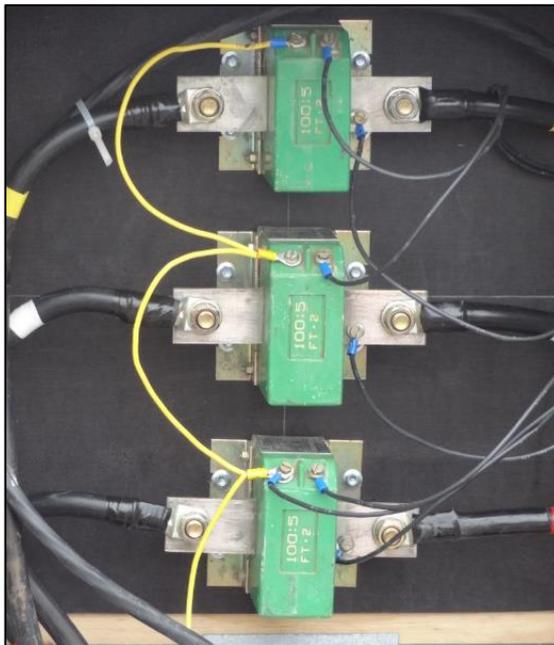


Figura 21 – Transformadores de corrente para medição
Fonte: Autoria própria

3.1.4 Transformador para adequação de tensão da rede local

O transformador em questão não é um item obrigatório para o funcionamento do SFV. Porém, a utilização deste tipo de transformador se deve à tensão de saída dos inversores utilizados (220 V fase-neutro e 380 V fase-fase). Em Curitiba, como é o caso, a concessionária local (COPEL) atende a cidade com tensões de 127 V fase-neutro e 220 V fase-fase. Por esta razão o uso deste transformador foi necessário para que a tensão estivesse adequada para o sistema. Foram utilizados dois transformadores de 20 kVA e um de 10 kVA neste sistema.

Para o correto funcionamento dos inversores, é necessário que os transformadores tenham seus enrolamentos trifásicos conectados em estrela-estrela com neutro acessível e relação de tensão de 380 V para 220 V fase-fase, pois assim, o inversor consegue determinar a tensão de trabalho e funcionar corretamente. A Figura 22, mostra os três transformadores que foram utilizados no projeto (à esquerda os de 20 kVA e à direita o de 10 kVA).



Figura 22 – Transformadores isoladores trifásicos
Fonte: Autoria própria

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS ANTES DO SFV

Um dos objetivos para comparar a qualidade de energia antes e após a instalação do SFV consiste na medição das grandezas elétricas: tensão (em regime permanente e variações), distorções harmônicas de tensão e corrente, fator de potência e frequência no ponto de acoplamento comum (PAC), como mostra a Figura 23 (as ponteiras de medição de tensão foram colocadas nos bornes de saída do disjuntor geral e os sensores de corrente nos cabos que entram no disjuntor geral, por ser a melhor opção disponível para as medições), onde, após a instalação do sistema fotovoltaico, dependendo da demanda energética da empresa, ocorrerá fluxo de energia nos dois sentidos (da rede para a empresa – consumo; e da empresa para a rede – geração).

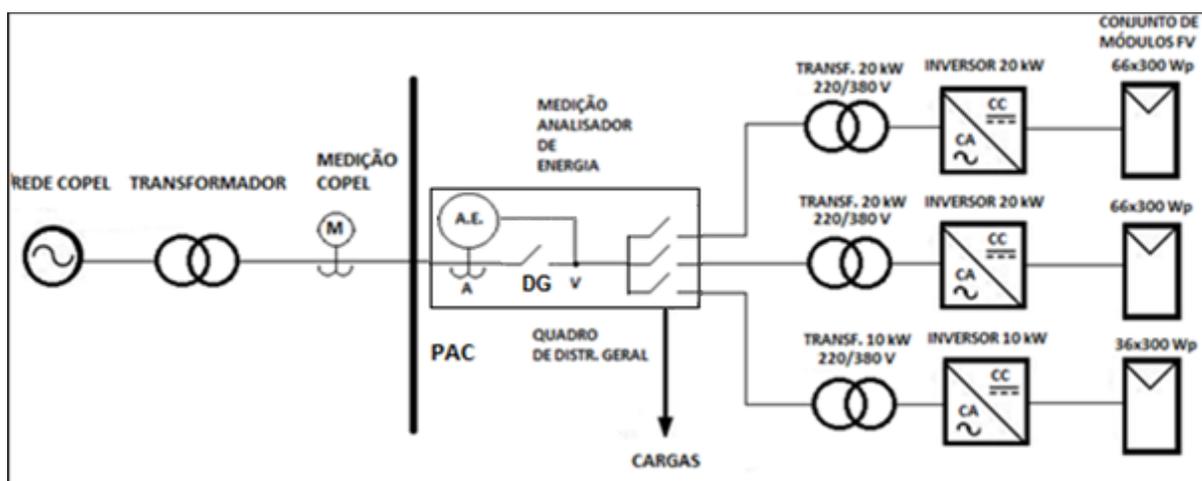


Figura 23 – Diagrama unifilar simplificado do sistema e o ponto de medição
Fonte: Autoria própria

O equipamento utilizado foi um analisador de energia da EMBRASUL, modelo RE 7000, seguindo a ligação, mostrada na Figura 24, foram conectadas suas ponteiras nos terminais do disjuntor geral, com a sequência correta das fases (A, B e C) e as ponteiras do neutro (N) e do terra (T) foram presas em seus respectivos barramentos, assim como os sensores de corrente (os quais possuem o sentido correto da direção da corrente), como mostra a Figura 25.

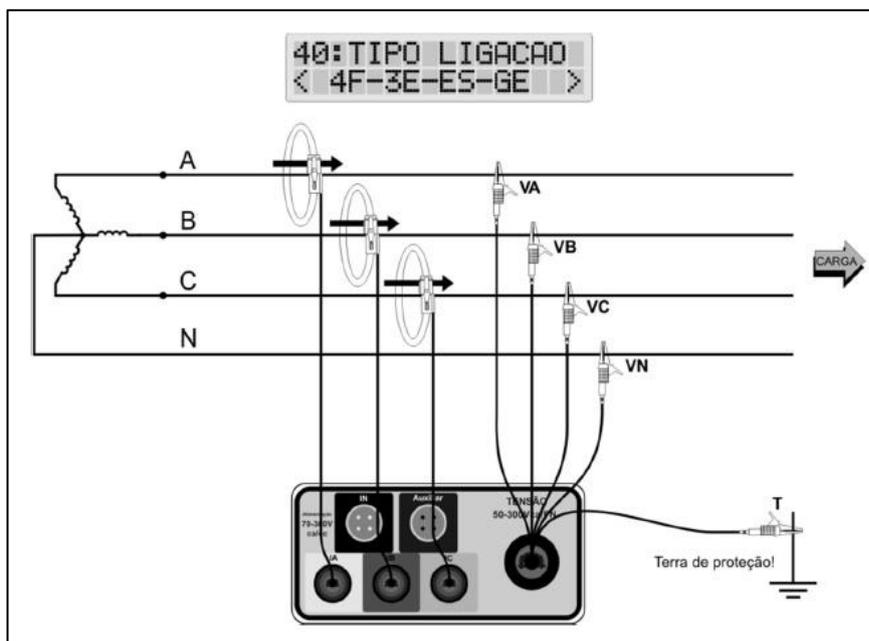


Figura 24 – Ilustração da ligação do analisador de energia
Fonte: Manual EMBRASUL



Figura 25 – Instalação do analisador de energia no disjuntor de entrada no quadro de distribuição geral
Fonte: Autoria própria

O analisador foi configurado adequadamente para o tipo de conexão do sistema (trifásico com neutro acessível e terra, conforme mostrado na Figura 24), ajustado o horário, níveis de corrente para os sensores e o período de integração foi ajustado para 200 ms, ou seja, o equipamento registrou a cada 200 ms cada uma das grandezas elétricas e armazenando-as em sua memória. Por ser um período curto de

integração, foram armazenadas uma grande quantidade de informações, contudo, o nível de integração foi escolhido para registrar possíveis variações de curta duração durante as medições, por esta razão não foi utilizado o padrão de medição recomendado no documento do Prodist – Módulo 8. É evidente que o procedimento adotado pelo Prodist serve para comparações mais específicas para outros estudos, porém para este estudo foi escolhida esta abordagem. Após feita as aquisições, os dados foram descarregados para o computador e visualizados pelo *software* da EMBRASUL, ANL7000.

Neste capítulo é mostrada a primeira etapa de medições, a qual foi realizada nos dias 9 a 16 de maio de 2015, onde o projeto do SFV não havia ainda entrado em funcionamento, estando a empresa com níveis normais de demanda energética em relação à média de produção. A seguir, serão mostradas estas medições e então comentada a situação de cada grandeza elétrica de interesse.

4.1 TENSÃO

As curvas que representam as tensões dos dias 9 a 16 de maio de 2015 foram plotadas nas Figuras 26 a 28. Os valores máximo, médio e mínimo de tensão foram coletados neste período e na Tabela 10 (em Volts) são mostradas as tensões por fase e neutro.

A partir dos valores registrados foi possível observar que teve momentos em que os valores de tensão se encontram abaixo da faixa adequada de tensão em relação às normas do Prodist - Módulo 8 para instalações de baixa tensão ($117 \text{ V} \leq \text{Tensão nominal (127 V)} \leq 133 \text{ V}$). Também foi constatado que não houve interrupções e tampouco variações de curta duração durante as medições.

Valor	Ua	Ub	Uc	Un
Máximo	129,15 V	129 V	130,1 V	0,52 V
Médio	126,57 V	126,81 V	127,17 V	0,29 V
Mínimo	116,09 V	117,6 V	116,84 V	0,22 V

Tabela 10 – Tensões máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C e neutro
Fonte: Autoria Própria

4.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA

As curvas que representam as distorções harmônicas total (DHT) de tensão estão dispostas nas Figuras 29 a 31 que foram registradas nos dias 9 a 16 de maio de 2015, onde mostram a DHT de tensão por fase, em que se observa que possuem pequenas diferenças em valor absoluto, sendo que, o valor máximo registrado foi na fase B de 4,92%.

Os valores máximo, médio e mínimo de DHT de tensão foram registrados neste período e mostrados na Tabela 11 (em porcentagem) por fase. Pode-se notar também que mesmo quando a empresa não está no seu horário de funcionamento, a DHT de tensão também varia, pois, alguns equipamentos ficam ligados, como lâmpadas e computadores.

Valor	DHTua	DHTub	DHTuc
Máximo	4,41%	4,92%	4,64%
Médio	2,57%	2,61%	2,49%
Mínimo	0,99%	0,96%	0,91%

Tabela 11 – DHT de tensão máxima, média e mínima nas fases A, B, C
Fonte: Autoria Própria

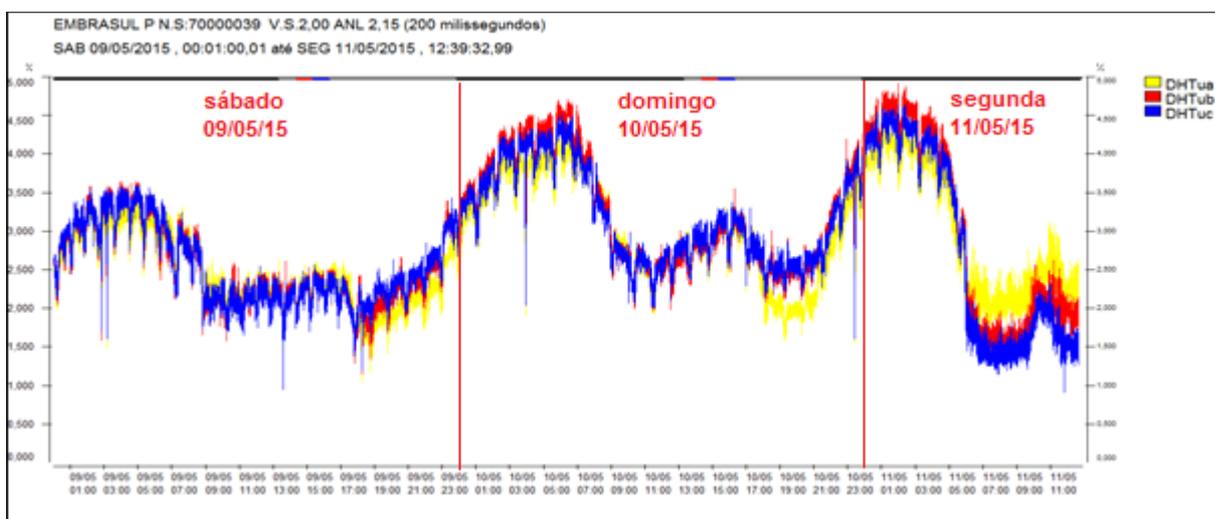


Figura 29 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (09/05/15 – 11/05/15)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

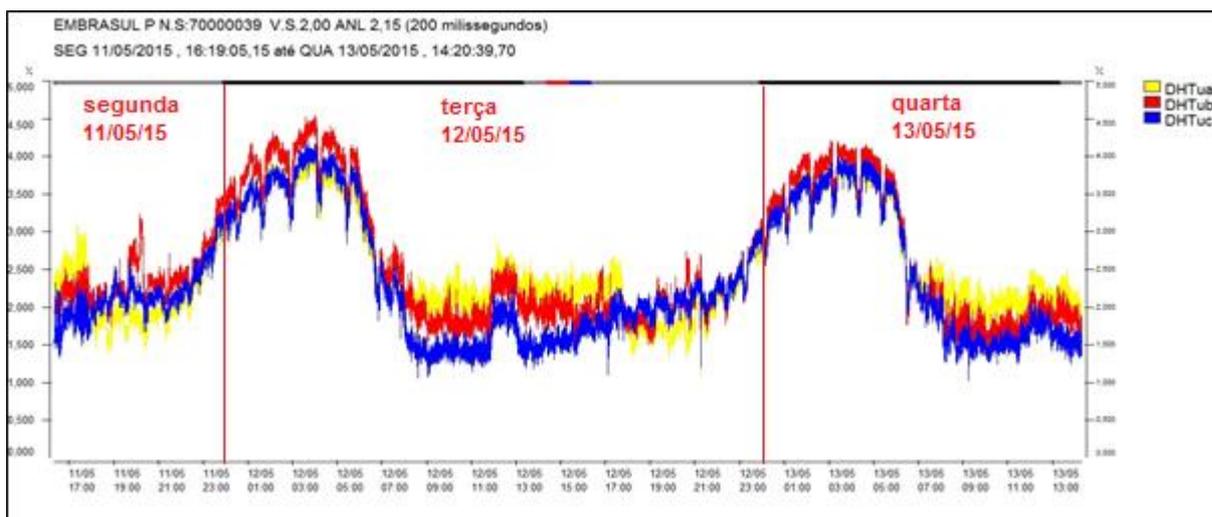


Figura 30 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (11/05/15 – 13/05/15)

Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

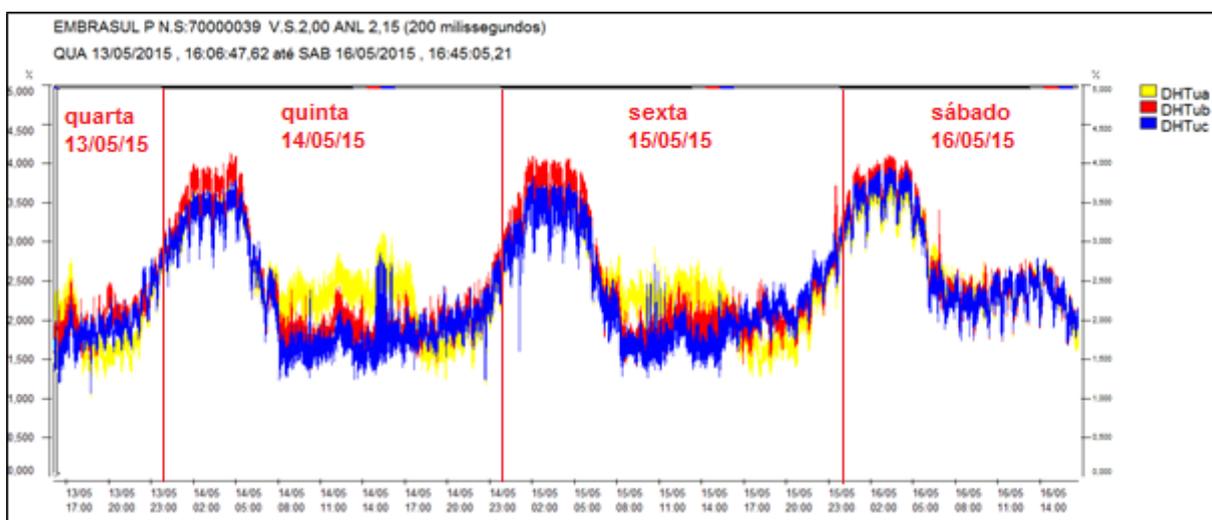


Figura 31 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (13/05/15 – 16/05/15)

Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

As curvas que representam as distorções harmônicas total (DHT) de corrente estão dispostas nas Figuras 32 a 34 que foram registradas nos dias 9 a 16 de maio de 2015, onde mostram os valores de DHT de corrente por fase. Os valores máximo, médio e mínimo de DHT de corrente por fase foram registrados neste período e mostrados na Tabela 12.

Valor	DHTia	DHTib	DHTic
Máximo	32,14%	17,54%	18,73%
Médio	5,08%	4,74%	5,51%
Mínimo	1,32%	1,33%	1,46%

Tabela 12 – DHT de corrente máxima, média e mínima nas fases A, B, C
Fonte: Autoria Própria

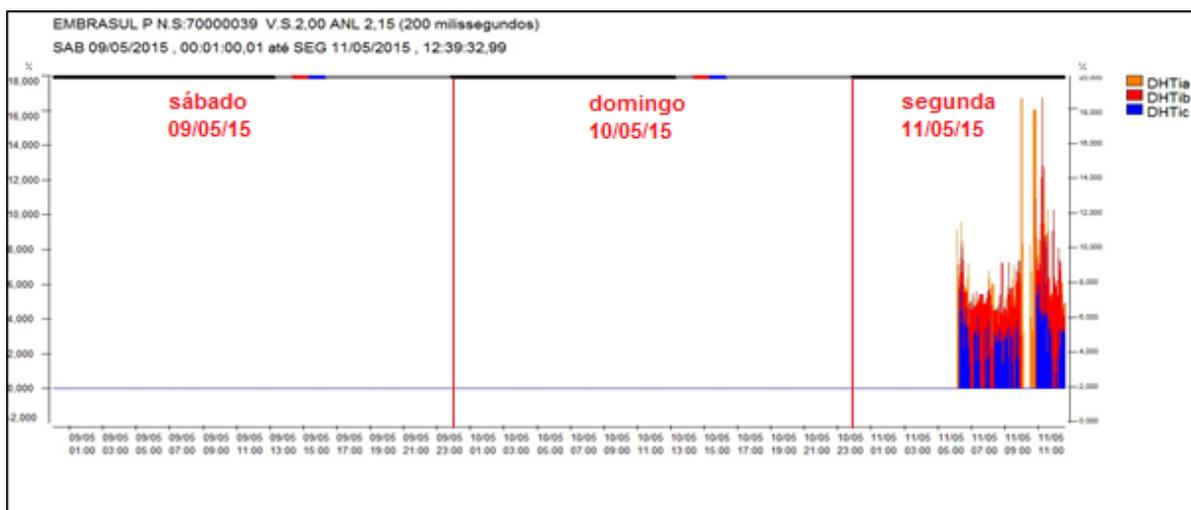


Figura 32 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (09/05/15 – 11/05/15)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

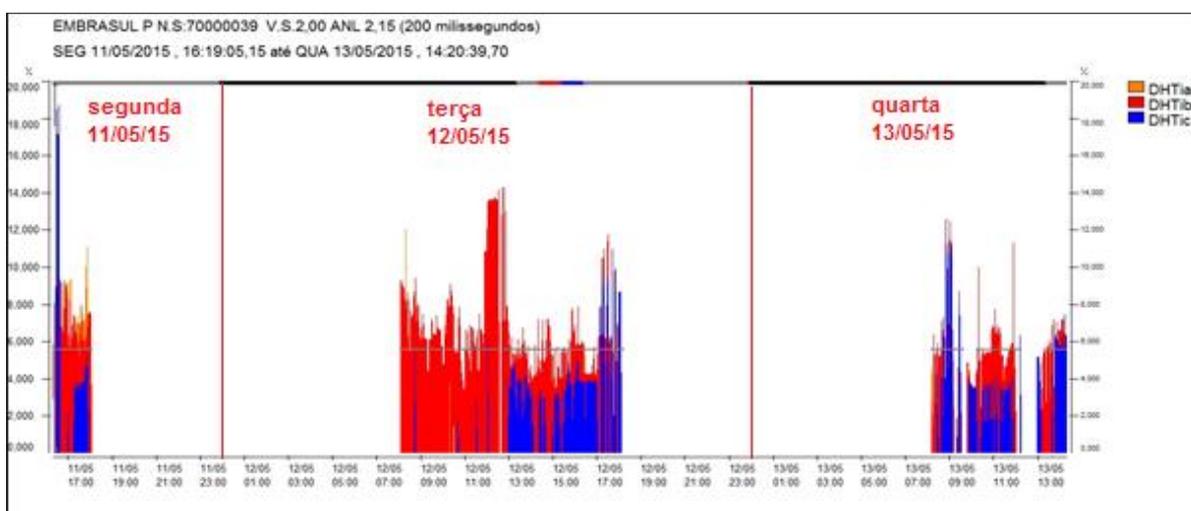


Figura 33 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (11/05/15 – 13/05/15)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

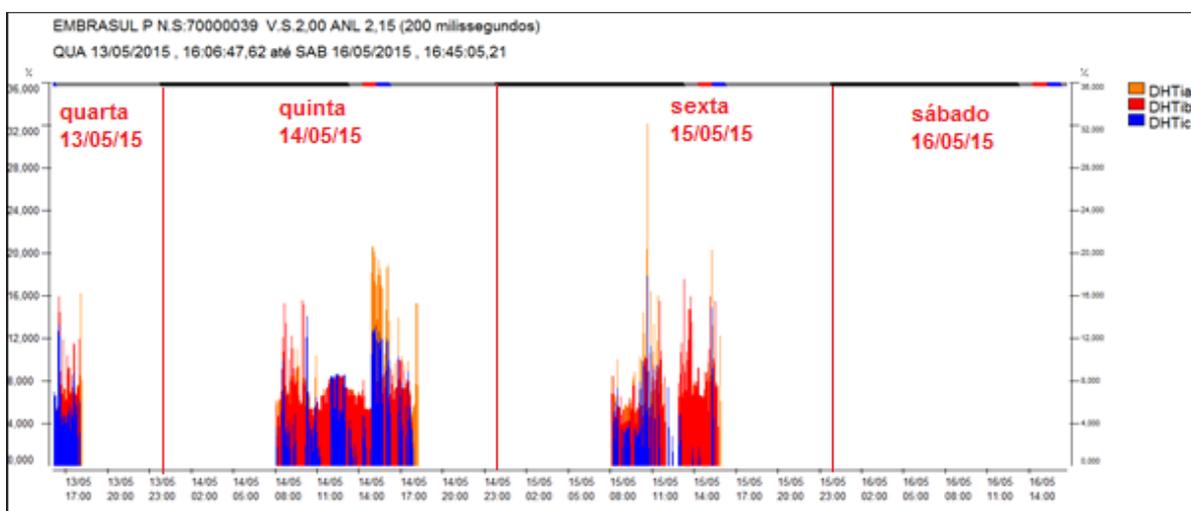


Figura 34 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (13/05/15 – 16/05/15)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

4.3 FATOR DE POTÊNCIA

As curvas que representam os fatores de potência (FP) estão dispostas nas Figuras 35 a 37 que foram registrados nos dias 9 a 16 de maio de 2015, onde mostram o fator de potência por fase. Pode-se observar pela Tabela 13 que os valores mínimos registrados estão muito abaixo do recomendado pela norma do Prodist – Módulo 8, os quais foram registrados em determinados períodos de tempo.

Na Tabela 13 são mostrados os valores máximo, médio e mínimo dos FP em cada fase que foram registrados. Pode-se notar também que o *software* representa os FP capacitivos como números negativos. Deve ser levado em consideração que a empresa está classificada em relação à entrada de energia como sendo de baixa tensão (menor que 1 kV) e perante o Prodist – Módulo 8, indica que o fator de potência deve ser no mínimo 0,92 tanto indutivo quanto capacitivo.

Valor	FPa (ind)	FPb (ind)	FPc (ind)	FPa (cap)	FPb (cap)	FPc (cap)	FP3f (ind)	FP3f (cap)
Máximo	1	1	1	-0,999	-0,999	-0,999	1	-0,999
Médio	0,934	0,928	0,903	-0,978	-0,944	-0,979	0,827	-0,787
Mínimo	0,25	0,406	0,527	-0,914	-0,002	-0,854	0,1	-0,1

Tabela 13 – Fatores de potência máximo, médio e mínimo nas fases A, B, C e total
Fonte: Autoria Própria

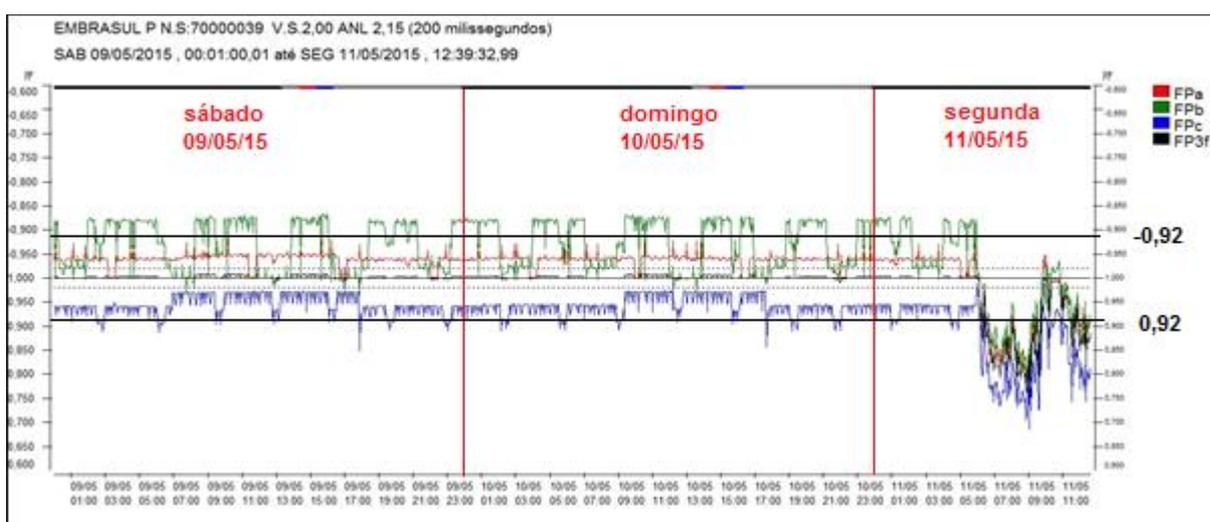


Figura 35 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (09/05/15 – 11/05/15)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

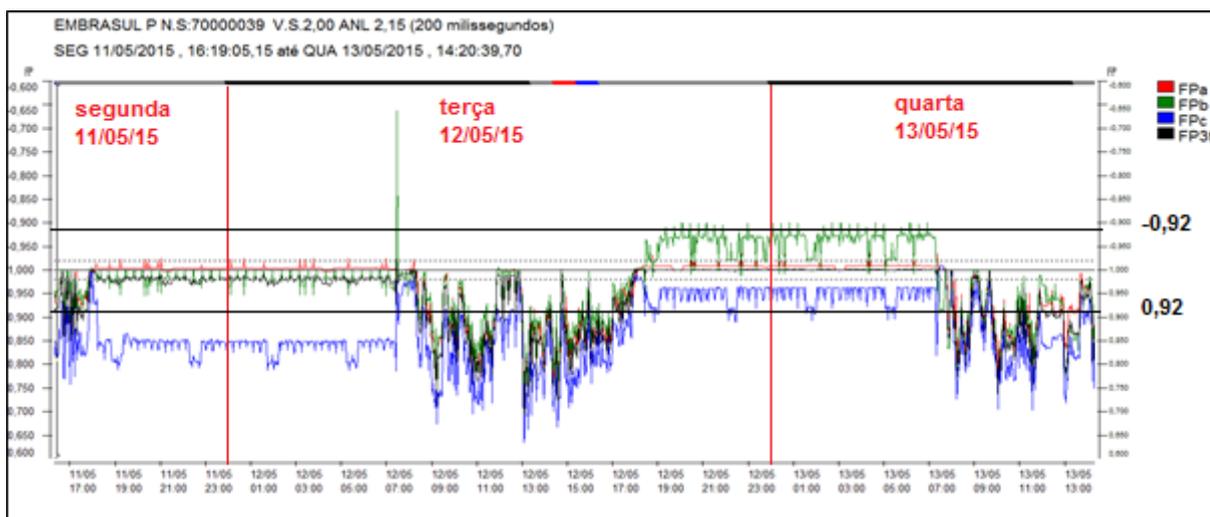


Figura 36 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (11/05/15 – 13/05/15)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

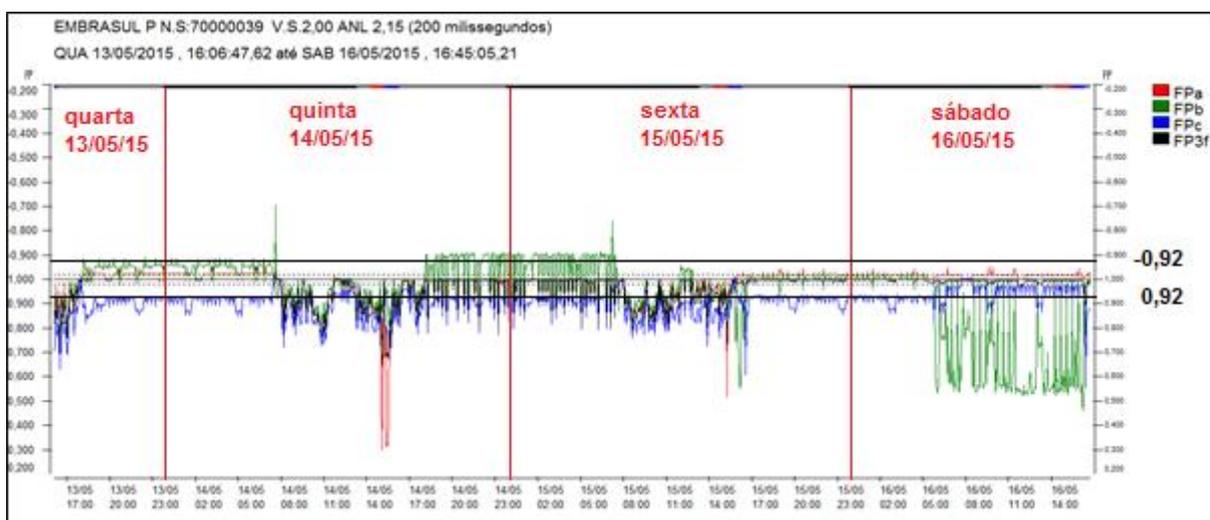


Figura 37 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (13/05/15 – 16/05/15)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

A potência é mostrada aqui pelo fato estar envolvida na análise da qualidade energia. A Tabela 14 mostra os valores máximo, médio e mínimo das potências trifásicas: ativa (P_{3f}), reativa (Q_{3f}) e aparente (S_{3f}). O software do analisador de energia não fornece a potência de distorção ($dkVA$) para uma análise completa. As Figuras 38 a 40 mostram os gráficos de potência da empresa no período de 9 a 16 de maio de 2015.

A potência reativa pode ser tanto indutiva quanto capacitiva. Por isso, na Tabela 13 é mostrada a potência mínima registrada com o sinal negativo, mostrando que é uma potência reativa capacitiva.

Valor	P3f	Q3f	S3f
Máximo	61,767 kW	57,803 kvar	79,669 kVA
Média	7,384 kW	2,893 kvar	9,856 kVA
Mínimo	1,326 kW	-0,265 kvar	1,330 kVA

Tabela 14 – Potências trifásicas

Fonte: Autoria Própria

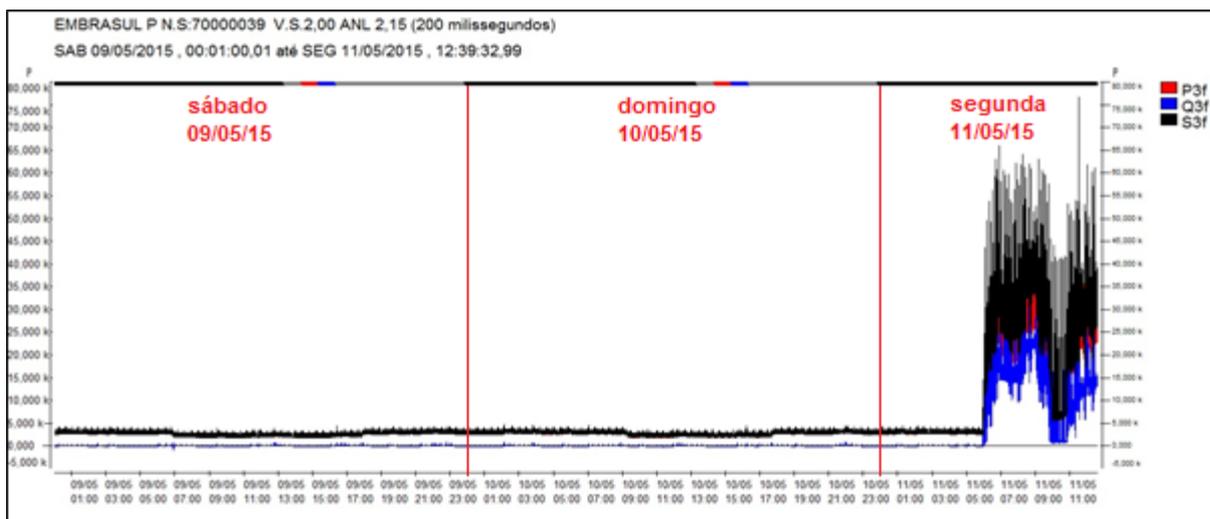


Figura 38 – Gráfico das potências trifásicas (09/05/15 – 11/05/15)

Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

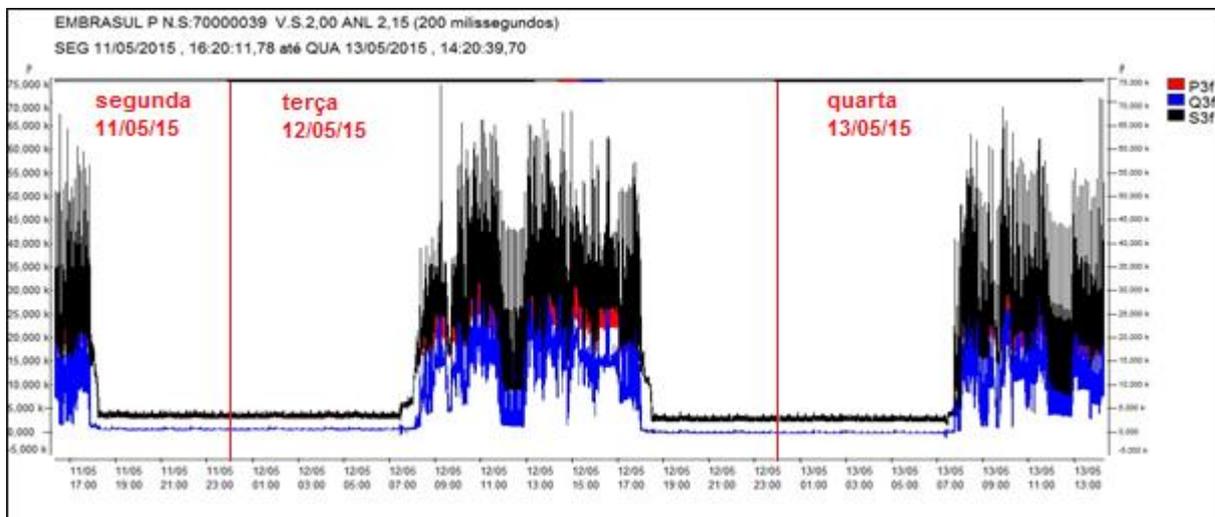


Figura 39 – Gráfico das potências trifásicas (11/05/15 – 13/05/15)

Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo foi dedicado à análise da qualidade de energia antes de instalar o sistema fotovoltaico. As medições revelaram como estava a qualidade de energia da empresa, sendo verificadas a tensão de regime permanente, os níveis de distorção harmônica total de tensão e corrente, fator de potência e frequência. Foi verificado que a tensão teve valores abaixo da faixa de tensão adequada para o fornecimento, estabelecido pelo Prodist - Módulo 8 (tensões menores que 117 V), os níveis de DHT de tensão e corrente correspondem às cargas existentes na indústria. Porém os valores de fator de potência ficaram abaixo do limite estabelecido de 0,92 (valor médio de 0,837 indutivo e 0,737 capacitivo), e a frequência do sistema esteve dentro dos limites estabelecidos.

Entretanto, o tempo de medição não foi o mais indicado, sendo que um mês seria melhor para se ter uma perspectiva mais precisa de como a instalação se comporta. No Capítulo 5 é mostrado como a qualidade de energia da instalação se comportou perante o sistema fotovoltaico em funcionamento.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DEPOIS DO SFV

Após a primeira etapa de medições, o sistema fotovoltaico foi ligado e testado pela primeira vez em agosto de 2015. As medições foram realizadas entre os dias 13 e 16 de setembro de 2016 e outra medição entre os dias 27 e 30 de setembro de 2016 (este intervalo entre uma medição e outra foi devido a um problema para descarregar os arquivos, invalidando estas medições). A seguir, são mostradas as curvas, valores medidos e comentadas as situações de cada grandeza elétrica de interesse.

5.1 TENSÃO

As curvas que representam a tensão entre os dias 13 e 16 de setembro de 2016 e outra medição entre os dias 27 e 30 de setembro de 2016 foram plotadas nas Figuras 44 e 45 respectivamente. Os valores máximo, médio e mínimo de tensão foram registrados neste período e na Tabela 16 são mostradas as tensões por fase e neutro. A partir dos valores registrados foi possível observar que houveram valores de tensão que estiveram acima de 133 V, sendo classificada como precária em relação às normas do Prodist - Módulo 8 para instalações de baixa tensão ($117\text{ V} \leq 127\text{ V} \leq 133\text{ V}$). Também foi constatado que não houve interrupções e tampouco variações de tensão de curta duração no período de medições.

Valor	Ua	Ub	Uc	Um
Máximo	132,43 V	133,97 V	134 V	0,46 V
Médio	128,4 V	129,55 V	129,61 V	0,27 V
Mínimo	117,08 V	117,78 V	117 V	0,16 V

Tabela 16 – Tensões máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C e neutro
Fonte: Autoria Própria

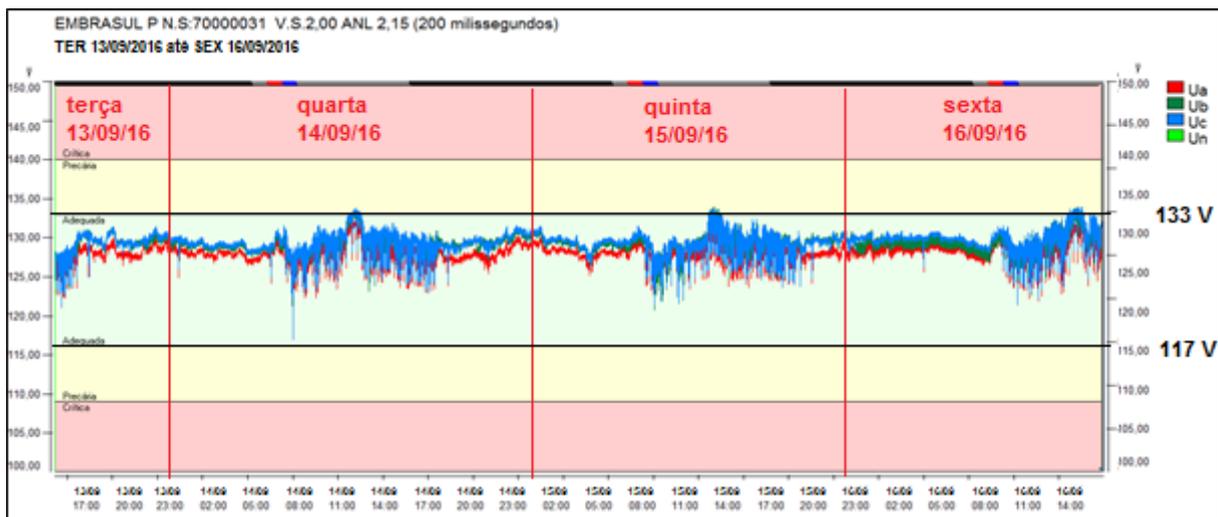


Figura 44 – Gráfico das tensões nas fases e neutro (13/09/16 – 16/09/16)

Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

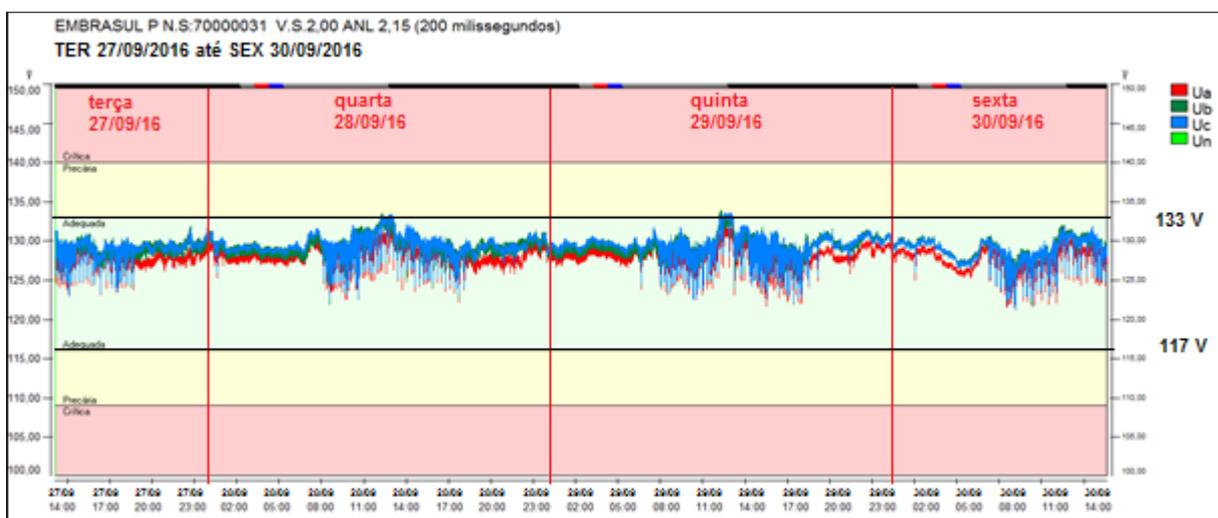


Figura 45 – Gráfico das tensões nas fases e neutro (27/09/16 – 30/09/16)

Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

5.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA

As curvas que representam as distorções harmônicas total (DHT) de tensão estão dispostas nas Figuras 46 e 47 que foram registradas nos dias 13 a 16 de setembro de 2016 e 27 e 30 de setembro de 2016, respectivamente, onde mostram a DHT de tensão por fase. Os valores máximo, médio e mínimo de DHT de tensão por fase foram registrados neste período e mostrados na Tabela 17. Pode-se notar

também que mesmo quando a empresa não está no seu horário de funcionamento, a DHT de tensão também varia, devido a algumas cargas ainda em funcionamento.

Valor	DHTua	DHTub	DHTuc
Máximo	6,48%	4,23%	8,01%
Médio	2,47%	1,86%	1,92%
Mínimo	1,04%	0,80%	0,82%

Tabela 17 – DHT de tensão máxima, média e mínima nas fases A, B, C
Fonte: Autoria Própria

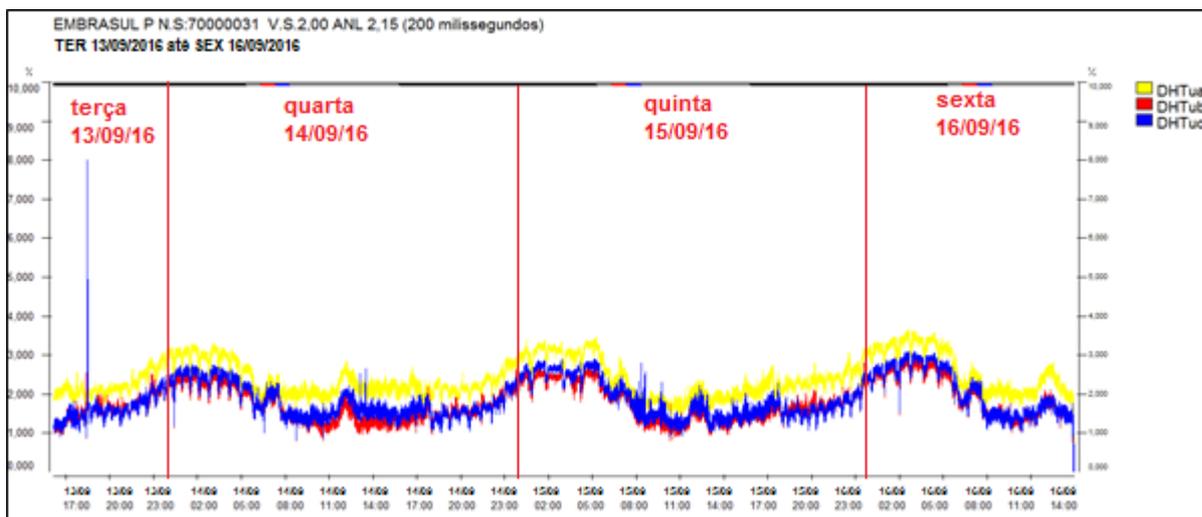


Figura 46 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (13/09/16 – 16/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

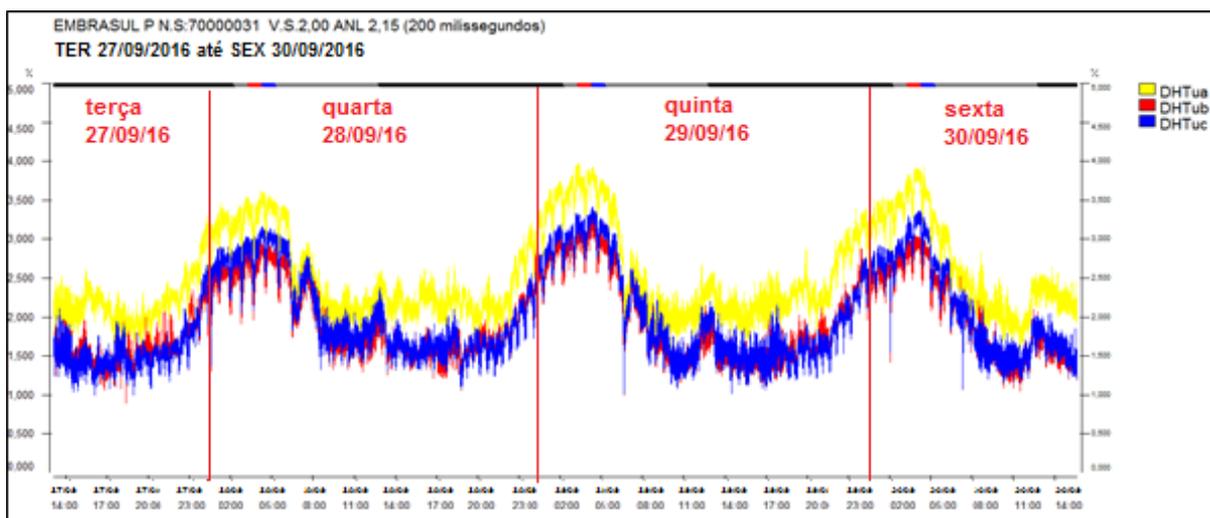


Figura 47 – Gráfico das DHT de tensão nas fases A, B e C (27/09/16 – 30/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

As curvas que representam as distorções harmônicas total (DHT) de corrente estão dispostas nas Figuras 48 e 49 que foram registradas nos dias 13 a 16 de

setembro de 2016 e 27 e 30 de setembro de 2016, respectivamente. Os gráficos demonstram a DHT de corrente por fase, podendo observar os valores são representativos nas medições. Os valores máximo, médio e mínimo de DHT de corrente foram registrados neste período e mostrados na Tabela 18 por fase.

Valor	DHTia	DHTib	DHTic
Máximo	200,00%	100,00%	141,42%
Médio	17,00%	30,82%	21,14%
Mínimo	1,83%	1,72%	1,91%

Tabela 18 – DHT de corrente máxima, média e mínima nas fases A, B, C
Fonte: Autoria Própria

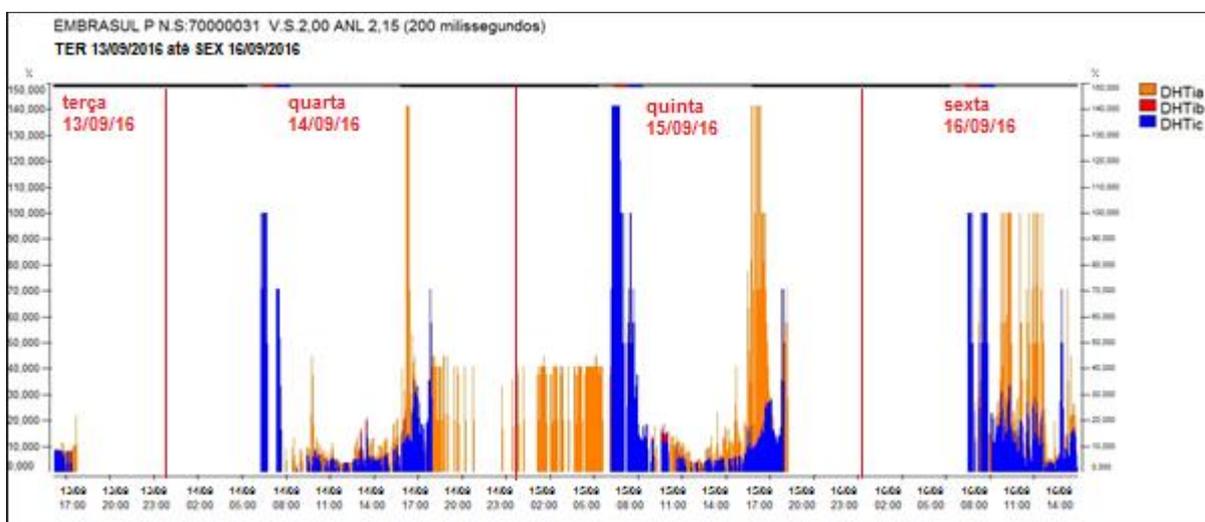


Figura 48 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (13/09/16 – 16/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

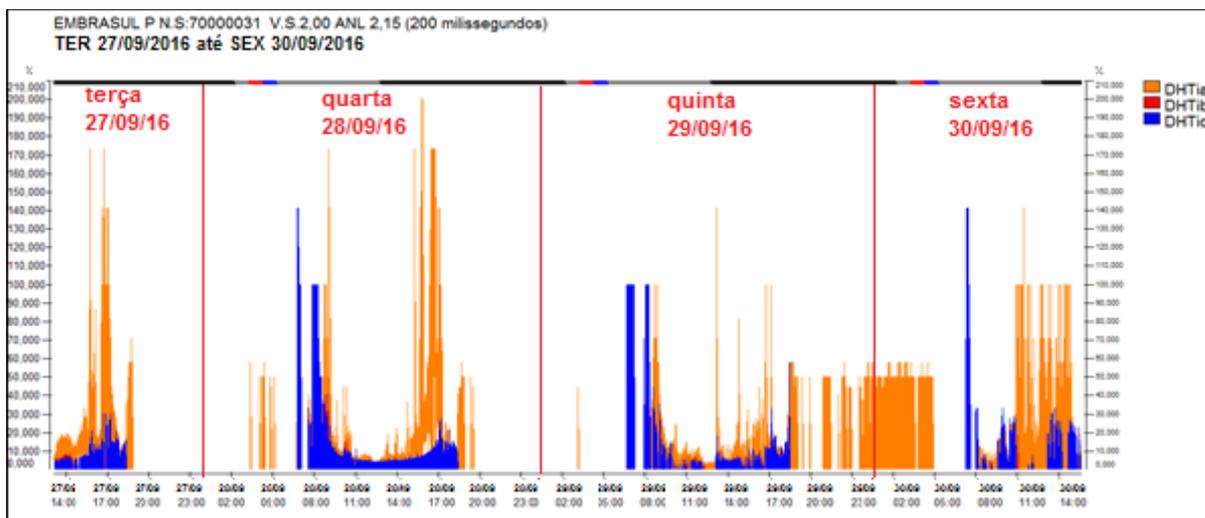


Figura 49 – Gráfico das DHT de corrente nas fases A, B e C (27/09/16 – 30/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

5.3 FATOR DE POTÊNCIA

As curvas que representam os fatores de potência (FP) estão dispostas nas Figuras 50 e 51 que foram registradas nos dias 13 a 16 de setembro de 2016 e 27 e 30 de setembro de 2016, respectivamente, onde mostram o fator de potência por fase registrado no período de medições.

Na Tabela 19 são mostrados os valores máximo, médio e mínimo dos FP por fase que foram registrados. Pode-se notar também que o *software* representa os FP capacitivos como números negativos.

Valor	FPa (ind)	FPb (ind)	FPc (ind)	FPa (cap)	FPb (cap)	FPc (cap)	FP3f (ind)	FP3f (cap)
Máximo	1	1	1	-0,999	-0,999	-0,999	1	-0,999
Médio	0,863	0,825	0,793	-0,993	-0,994	-0,987	0,699	-0,476
Mínimo	0,001	0,001	0,001	-0,003	-0,902	-0,78	0,001	-0,1

Tabela 19 – Fatores de potência máximo, médio e mínimo nas fases A, B, C e total
Fonte: Autoria Própria

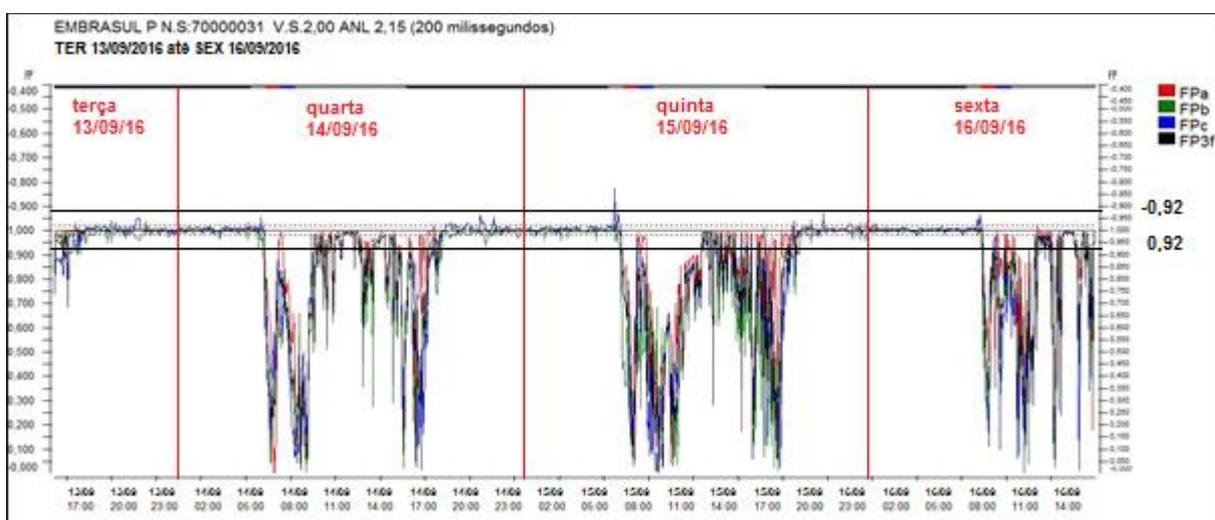


Figura 50 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (13/09/16 – 16/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

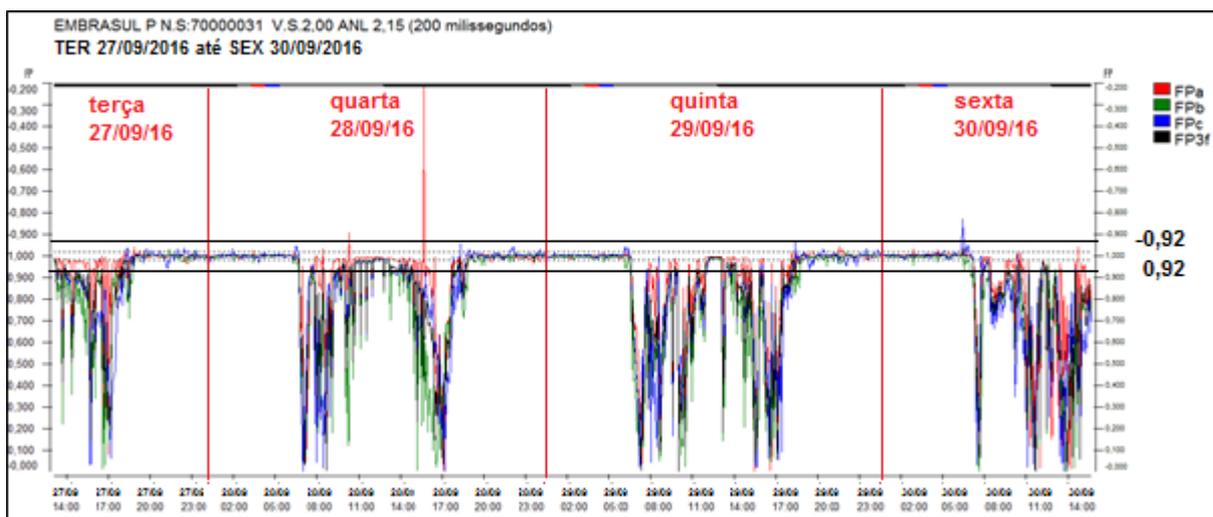


Figura 51 – Gráfico do fator de potência nas fases A, B, C e total (27/09/16 – 30/09/16)
 Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

A potência é mostrada aqui pelo fato que ela está envolvida na análise da qualidade energia. A Tabela 20 mostra os valores máximo, médio e mínimo das potências trifásicas: ativa consumida (P3f cons.), ativa gerada (P3f ger), reativa (Q3f) e aparente (S3f). O analisador de energia não fornece a potência de distorção (DkVA) para uma análise completa. As Figuras 52 e 53 mostram os gráficos de potência da empresa que foram registradas nos dias 13 a 16 de setembro de 2016 e 27 e 30 de setembro de 2016, respectivamente.

A potência reativa pode ser tanto indutiva quanto capacitiva, por isso, na Tabela 20 é mostrada a potência mínima registrada, representada pelo *software*, com o sinal negativo, mostrando que é uma potência reativa capacitiva. Já a potência ativa gerada tem o sinal negativo pois o sentido da corrente é inverso, ou seja, a energia estava sendo gerada pelo sistema fotovoltaico sendo uma parte consumida e outra transferida para a rede elétrica.

Valor	P3f cons.	P3f ger.	Q3f	S3f
Máximo	49,552 kW	-38,133 kW	53,937 kvar	61,372 kVA
Médio	3,656 kW	-14,248 kW	3,408 kvar	8,274 kVA
Mínimo	0,029 kW	-0,081 kW	-0,801 kvar	1,345 kVA

Tabela 20 – Potências trifásicas consumo/geração

Fonte: Autoria Própria

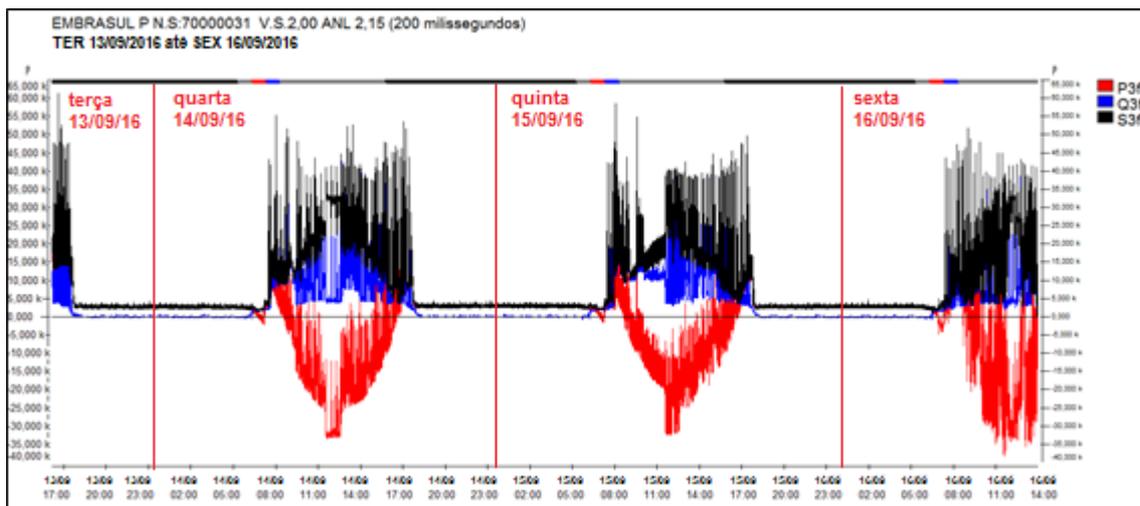


Figura 52 – Gráfico das potências trifásicas (13/09/16 – 16/09/16)

Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

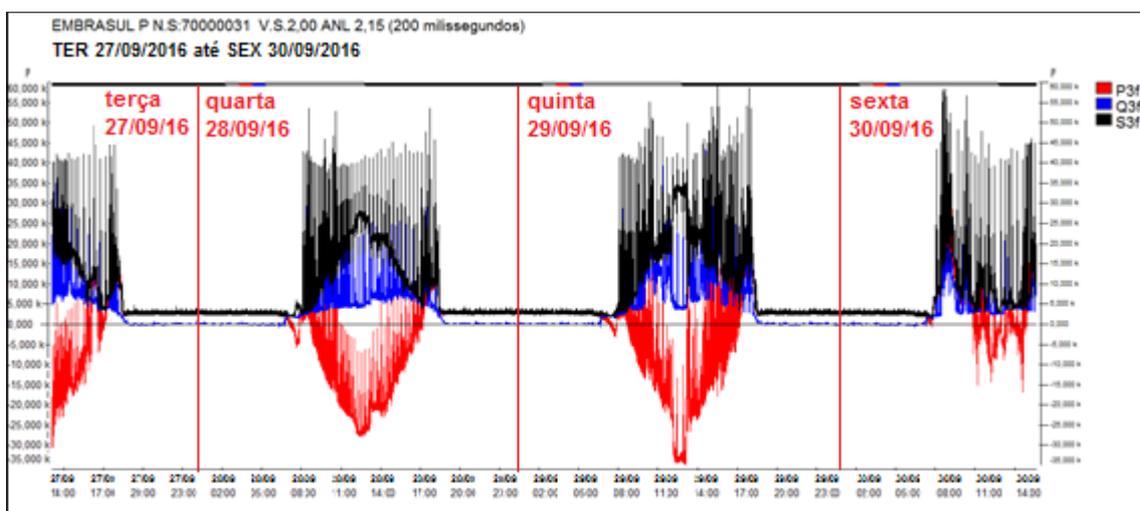


Figura 53 – Gráfico das potências trifásicas (27/09/16 – 30/09/16)

Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

As Figuras 54 e 55 mostram o comportamento da potência ativa separado evidenciando a atuação do sistema fotovoltaico na instalação. Mostram também que o valor da potência ativa gerada aumenta conforme passa o dia, chegando ao pico de geração do dia e depois começa a cair (em módulo) conforme vai anoitecendo.

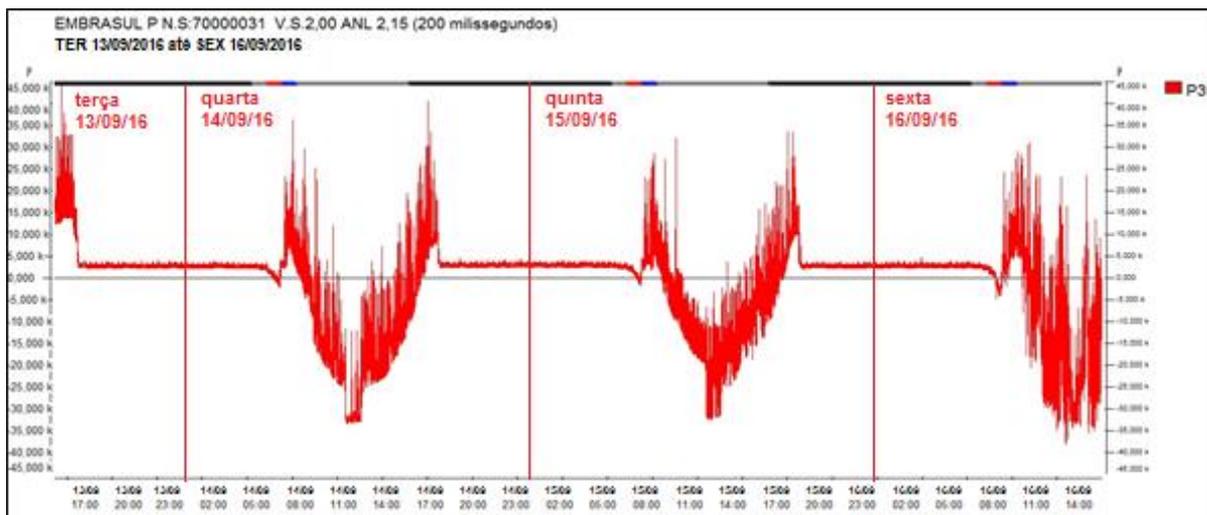


Figura 54 – Gráfico do consumo/geração de potência ativa (13/09/16 – 16/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

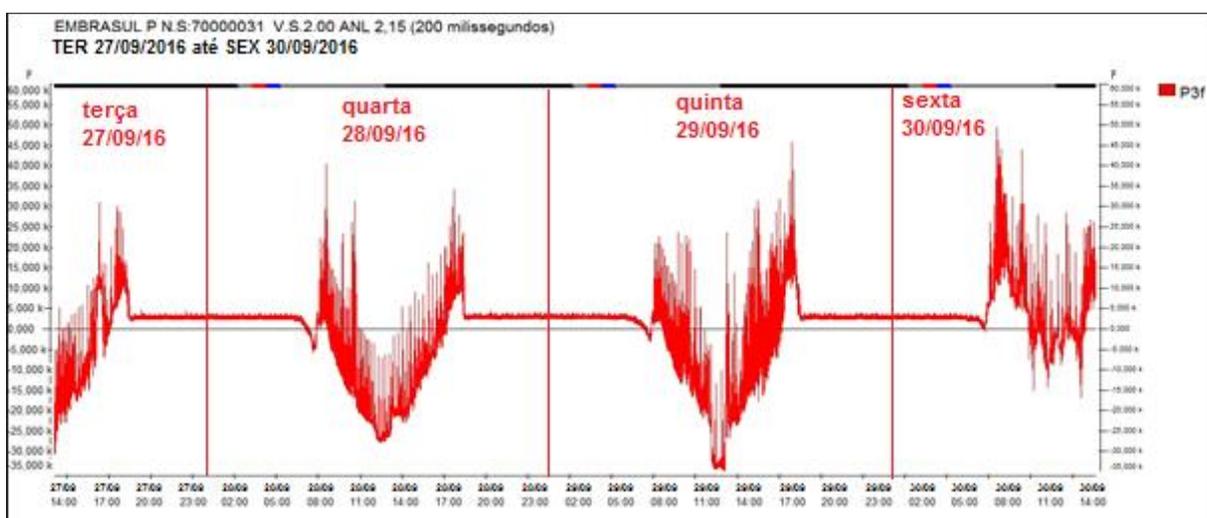


Figura 55 – Gráfico do consumo/geração de potência ativa (27/09/16 – 30/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

As Figuras 56 e 57 mostram a potência gerada nos períodos de medição. É visto também o efeito de quando nuvens (sombreamento) cobrem os módulos fotovoltaicos. Diante das Figuras 54 e 55, observa-se os dias em questão e comparam-se a curva traçada pelo *software* do analisador de energia e do registro do inversor. Estas curvas teriam melhores correspondências caso não houvessem equipamentos absorvendo potência da instalação nos momentos de geração de energia.

Através do endereço eletrônico:

<http://monitor.chintpower.com/Terminal/TerminalMain.aspx?come=Public&pid=100>

é possível verificar a geração de potência e energia desde o dia da implantação do SFV. Ele está conectado com os inversores e é mais uma aplicação deste equipamento para monitoração remota.

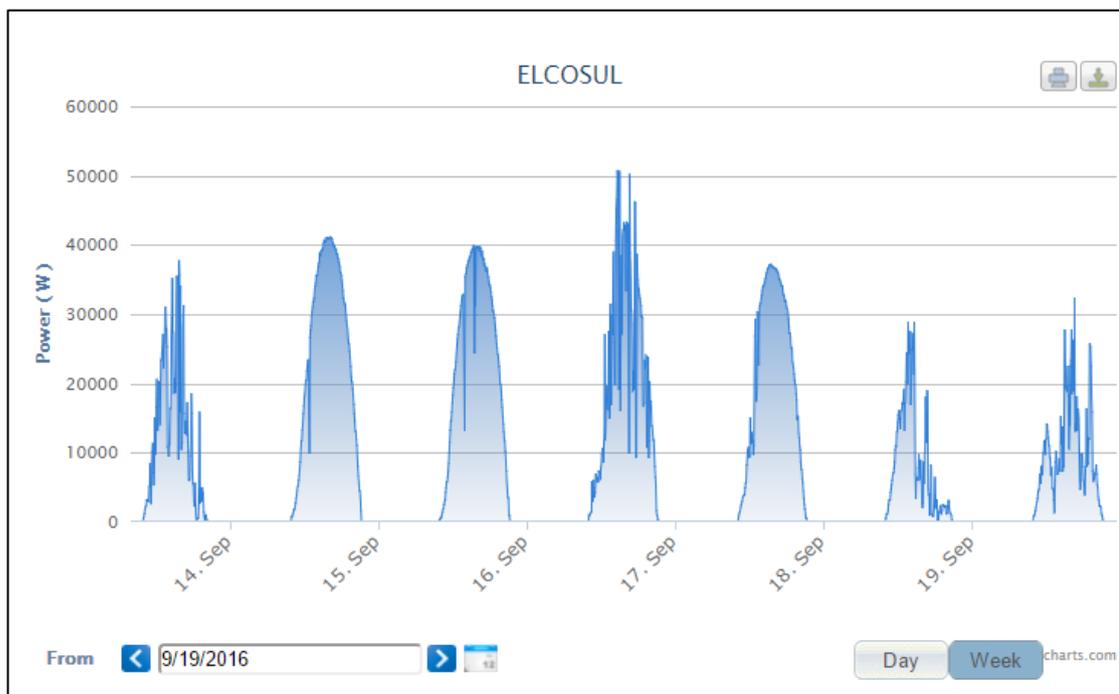


Figura 56 – Gráficos da potência gerada pelo SFV no período de 13 a 19 de setembro de 2016
Fonte: Software do inversor CHINTPOWER

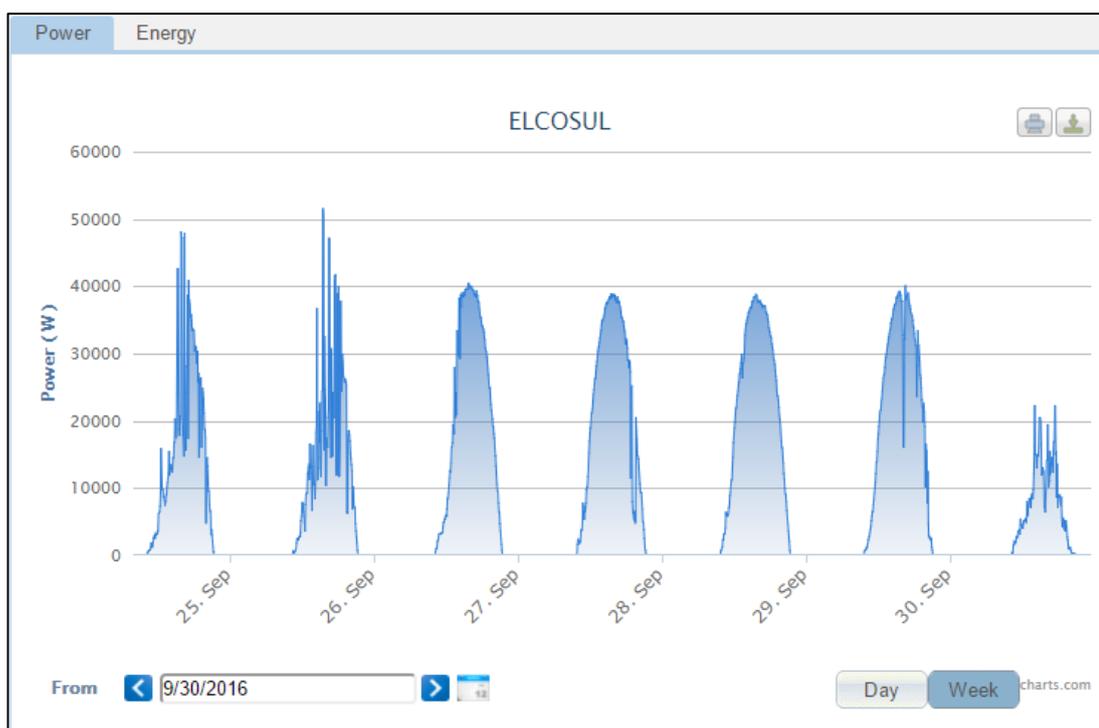


Figura 57 – Gráficos da potência gerada pelo SFV no período de 24 a 30 de setembro de 2016
Fonte: Software do inversor CHINTPOWER

A Figura 58 é de um medidor digital da Schneider Electric PowerLogic PM5100 que está alocado no quadro geral para medições diretas de tensão, corrente, potência, energia e outras informações. O sinal negativo na opção de potência (Ptot) mostra que o SFV está fornecendo 22,483 kW naquele momento. Caso estivesse consumindo potência ativa, o sinal no medidor seria positivo.

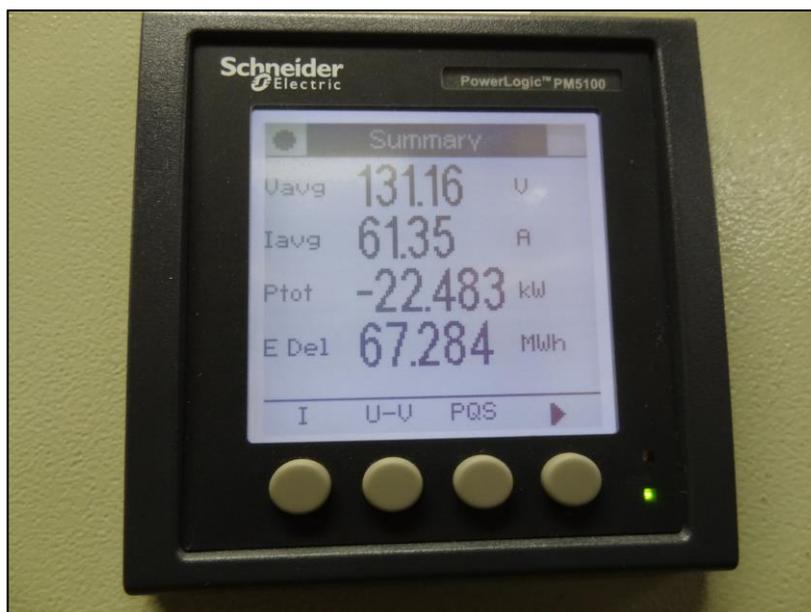


Figura 58 – Medidor Schneider instalado no quadro geral
Fonte: Autoria própria

Pelas Figuras 59 e 60 são mostrados os dados meteorológicos de irradiação fornecido pelo site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nos períodos de medição, para fins de comparação, já que a irradiação é proporcional a potência e consequentemente, a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. As diferenças nas curvas mostradas entre os dados do INMET e dos dados registrados pelo *software* do inversor são causadas pela presença de nuvens no local, mesmo sendo em Curitiba, porém em localidades distintas. Contudo, é possível fazer um comparativo destes dados.

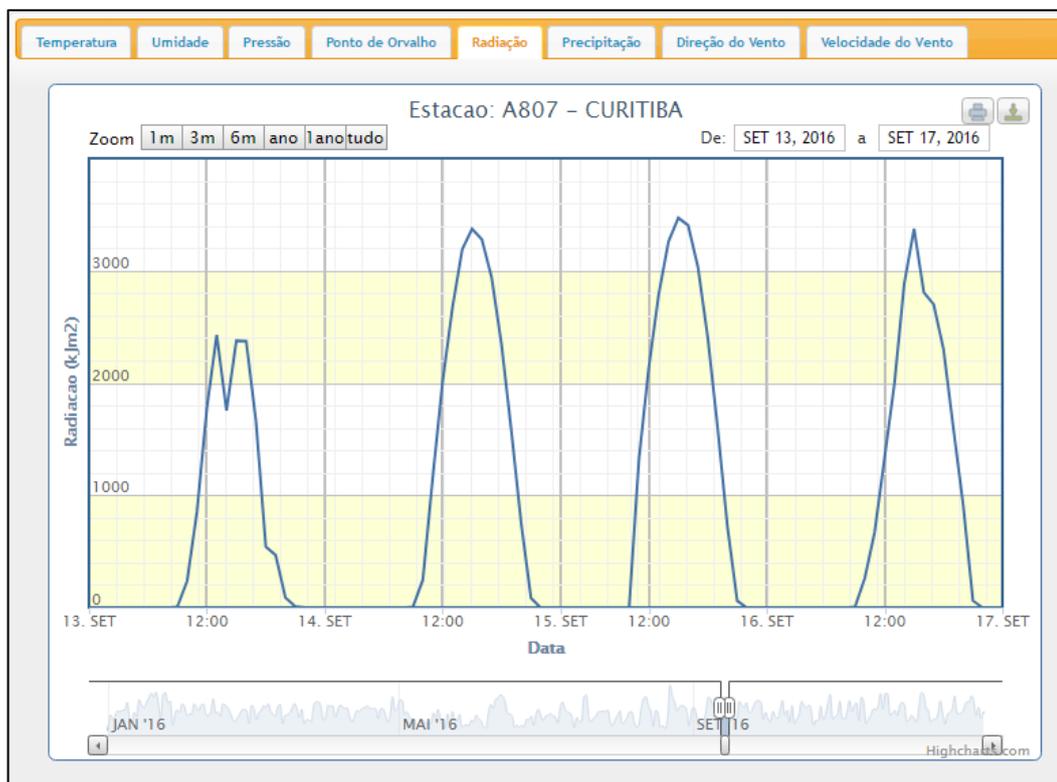


Figura 59 – Curvas de irradiação em Curitiba registrado no período de 13 a 16 de setembro de 2016

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

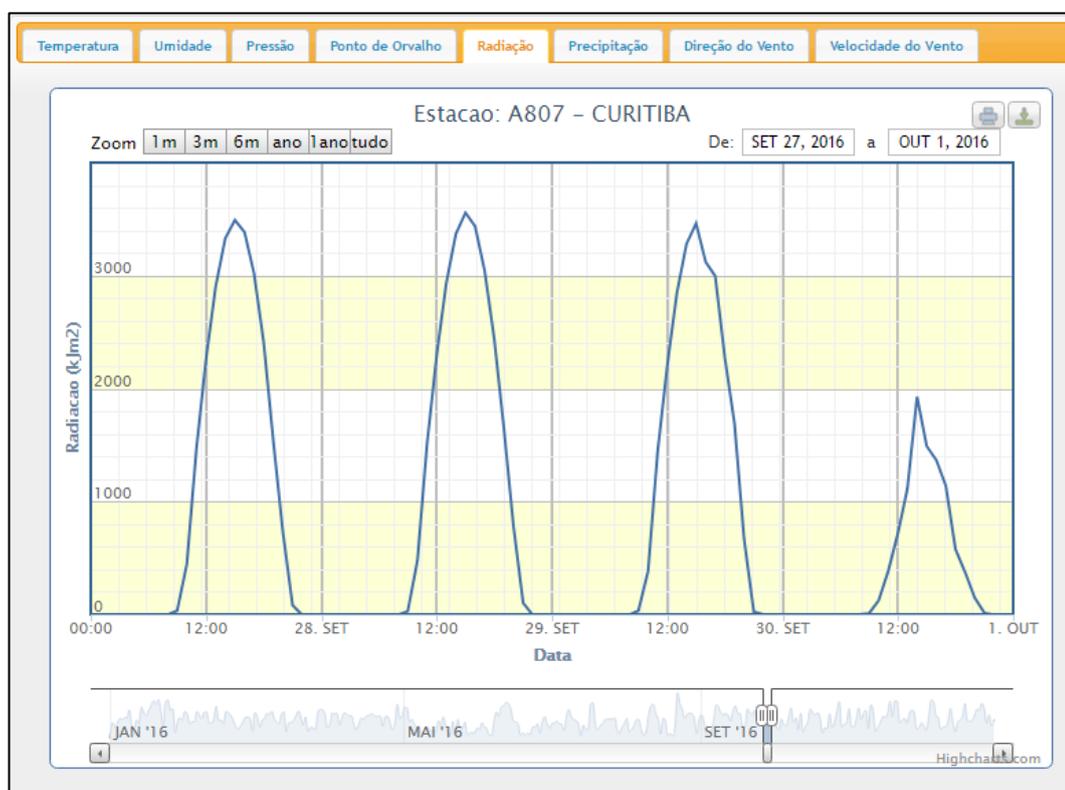


Figura 60 – Curvas de irradiação em Curitiba registrado no período de 27 a 30 de setembro de 2016

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

5.4 FREQUÊNCIA

As curvas que representam a frequência elétrica são mostradas nas Figuras 61 e 62 nos dias 13 a 16 de setembro de 2016 e 27 e 30 de setembro de 2016, respectivamente. Os valores máximo, médio e mínimo de frequência foram coletados neste período e mostrados na Tabela 21 (em Hertz), sendo mostradas as frequências por fase.

A partir dos valores registrados na Tabela 21 observa-se que os valores médios de frequência se encontram dentro da faixa adequada em relação ao documento do Prodist - Módulo 8 ($59,5 \text{ Hz} \leq 60 \text{ Hz} \leq 60,5 \text{ Hz}$) para instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição. Porém valores mínimos foram registrados abaixo desse limite (58,06 Hz), no entanto, segundo o documento citado, é possível permanecer no máximo dez segundos abaixo de 58,5 Hz para recuperação do equilíbrio carga-geração. A Tabela 15 mostra que os valores de frequência em cada fase se mantêm o mesmo, ou seja, não perdem o sincronismo de tal forma que o sistema seja prejudicado.

Valor	freq a	freq b	freq c
Máximo	60,14 Hz	60,14 Hz	60,14 Hz
Médio	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Mínimo	58,06 Hz	58,06 Hz	58,06 Hz

Tabela 21 – Frequência máxima, média e mínima nas fases A, B e C
Fonte: Autoria Própria

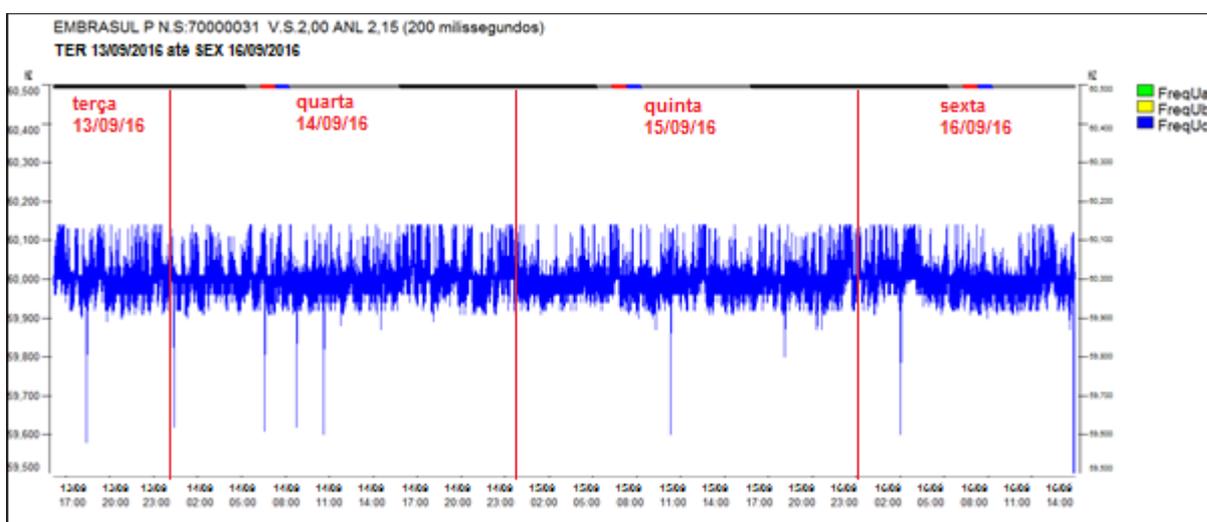


Figura 61 – Gráfico da frequência nas fases A, B e C (14/09/16 – 16/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

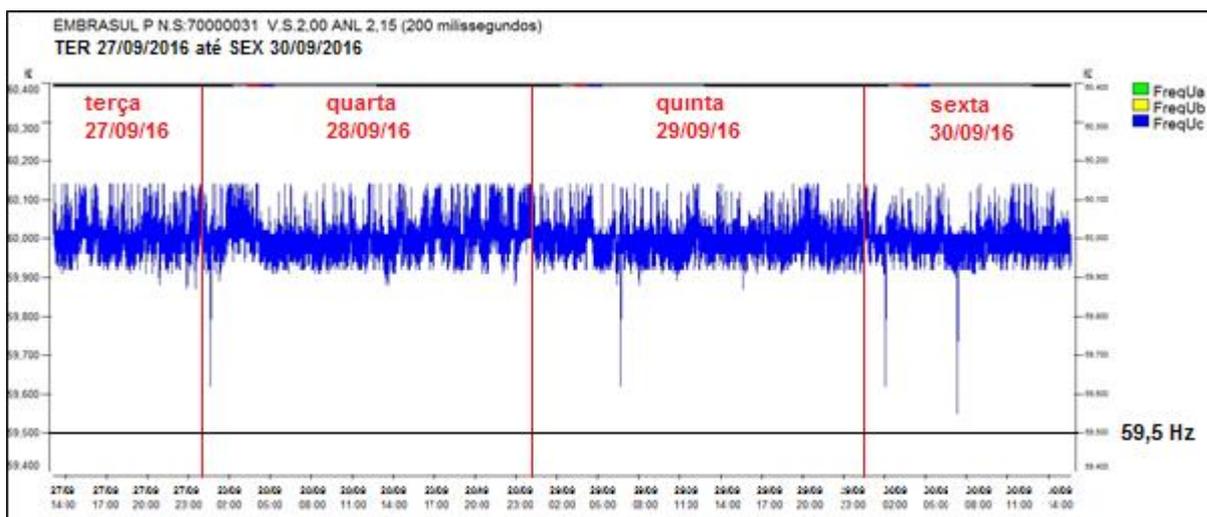


Figura 62 – Gráfico da frequência nas fases A, B e C (27/09/16 – 30/09/16)
Fonte: Software EMBRASUL ANL7000

5.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo é dedicado a análise da qualidade de energia depois de instalar o sistema fotovoltaico. As medições revelam a qualidade de energia da empresa, sendo verificadas a tensão de regime permanente, os níveis de distorção harmônica total de tensão e corrente, fator de potência, energia gerada e frequência, sendo referenciadas ao documento Prodist – Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica.

Pelas medições das tensões de cada fase, verificou-se que os valores médios estão um pouco elevados em relação ao valor nominal de 127 V, e períodos que ultrapassaram da faixa de tensão adequada para precária (maior que 133 V).

Em relação às DHT de tensão houve pouca variação, mantendo uma média menor que 5%, porém as DHTs de corrente chegaram a níveis mais elevados (picos de 200%), os quais podem estar interligados com os acionamentos dos equipamentos da empresa, assim como, o baixo carregamento por parte do conjunto inversor e geração de energia nos módulos fotovoltaicos devido também as condições climáticas nos períodos de medição. Contudo, esta investigação requer conhecimentos mais específicos sobre os equipamentos que estavam operando, o comportamento do inversor e todo o sistema da empresa, e portanto, um outro objeto de estudo.

As medições do fator de potência foram as mais intrigantes, pois o FP ficou bem abaixo do mínimo estipulado por norma (de 0,92 indutivo e capacitivo) com

valores médios na ordem de 0,8 indutivo nas fases e FP trifásico de 0,699 indutivo e 0,476 capacitivo. Este comportamento do fator de potência diminuir em relação à situação anterior da inserção de um sistema fotovoltaico, foi relatado por Retorta (2015), onde demonstrou, por meio de medições realizadas em um local com um SFV em funcionamento, que os parâmetros de fator de potência do local tiveram um impacto significativo na instalação, embora os outros parâmetros que havia analisado estiveram dentro dos limites das normas do Prodist – Módulo 8.

Observando o impacto da inserção do SFV em relação à geração de energia, é nítido perceber que o sistema teve uma folga na demanda dessa energia, tanto pelos valores médios registrados, quanto nos gráficos (Figuras 55 e 56).

As medições de frequência tiveram a média de 60 Hz, porém ocorreram alguns períodos, valores fora dos limites estabelecidos, tendo como níveis máximos de 60,14 Hz e mínimos de 58,06 Hz.

5.6 AGRUPAMENTO DOS DADOS

Juntando as tabelas referentes aos dados de tensão, DHT tensão e de corrente, fator de potência e frequência antes e depois da instalação do sistema fotovoltaico, foram criadas as tabelas 22 a 26. Na Tabela 22 vê-se o comportamento das tensões, máxima, média e mínima, antes e depois da colocação do sistema fotovoltaico.

Valor	U _a antes	U _a depois	U _b antes	U _b depois	U _c antes	U _c depois	U _n antes	U _n depois
Máximo	129,15 V	132,43 V	129,00 V	133,97 V	130,1 V	134 V	0,52 V	0,46 V
Médio	126,57 V	128,40 V	126,81 V	129,55 V	127,17 V	129,61 V	0,29 V	0,27 V
Mínimo	116,09 V	117,08 V	117,60 V	117,78 V	116,84 V	117 V	0,22 V	0,16 V

Tabela 22 – Tensões máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C e neutro, antes e depois de instalado o SFVCR

Fonte: Aatoria Própria

Na Tabela 23 é mostrado o comparativo das distorções harmônicas totais de tensão antes e depois da instalação do sistema fotovoltaico, mostrando valores máximos médios e mínimos nas fases A, B e C.

Valor	DHT _{ua} antes	DHT _{ua} depois	DHT _{ub} antes	DHT _{ub} depois	DHT _{uc} antes	DHT _{uc} depois
Máximo	4,41%	6,48%	4,92%	4,23%	4,64%	8,01%
Médio	2,57%	2,47%	2,61%	1,86%	2,49%	1,92%
Mínimo	0,99%	1,04%	0,96%	0,80%	0,91%	0,82%

Tabela 23 – DHTs de tensão máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C, antes e depois de instalado o SFVCR

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 24 é mostrado o comparativo das distorções harmônicas totais de corrente antes e depois da instalação do sistema fotovoltaico, mostrando valores máximos médios e mínimos nas fases A, B e C.

Valor	DHT _{ia} antes	DHT _{ia} depois	DHT _{ib} antes	DHT _{ib} depois	DHT _{ic} antes	DHT _{ic} depois
Máximo	32,14%	200,00%	17,54%	100,00%	18,73%	141,42%
Médio	5,08%	17,00%	4,74%	30,82%	5,51%	21,14%
Mínimo	1,32%	1,83%	1,33%	1,72%	1,46%	1,91%

Tabela 24 – DHTs de corrente máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C, antes e depois de instalado o SFVCR

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 25 é mostrado o comparativo fatores de potência antes e depois da instalação do sistema fotovoltaico, mostrando valores máximos médios e mínimos nas fases A, B, C e trifásicos, tanto indutivos quanto capacitivos.

Valor _{antes}	FP _a (ind)	FP _b (ind)	FP _c (ind)	FP _a (cap)	FP _b (cap)	FP _c (cap)	FP _{3f} (ind)	FP _{3f} (cap)
Máximo	1	1	1	-0,999	-0,999	-0,999	1	-0,999
Médio	0,934	0,928	0,903	-0,978	-0,944	-0,979	0,827	-0,787
Mínimo	0,25	0,406	0,527	-0,914	-0,002	-0,854	0,1	-0,1
Valor _{depois}	FP _a (ind)	FP _b (ind)	FP _c (ind)	FP _a (cap)	FP _b (cap)	FP _c (cap)	FP _{3f} (ind)	FP _{3f} (cap)
Máximo	1	1	1	-0,999	-0,999	-0,999	1	-0,999
Médio	0,863	0,825	0,793	-0,993	-0,994	-0,987	0,699	-0,476
Mínimo	0,001	0,001	0,001	-0,003	-0,902	-0,78	0,001	-0,1

Tabela 25 – Fatores de potência (indutivos e capacitivos) máximos, médios e mínimos nas fases A, B, C e trifásicos, antes e depois de instalado o SFVCR

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 26 é mostrado o comparativo das potências ativa, reativa e aparente trifásicas, antes e depois da instalação do sistema fotovoltaico, mostrando valores máximos médios e mínimos, assim como as potências ativa consumida e gerada.

Valor _{antes}	P3f		Q3f	S3f
Máximo	61,767 kW		57,803 kvar	79,669 kVA
Média	7,384 kW		2,893 kvar	9,856 kVA
Mínimo	1,326 kW		-0,265 kvar	1,330 kVA
Valor _{depois}	P3f cons.	P3f ger.	Q3f	S3f
Máximo	49,552 kW	-38,133 kW	53,937 kvar	61,372 kVA
Média	3,656 kW	-14,248 kW	3,408 kvar	8,274 kVA
Mínimo	0,029 kW	-0,081 kW	-0,801 kvar	1,345 kVA

Tabela 26 – Potências máximas, médias e mínimas, antes e depois de instalado o SFVCR

Fonte: Aatoria Própria

Na Tabela 27 é mostrado o comparativo das frequências antes e depois da instalação do sistema fotovoltaico, mostrando valores máximos médios e mínimos nas fases A, B e C.

Valor	freq a _{antes}	freq a _{depois}	freq b _{antes}	freq b _{depois}	freq c _{antes}	freq c _{depois}
Máximo	60,14 Hz	60,14 Hz	60,14 Hz	60,14 Hz	60,14 Hz	60,14 Hz
Médio	60 Hz	60 Hz	60 Hz	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Mínimo	59,54 Hz	58,06 Hz	59,54 Hz	58,06 Hz	59,54 Hz	58,06 Hz

Tabela 27 – Frequências máximas, médias e mínimas nas fases A, B, C, antes e depois de instalado o SFVCR

Fonte: Aatoria Própria

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo comparar a qualidade de energia da empresa em questão, na qual foi instalada um sistema fotovoltaico de aproximadamente 50 kW, e através das medições realizadas com um analisador de energia EMBRASUL RE7000 foi possível verificar as grandezas elétricas citadas no trabalho. Todas as medições foram realizadas no Ponto de acoplamento comum (PAC) (Figura 23) de modo que fossem registradas as grandezas elétricas de tensão, níveis de distorções harmônicas de tensão e corrente, fator de potência, potência gerada e consumida e frequência. Estas medições foram realizadas em dois cenários: sem o sistema fotovoltaico e com o sistema fotovoltaico instalado na empresa. Os dados foram separados e mostrados em tabelas e gráficos mostrando o comportamento de cada grandeza durante as medições.

A análise das medições antes de instalar o SFV apresentou os seguintes resultados:

- Os valores de tensão de cada fase permaneceram dentro dos limites adequados do Prodist, porém existiram períodos que a tensão ficou abaixo da faixa adequada para precária;
- As DHT de tensão e corrente estiveram adequadas ao tipo de instalação industrial;
- Já foi verificado nesta etapa que o fator de potência da instalação já estava com níveis abaixo do limite (0,92) estabelecido pelo Prodist e,
- Valores médios de frequência dentro do limite permitido para uma frequência de 60 Hz.

Após a instalação do sistema fotovoltaico, as medições apresentaram os seguintes resultados:

- Os valores de tensão (média) de cada fase tiveram um pequeno aumento em relação à primeira etapa de medições, com períodos que ultrapassaram a faixa entre adequada e precária;

- Os níveis de DHT de tensão mantiveram uma média inferior a 5%, porém os valores de DHT de corrente foram elevados, por fatores que necessitam de um estudo mais aprofundado do motivo deste comportamento;
- O fator de potência de toda a instalação manteve níveis médios muito abaixo do limite de 0,92 recomendado pelo Prodist. Isso pode gerar redução da capacidade dos alimentadores, desgaste dos equipamentos, aumento das perdas elétricas (RETORTA, 2015);
- É evidente a participação do SFV pela energia gerada. Isso diminui a demanda por potência ativa da rede além de transferir o excedente de energia gerada para a rede, onde será aproveitado por outras instalações e,
- A frequência do sistema apresentou valores abaixo em alguns períodos de medição, conforme a norma do Prodist – Módulo 8.

Nesta instalação, percebeu-se que o SFV não se adequou a premissa que era verificar uma melhora na qualidade de energia com sua inserção nas instalações da empresa, sendo que a QEE antes do sistema não estava tão propícia para receber um sistema fotovoltaico deste porte. Como já citado no texto (Eslin, Heskes, 2003), a “poluição harmônica” em uma instalação prejudica a referência tomada pelo inversor, sendo assim, transferindo essa “poluição” para o sistema.

Porém, em todo momento da realização deste trabalho, não houveram interrupções, afundamentos de tensão de curta duração, paradas imprevistas dos equipamentos, e tampouco manutenção nos inversores, módulos fotovoltaicos e transformadores.

É imprescindível dizer que para uma instalação de sistema fotovoltaico desse porte é necessário realizar esta pré-análise da qualidade de energia, pois dependendo do local que for instalado, o sistema não poderá se adequar com esta fonte de energia suplementar, de modo que até mesmo o inversor não consiga entrar em sincronismo com a rede, inclusive podendo prejudicar o sistema. Portanto, indica-se esta investigação prévia para que, se for necessário, realize as devidas modificações elétricas e estruturais no local, como por exemplo, o aterramento, uso de bancos de capacitores e filtros, dispositivos de proteção e SPDAs, escolha de equipamentos mais eficientes, estruturas para os módulos fotovoltaicos, etc.

Trabalhos futuros sobre este tema poderiam focar-se na análise da qualidade de energia em outros cenários de operação do SFV (realizando testes desligando o

inversor e verificando o comportamento do sistema), o motivo de ter apresentado elevados níveis de distorções harmônicas de corrente, a influência de um banco de baterias, simulações computacionais ou até mesmo verificar como a concessionária lida com o aumento da adesão da geração de energia solar fotovoltaica e como isso reflete na qualidade de energia e no controle das grandezas elétricas.

REFERÊNCIAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> Acesso em: 17 maio 2015.

_____. CAPACIDADE DE GERAÇÃO DO BRASIL. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 15 novembro 2015.

_____. COMBUSTÍVEL. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>> Acesso em: 23 de maio de 2017

_____. PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST; MÓDULO 3 – ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, REVISÃO 5. 14 de dezembro/2012. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo3_revisao_5.pdf> Acesso em: 15 novembro 2015.

_____. PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST; MÓDULO 8 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, REVISÃO 6. 1 de janeiro/2015. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_6_Retificacao_1.pdf> Acesso em: 15 novembro 2015.

_____. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482/2012. 17 de abril/2012. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em: 15 novembro 2015.

_____. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687/2015. 24 de novembro/2015. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em: 15 novembro 2016.

_____. RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL DOS EMPREENDIMENTOS. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>> Acesso em: 15 novembro 2015 e 23 de maio de 2017.

ALMEIDA, Pedro M. de, **Condicionamento da energia solar fotovoltaica para sistemas interligados à rede elétrica**, Artigo publicado pela LABSOLAR -

Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/labsolar/files/2011/05/Condicionamento-da-Energia-Solar-Fotovoltaica.pdf>>. Acesso em: 20 de novembro 2015.

_____. SALA DE IMPRENSA. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/brasil-possui-mais-de-10-mil-conexoes-de-micro-e-minigeracao-distribuida/656877/pop_up?_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_viewMode=print&_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_languageId=pt_BR> Acesso em: 23 de maio de 2017

ANTUNES, Fernando L. M., LEÃO, Ruth P. S., SAMPAIO, Raimundo F., **Harmônicos em sistemas elétricos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

BEATY, H. Wayne, DUGAN, Roger C., McGRANAGHAN, Mark F., **Electrical power systems quality**, New York: McGraw-Hill, 1996.

BOLLEN, Math H.J., **Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions**, New York: IEEE – *The institute of electrical and electronics engineers*, 2000.

CÂMARA, Carlos F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à Rede elétrica**, Dissertação Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, 2011.

CONVÊNIO ICMS Nº 16 DE 22/04/2015

Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=283791>> Acesso em: 17 maio 2015.

CRESESB-CEPEL

Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=331> Acesso em: 31 outubro 2015.

DATASHEET CPS SCA 10 kW, 20kW

Disponível em: <<http://test8.xin36.com/productsn.asp?/101.html>> Acesso em: 31 outubro 2015.

DATASHEET CRYSTALLINE PV MODULE - ASTRONERGY

Disponível em: <http://www.astronergy.com/attch/product/20151014_CHSM6612P_3BB_45mm.pdf>. Acesso em: 15 novembro 2015

ELETROBRAS

Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/main.asp?ViewID=%7B45B85458-35B3-40FE-BDDD-A6516025D40B%7D¶ms=itemID=%7B331CFDDF-793A-4FE8-B837-CA548DDF35FD%7D;&UIpartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>> Acesso em: 31 outubro 2015.

ENGELÉTRICA

Disponível em: < <http://www.engeletrica.com.br/correcao-fator-de-potencia-fator-de-potencia.htm>> Acesso em: 13 novembro 2015

ESLIN, J.H.R., HESKES, P.J.M., ***Power quality behaviour of different photovoltaic inverter topologies***, PCIM-2003, *24th International Conference, Nürnberg - Germany*, 2003. Disponível em: < <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2003/rx03056.pdf> >. Acesso em: 23 novembro 2015.

FRANCO, Edgard, **Qualidade de energia: causas, efeitos e soluções**, 2013
Disponível em: <<http://www.macoem.com.br/wp-content/uploads/2014/02/Qualidade-de-Energia-%E2%80%93-Causas-Efeitos-e-Solu%C3%A7%C3%B5es..pdf>>
Acesso em: 5 novembro 2015.

GAZOLI, J. R.; VILLALVA, M.G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

GHENSEV, Almir, **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. Dissertação Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET

Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf> Acesso em: 5 de maio de 2017.

MANUAL ANALISADOR EMBRASUL RE 7000

Disponível em:

<http://www.embrasul.com.br/painel/pdf/Cat%C3%A1logo_RE7000_v05r00_pt_HR.pdf> Acesso em 5 de novembro 2016.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

NASCIMENTO, Cássio A. do, **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**, Dissertação Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, 2004

PINHO, João T., GALDINO, Marco A., **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**, Grupo de trabalho de energia solar – GTES (CEPEL e CRESESB), Rio de Janeiro, 2014.

PORTAL ENERGIA

Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/energia-ondas-e-mares-vantagens-e-desvantagens/>> Acesso em: 1 novembro 2015.

PRYSMIAN CLUB

Disponível em: <<http://www.housepress.com.br/siteprysmian/pagina.asp?id=294&edicao=48&pasta=ed48&data=48&data2=Junho%202011>> Acesso em: 1 novembro 2015.

ROSA, Luiz P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. **Revistas USP: Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 39-58, 2007. Disponível em:

<<http://www.revistas.usp.br/eav/issue/view/748>> Acesso em: 17 maio 2015.

RETORTA, Fabio S., **Análise da operação de fontes de energia renováveis e baterias conectadas na rede de distribuição de baixa tensão**, Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SANTOS, Ivan N., **Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas**, Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, 2007. Disponível em: <<http://penelope.dr.ufu.br/bitstream/123456789/265/1/ContribuicaoAvaliacaoDesempenho.pdf>>. Acesso em: 30 novembro 2015.

UNISINOS

Disponível em: <<http://www.ihu.unisinos.br/noticias/528811-energia-solar-chinesa-sustentara-a-expansao-global-recorde-em-2014>> Acesso em: 1 novembro 2015.

URBANETZ JUNIOR, Jair, **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas**: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. 2010. 189 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

ANEXO A – Datasheet Módulo fotovoltaico – Astronergy

For Global Market



Datasheet Crystalline PV Module Baseline CHSM6612P Series

300 305 310 315 320

EN

ELECTRICAL SPECIFICATIONS					
	300 Wp	305 Wp	310 Wp	315 Wp	320 Wp
STC rated output (P_{mpp})*	300 Wp	305 Wp	310 Wp	315 Wp	320 Wp
PTC rated output (P_{mpp} **)	273.2 Wp	277.9 Wp	282.5 Wp	287.2 Wp	291.9 Wp
Standard sorted output	0/+5 Wp				
Warranted power output STC ($P_{nominal}$)	300 Wp	305 Wp	310 Wp	315 Wp	320 Wp
Rated voltage (V_{mpp}) at STC	35.74 V	35.77 V	35.80 V	35.83 V	35.86 V
Rated current (I_{mpp}) at STC	8.40 A	8.53 A	8.68 A	8.80 A	8.93 A
Open circuit voltage (V_{oc}) at STC	45.16 V	45.29 V	45.42 V	45.55 V	45.68 V
Short circuit current (I_{sc}) at STC	8.91 A	8.95 A	8.99 A	9.02 A	9.06 A
Module efficiency	15.5%	15.8%	16.0%	16.3%	16.5%
Rated output (P_{mpp}) at NOCT	209.5 Wp	213.0 Wp	216.5 Wp	220.0 Wp	223.5 Wp
Rated voltage (V_{mpp}) at NOCT	32.63 V	32.67 V	32.70 V	32.71 V	32.74 V
Rated current (I_{mpp}) at NOCT	6.42 A	6.52 A	6.62 A	6.73 A	6.82 A
Open circuit voltage (V_{oc}) at NOCT	41.44 V	41.56 V	41.68 V	41.80 V	41.92 V
Short circuit current (I_{sc}) at NOCT	6.89 A	6.92 A	6.95 A	6.98 A	7.01 A
Temperature coefficient (P_{mpp})	-0.408%/K		Maximum system voltage (UL/IEC)		
Temperature coefficient (I_{sc})	+0.050%/K		1000 V _{oc} ***		
Temperature coefficient (I_{mpp})	-0.003%/K		Number of diodes		
Temperature coefficient (V_{mpp})	-0.406%/K		6 (or 3)		
Temperature coefficient (V_{oc})	-0.311%/K		Maximum series fuse rating		
Normal operating cell temperature (NOCT)	46±2°C		15 A		

* Measurement tolerance +/- 3%

** Estimated

*** Option: 1500VDC for special requirement in advance



A CHNT COMPANY



ASTRONERGY

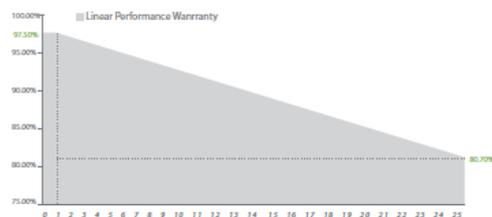
RELATED PARAMETERS	
Cell type	polycrystalline
Number of cells / cell arrangement	72 / 6 x 12
Cells dimension	6"
Packing unit	22 modules
Weight of packing unit	553 kg / 1219 lbs

MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Outer dimensions (L x W x H)	1954 x 990 x 45 mm 76.93 x 38.98 x 1.77 in
Frame technology	Aluminum, silver anodized
Module composition	Glass / EVA / Backsheet (white)
Weight (module only)	22.5 kg / 49.6 lbs
Front glass thickness	3.2 mm / 0.13 in
Junction box IP rating	IP 65 (above)
^① Cable length (UL/IEC)	1000 mm / 39.37 in
Cable diameter (UL/IEC)	12 AWG / 4 mm ²
^② Maximum load capacity	5400 Pa
Fire performance (UL/IEC)	Type 1 (UL) or Class C (IEC)
Connector type (UL/IEC)	MC type 4 compatible

^① Option: 1150 mm for defined projects in advance.

^② Only limit to portrait direction specified in Astronergy crystalline installation manual.

QUALIFICATION AND LINEAR WARRANTIES	
Product standard	IEC 61215, 61730 / UL 1703
Extended product warranty	10 years
Output decline 2.5%/year performance P _{mpp} (STC)	1 st year
Output decline 0.7%/year performance P _{mpp} (STC)	2 nd -25 th years



ARTICLE NUMBER (per panel)-Baseline CHSM6612P Series		
Model	Article No. (IEC)	Article No. (UL)
CHSM6612P-300	200542	200547
CHSM6612P-305	200543	200548
CHSM6612P-310	200544	200549
CHSM6612P-315	200545	200550
CHSM6612P-320	200546	200551

MODULE DIMENSION DETAILS			
Front view	Side view	Rear view	Frame cross section

© Chint Solar (Zhejiang) Co., Ltd. All rights reserved.
Specifications and designs included in this datasheet are subject to change without notice.

ANEXO B – Datasheet Inversor CPS SCA 10KTL-DOHE

Inverter-Asia/Europe

8/10/12kW Three Phase Grid-tied PV Inverters

Chint Power introduces three-phase 8/10/12kW inverters with unparalleled performances. The series is available in two versions, high efficiency (HE) and standard: the HE version features improved performance providing staggering efficiency of 98.6%, Euro efficiency of 98.2%. The internal DC switch further improves the safety and reliability of the products designed for a variety of applications: from large residential installations to commercial rooftops and utility scale PV systems.

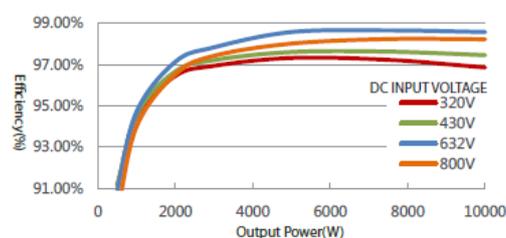


CPS SCA8KTL-DOHE CPS SCA8KTL-DO
CPS SCA10KTL-DOHE CPS SCA10KTL-DO
CPS SCA12KTL-DOHE CPS SCA12KTL-DO

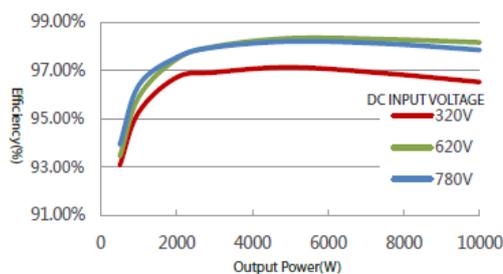
Inverter

Efficiency Curve

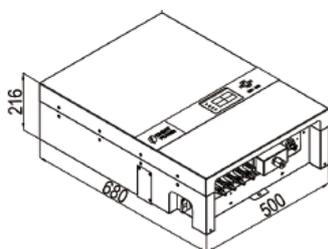
CPS SCA10KTL-DOHE



CPS SCA10KTL-DO



Dimensions



High Efficiency

- Max. efficiency of 98.6%, Euro efficiency of 98.2%
- ≥99.9% MPPT efficiency

High Reliability

- "Electrolyte-free design" for improved long-term reliability
- Fan-less design (SCA8KTL-DO/DOHE) for further reduced noise levels
- Integrated DC switch
- GFCI embedded
- Comprehensive protection functions
- 5 years standard warranty, optional extension up to 20 years

Broad Adaptability

- 2 MPP Trackers for wider application range
- Higher power for each MPP tracker for flexible configuration
- Wide input voltage and MPPT range
- IP65 protection degree for outdoor applications
- EMC class B
- Active power derating, over frequency derating and reactive power regulation
- Low voltage ride through (CEI 0-21)
- Standard RS485, USB, optional Ethernet, Zigbee
- Standard USB for firmware upgrade
- 3rd Party Monitoring 








Model Name	CPS SCA8KTL-DOHE CPS SCA8KTL-DO	CPS SCA10KTL-DOHE CPS SCA10KTL-DO	CPS SCA12KTL-DOHE CPS SCA12KTL-DO
DC Input			
Nominal DC Input Power	8.2kW	10.3kW	12.3kW
Max. DC Input Power for each MPPT	5kW	6kW	7.2kW
Max. DC Input Voltage	1000Vdc		
Operating DC Input Voltage Range	250-950Vdc		
Start-up DC Input Voltage / Power	320V/150W		
Nominal DC Input Voltage	600V		
MPPT Voltage Range	430-800Vdc*/320-800Vdc	430-800Vdc*/320-800Vdc	430-800Vdc*/380-800Vdc
Number of MPP Trackers	2		
Number of DC Inputs (strings)	2x2		
Max. Input Current	17A/MPPT		
Max. Input Current per string	17A		
DC Disconnection Type	Integrated DC switch		
PV Array Configuration	Floating		
AC Output			
Rated AC Output Power	8kW	10kW	12kW
Max. AC Output Power	8kW	10kW	12kW
Rated Output Voltage	400Vac		
Output Voltage Range [#]	320-460Vac		
Grid Connection Type	3Φ/N/PE		
Max AC Output Current	12.5A	15.2A	18.2A
Rated Output Frequency	50Hz/60Hz		
Output Frequency Range [#]	47-53Hz/57-63Hz		
Power Factor	>0.99 (±0.9 adjustable)		
Current THD	<3%		
AC Disconnection Type	-		
System			
Topology	Transformerless		
Max. Efficiency	98.6%/98.3%		
Euro Efficiency	98.2%/97.9%		
Stand-by / Night Consumption	<20W/<0.3W		
Environment			
Protection Degree	IP65		
Cooling	Natural Convection	Variable speed cooling fans	Variable speed cooling fans
Operating Temperature Range	-25°C to +60°C		
Operating Humidity	0-95%, non-condensing		
Operating Altitude	4000m		
Display and Communication			
Display	LCD+LED		
Communication	Standard: RS485, USB; Option: Ethernet, Zigbee		
Mechanical Data			
Dimensions (WxHxD) (mm)	500x680x216		
Weight (kg)	41	43	43
Compliance			
Safety and EMC Standards	LVD: 2006/95/EC, IEC/EN 62109-1: 2010, IEC/EN 62109-2: 2011. EMC: 2004/108/EC, Class B, IEC/EN61000-6-2: 2005, IEC/EN61000-6-3: 2007.		
Grid Standards	VDE-AR-N 4105, VDE V 0126-1-1/A1; C10/11, CEI 0-21, G83/1-1, G59/2, NRS097		
# The "Output Voltage Range" and "Output Frequency Range" may differ according to specific grid cc			
* HE: High efficiency model			
* MAX recommended PV array power ≤ 1.3P(P for Rated AC output power), PV array power range depend on the type of installation and geographical location.			

ANEXO C – Datasheet Inversor CPS SCA 20KTL-DO

Inverter-Asia/Europe

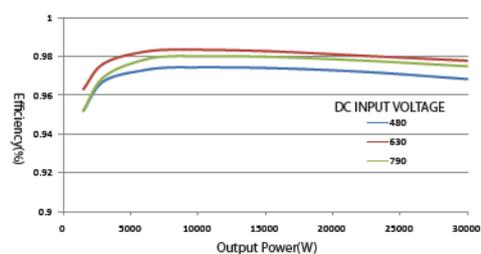
20/25/30/36kW Three Phase Grid-tied PV Inverters

CPS SCA20/25KTL-DO and SCA30/36KTL-DO grid-tied PV inverters are transformerless, three phase products. The maximum input voltage is 1000V which makes the configuration more flexible. Patented 3-level control algorithm and thermal design provide 98.6% maximum efficiency and 98.1% Euro efficiency. This type three phase string inverters are designed with the DC switch integrated. And provide an option for fuse which designed in the wiring box. Integrated PV input string fault detection circuit and PV input arcing fault detection circuit to ensure the safety.

Asia / Europe

Efficiency Curve

CPS SCA30KTL-DO @400Vac



High Efficiency

- Maximum efficiency of 98.6%, Euro efficiency of 98.1%
- 3-level technology and enhanced control mechanism to achieve high efficiency over wide load range
- 2 MPP trackers to achieve higher system efficiency
- Transformerless design

High Reliability

- Comprehensive protection functions
- Enhanced DSP system
- Integrated PV input string fault detection
- Integrated PV input arcing fault detection and interruption circuit
- Advanced thermal design, with variable speed fans
- Anti-islanding protection
- Ground-fault detection and interruption circuit
- Optional DC SPD
- Electrolyte-free design[™] for improved long-term reliability
- 5 years standard warranty, optional extension up to 20 years

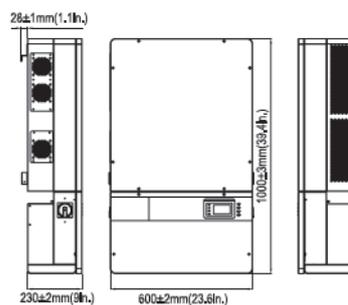


CPS SCA20KTL-DO CPS SCA30KTL-DO
CPS SCA25KTL-DO CPS SCA36KTL-DO

Broad Adaptability

- Low voltage ride through, and provide reactive power to support the grid
 - IP65, outdoor application
 - Active power derating and Reactive power adjustable
 - Separate wiring box design
 - BDEW compatible
 - 1000V maximum input voltage enable flexible configuration
 - Broad MPPT range enable flexible PV string configuration
- Suitable for multi-inverter parallel application

Dimensions



Model Name	CPS SCA20KTL-DO	CPS SCA25KTL-DO	CPS SCA30KTL-DO	CPS SCA36KTL-DO-480
DC Input				
Nominal DC Input Power	21kW	26kW	31kW	37kW
Max. DC Input Power for each	12kW	14kW	16kW	19kW
Max. DC Input Voltage	1000Vdc	1000Vdc	1000Vdc	1000Vdc
Operating DC Input Voltage Range			300-900Vdc	
Start-up DC Input Voltage / Power			330V/300W	
Nominal DC Input Voltage		635Vdc		710Vdc
Number of MPP Trackers			2	
MPPT Voltage Range		400-800Vdc	480-800Vdc	540-800Vdc
Max. Input Current	2x27A	2x32A	2x32A	2x34A
Number of DC Inputs			4 strings x 2	
DC Disconnection Type			Integrated DC switch	
AC Output				
Rated AC Output Power	20kW	25kW	30kW	36kW
Max. AC Output Power	20kW	25kW	30kW	36kW
Rated Output Voltage		230/400Vac		277/480Vac
Output Voltage Range*		320-460Vac		422-528Vac
Grid Connection Type		3Φ/N/PE		3Φ/PE
Max AC Output Current	32A	40A	43.3A	43.3A
Rated Output Frequency			50Hz/60Hz	
Output Frequency Range*			47-53Hz/57-63Hz	
Power Factor			>0.99 (±0.8 adjustable)	
Current THD			<3%	
AC Inrush Current	99A Peak/203us		149A Peak/211us	
Maximum Output Fault Current		L-N/PE:100A Peak@320ms;56.6A RMS@20ms;		
System				
Topology			Transformerless	
Max. Efficiency		98.4%		98.6%
Euro Efficiency		98.0%		98.1%
Stand-by / Night Consumption			<20W/<2W	
Protective Class			I	
Overvoltage Category			PV(II), Mains(III)	
Environment				
Protection Degree			IP65	
Cooling			Variable speed cooling fans	
Operating Temperature Range			- 25°C to +60°C (derating from +45°C)	
Operating Humidity			0-100%, non-condensing	
Operating Altitude			4000m (derating from 2000m)	
Display and Communication				
Display			LCD+LED	
Communication		Standard: RS485, USB, Multit-function Relay	Option: Ethernet, Zigbee	
Mechanical Data				
Dimensions (WxHxD) (mm)			600x1000x230	
Weight (kg)			50 (Inverter)+5 (Wiring Box)	
Safety				
Safety and EMC Standard			LVD: 2006/95/EC EMC: 2004/108/EC, IEC/EN 62109-1: 2010, IEC/EN 62109-2: 2011; IEC/EN61000-6-2: 2005, IEC/EN61000-6-3: 2007	
Grid Standard			BDEW; VDE AR-N-4105/VDE 0126-1-1/A1;CEI 0-21; G83/1/1; G59/2; C10/11; NB/T32004;	
* The "Output Voltage Range" and "Output Frequency Range" may differ according to specific grid codes.				

ANEXO D – Catálogo do analisador de energia EMBRASUL RE7000

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	
Alimentação auxiliar ou pela medição de tensão	
Range VAC:	70 à 300Vac (Fase/Neuro Fonte Trifásica)
Range VDC:	100 à 300Vcc
Consumo:	5VA
Entradas de tensão	
Número de entradas:	3 (VA,VB,VC) ou 4 (VA,VB,VC,VN)*
Range de tensão:	50 à 500 VAC (Fase-Neuro) 866V (F-F)
Resolução:	0,01V
Precisão:	0,2%
Sobrecarga de tensão:	+10% valor máximo durante 1 segundo.
Impedância de entrada:	2M Ω
Amplitude de banda:	1500 Hz
* Para equipamento com módulo de medição do Neuro	Opcional
Entradas de corrente	
Número de entradas:	3 (IA,IB,IC) ou 4 (IA,IB,IC,IN)*
Tipo:	Através de sensor flexível
Range de corrente:	0,1A até 3000A
Diâmetros possíveis:	160mm ou 240mm
Resolução:	0,01A
Precisão:	0,2%
Amplitude de banda:	1500 Hz
* Para equipamento com módulo de medição do Neuro	Opcional
Frequência nominal	
Range:	45 à 70 Hz
Resolução:	0,01 Hz
Precisão:	$\pm 0,01$ Hz
Combinações de fiação	
Monofásicas:	2F
Bifásicas:	2F, 3F
Trifásicas:	3F, 4F e 5F
Tensões:	Por fase e trifásicas
Correntes:	Por fase e trifásicas
Desequilíbrios:	Percentuais de desbalanceamentos entre as fases de tensão (NEMA e IEC)
Potências:	Ativas, reativas e aparentes por fase e totais
Precisão das potências:	$\pm 0,5\%$ + erro do sensor/TC
Fator de potência:	Indutivo e capacitivo
Range do FP:	0,001 até 1 indutivo e 0,001 até 1 capacitivo
Precisão do FP:	$\pm 0,5\%$
Fator de deslocamento:	Indutivo e capacitivo
Range do FP:	0,001 até 1 indutivo e 0,001 até 1 capacitivo
Precisão do FP:	$\pm 0,5\%$
Distorções:	DHTI, DHTV, TDD, DHT GLOBAL
FUNCIONALIDADES	
Visualização das grandezas em tempo real através do display ou software	
Medições de todas as grandezas e parâmetros simultâneos	
Diagrama vetorial	
Sequência de fases	
Registros por horário (Função TIMER - Determina-se horários de início e fim de registros)	
Análise do consumo (Energia ativa e reativa) e demanda ativa e reativa	
Análise do consumo e geração	
Diferenciação das informações por posto horário - Ponta, Fora ponta e Reservado	
Relações de transformação TC e TP (para medições indiretas em média ou alta tensão)	
Simulações de correção do fator de potência e KVAR de correção	
Análise de interrupções no fornecimento	
Exportação dos dados para outras plataformas	
Tabelas e planilhas com todos os dados integrados*	
Emissão de relatórios completos e resumidos*	
Gráficos de linhas e barras dos dados*	
Valores Calculados dos Indicadores Individuais e Coletivos	
Distribuições de tensão conforme Resolução 505 da ANEEL (Histogramas, relatórios e etc..)	
Apresenta valores máximos, médios e mínimos das grandezas no intervalo definido;	
*(permite configuração ou seleção de moldes pré definidos)	

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	
CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS	
Para módulo H (Harmônicas)	
Ordens medidas:	1° (fund) até 25° (pares e ímpares) Conforme IEC 61000-4-7
Ângulo de fase:	0° a 360°
Tratamento de dados:	Formas de onda
	Planilhas pré configuradas
	Gráficos e relatório pré-definidos
	Filtro de extremos em V ou I Para todas as fases
Histogramas (Espectro harmônico):	Percentuais e valores absolutos
Para módulo T (Captura de Transientes)	
Distúrbios de tensão:	Até 700V (F-N) de pico
Duração mínima detectada:	130 µs
Para módulo P (Conformidade com Prodist)*	
Flicker:	PST e PLT conforme IEC61000-4-15
Harmônicas:	1° (fund) até 25° (pares e ímpares) conforme módulo 8 do PRODIST da ANEEL
VTCD (Variações de tensão de curta duração):	Data, hora, magnitude, duração, classificação do evento (Afundamentos "SAG", Elevações "SWELL" e Interrupções) [Momentâneos ou temporários] Conforme módulo 8 do PRODIST da ANEEL
<i>*Este módulo atende INTEGRALMENTE todas as exigências especificadas pelo módulo 8 dos procedimentos de distribuição da ANEEL (PRODIST)</i>	
NORMAS	
Métodos de medição utilizados:	IEC IEC 61000-4-30
Flicker:	IEC 61000-4-15
Harmônicos:	IEC 61000-4-7
Opcional de entradas analógicas	
Entradas Analógicas:	2 Canais
Entrada 1:	de 0 a 10V DC
Entrada 2:	de 4 a 20mA DC
Exatidão:	5%
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GERAIS	
Sistema de amostragem	
Resolução:	128 amostras por ciclo (Simultaneamente em todos os canais)
Intervalo de integração:	De 200 milissegundos à 60 minutos
Memória para registros	
Capacidade da memória interna:	2GB
Autonomia:	Integração em 1 segundo: superior a 2 semanas* Integração em 10 minutos: 24 anos*
Base de tempo:	Cristal de quartzo - Resolução de 10 ms Horário exibido em HH:MM:SS
Bateria:	Interna para armazenamento de dados (Recarrega automático)
<i>*Medição consecutiva com todos os parâmetros registrados simultaneamente</i>	
Display	
tipo:	LCD gráfico (cristal líquido)
STN:	Azul e branco
Retroiluminação:	Com backlight
tamanho:	66,52 x 33,24 mm (3 polegadas)
resolução:	128x64 pixels
Tecado	
Força de contato:	160 ± 30g
Vida útil:	50.000 ciclos (mínimo)
Interfaces de comunicação	
USB	Host 2.0