



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E
AUTOMAÇÃO

ISAÚ MACÊDO BALBINO

ANÁLISE DE IMPACTOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE EM MOSSORÓ/RN

MOSSORÓ/RN

2017

ISAÚ MACÊDO BALBINO

ANÁLISE DE IMPACTOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE EM MOSSORÓ/RN

Dissertação de Mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Linha de Pesquisa: Controle e Sistemas de Energia

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra – UFERSA

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale - UFERSA

MOSSORÓ/RN

2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

B172a Balbino, Isaú Macêdo.

Análise de Impactos de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede em Mossoró/RN / Isaú Macêdo Balbino. - 2017.

94 f. : il.

Orientadora: Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra.

Coorientador: Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, 2017.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. 3. Problemas associados aos SFCR. 4. Qualidade de energia elétrica. 5. Filtro passa-baixa.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ISAÚ MACÊDO BALBINO

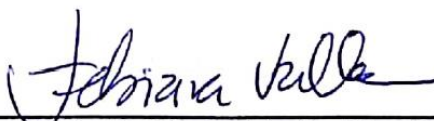
ANÁLISE DE IMPACTOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE EM MOSSORÓ/RN

Dissertação de Mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

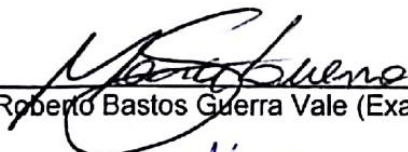
Linha de Pesquisa: Controle e Sistemas de Energia

Defendida em: 29 / 08 / 2017.

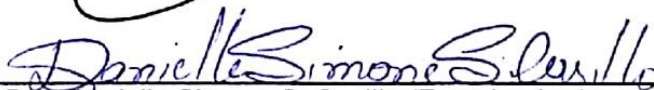
BANCA EXAMINADORA



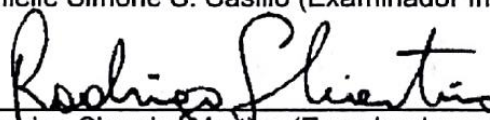
Profa. Dra. Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella (Presidente e Orientador)



Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale (Examinador Interno e Co-orientador - UFERSA)



Prof. Dra. Danielle Simone S. Casillo (Examinador Interno - UFERSA)



Prof. Dr. Rodrigo Siqueira Martins (Examinador externo - IFFRN)

A minha mãe Francisca Amélia de Macêdo Balbino (in memoriam), minha fortaleza, meu exemplo de vida e que me fez ser quem eu sou hoje.

A Deus, sem o qual não seríamos nada.

Ao meu pai Francisco Balbino Sobrinho, que tanto esperou esse momento.

Aos meus orientadores Prof.^a Fabiana Varella e Prof^o Marcelo Guerra por todo o conhecimento compartilhado e que tornaram possível a realização desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua imensa bondade, por me guardar e me ajudar nas horas de aflição e por me dar sabedoria para completar as minhas metas e tomar as decisões corretas.

A minha amada mãe Francisca Amélia de Macêdo Balbino que descansa nos braços de Deus. Agradeço pelo apoio, carinho, amor, paciência, todas as orações e dedicação que me deu durante todo meu desenvolvimento, não só o desenvolvimento acadêmico, mas também o desenvolvimento pessoal, que faz de mim a pessoa que sou hoje. A senhora foi o meu pai e minha mãe, minha companheira fiel durante toda minha vida. A senhora eu devo tudo, mamãe!

Ao meu pai, Francisco Balbino Sobrinho pelo apoio que me deu durante todos esses anos e que tanto aguardou essa conquista.

A minha família, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado, em especial a minha irmã Ione que tanto cuida de mim e que sempre me faz companhia nos momentos bons e nos ruins.

Ao meu colega de pesquisa Gregory Santiago, que tanto contribuiu para esta pesquisa durante esses dois anos de mestrado. Obrigado por toda contribuição, pela companhia e pela força.

Aos meus orientadores Prof.^a Fabiana Varella e Prof^o Marcelo Guerra pela honra de ter sido seu orientando. Pelas sugestões, os incentivos, e as críticas construtivas e todo o conhecimento que me foi repassado e que ajudou a aprimorar cada vez mais esta pesquisa. Também agradeço pela paciência, compreensão, dedicação e disponibilidade para me atender, mesmo tendo muitas outras tarefas. Eu não poderia ter desejado uma orientação melhor.

Aos meus mestres sem os quais eu não poderia ter conseguido mais essa conquista, todo o conhecimento e as dúvidas respondidas, eu agradeço a todos.

Aos meus amigos, os de perto e os de longe, que me apoiaram durante todo esse processo. Pelos momentos felizes e os momentos de preocupação com as provas e trabalhos. Foi uma longa jornada e sempre me lembrarei de todos vocês.

E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para que esta pesquisa fosse concluída e para eu chegasse até onde estou hoje. Muito obrigado.

“E a ciência se multiplicará.”

Daniel 12:4

RESUMO

Os problemas ambientais, como o aquecimento global e a poluição, juntamente com o crescente preço dos combustíveis fósseis nos últimos anos, elevaram a procura por fontes alternativas de energia, que ao mesmo tempo fossem limpas e sustentáveis. Dentre as principais fontes, pode-se destacar a energia solar fotovoltaica. Por ser uma fonte de energia limpa, renovável e com baixo índice de manutenção, a energia solar fotovoltaica vem ganhando destaque no mundo inteiro, e com isso os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) cresceu nas últimas décadas. Apesar dos benefícios oriundos dos SFCR, por ser uma tecnologia relativamente nova quando comparada com outras fontes de energia, a mesma ainda não está totalmente consolidada, e sua instalação requer cuidados no que diz respeito à qualidade de energia elétrica. Problemas como produção de harmônicos, sobretensão e baixo fator de potência são comuns a estes tipos de sistemas. Várias pesquisas são realizadas todos os anos, e normas e regulamentos são criados, a fim de conciliar a geração fotovoltaica com a rede elétrica de distribuição. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo identificar, medir e analisar o comportamento do SFCR de 3 kWp da UFERSA, na cidade de Mossoró-RN, a fim de se verificar os possíveis impactos à qualidade da energia elétrica associados aos SFCR's. Nesta pesquisa percebeu-se que todos os parâmetros estão dentro das normas vigentes, porém os altos índices de taxa de distorção harmônica fizeram necessário a elaboração de um filtro passa-baixa para atenuar as frequências indesejadas. Com a simulação do filtro no Simulink, constatou-se uma atenuação de até mais de 60%, melhorando assim a qualidade da energia gerada pelo sistema.

Palavras-Chave: Energia solar fotovoltaica. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Problemas associados aos SFCR. Qualidade de energia elétrica. Filtro passa-baixa.

ABSTRACT

Environmental problems, like global warming and pollution, together with the rising fossil fuels prices in recent years have increased search for alternative energy sources, that are clean and sustainable at the same time. Among the main sources, it is possible to highlight the photovoltaic solar energy. For being a source of clean renewable energy with a low maintenance rate, photovoltaic solar energy has been gaining attention worldwide, and with this the Grid-Connected Photovoltaic System (GCPV) has grown in the last decades. Despite the benefits from the GCPV, for being a relatively new technology when compared with other energy sources, the same is not yet fully consolidated, and its installation requires care in regard to quality of electrical power. Problems such as production of harmonics, overvoltage and low power factor are common to these types of systems. Several researches are conducted every year and regulations are created, in order to reconcile the photovoltaic generation with the power distribution network. Therefore, the present work aims to identify, measure and analyze the behavior of GCPV of 3 kWp of UFERSA, in the city of Mossoró-RN, in order to verify the possible impacts to the quality of the electric energy associated with GCPV. In this research it was noticed that all the parameters are within the current standard regulations, however the high indexes of harmonic distortion rate made necessary the elaboration of a low-pass filter to attenuate the unwanted frequencies. With the simulation of the filter in Simulink, an attenuation of up to more than 60% was verified, thus improving the quality of the energy generated by the system.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Grid-Connected Photovoltaic System. Problems associated with GCPV. Quality of electrical energy. Low pass filter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada acumulada de energia fotovoltaica no mundo.	15
Figura 2 – Desenvolvimento do mercado fotovoltaico chinês e previsão futura.....	21
Figura 3 – Desenvolvimento da capacidade instalada dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede na Alemanha.....	24
Figura 4 – Desenvolvimento da potência fotovoltaica instalada anual nos EUA.....	25
Figura 5 – Potência Instalada por região.....	28
Figura 6 – Desenvolvimento da potência fotovoltaica instalada e acumulada no Brasil	28
Figura 7 – Configuração de um SFCR.....	29
Figura 8 – Estrutura de bandas de energia para (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes.....	30
Figura 9 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.....	31
Figura 10 – Célula fotovoltaica de (a) silício monocristalino e (b) silício policristalino.....	31
Figura 11 – Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo fotovoltaico com potência nominal de 100Wp.....	32
Figura 12 – Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva I-V. Módulo de 36 células de silício cristalino a 25 °C.....	33
Figura 13 – Efeito da temperatura sobre um modulo de 36 células de silício cristalino com irradiância de 1000 W/m ²	34
Figura 14 – Usina Desert Sunlight Solar Farm.....	35
Figura 15 – Topaz Solar Farm.....	36
Figura 16 – California Valley Solar Ranch.....	37
Figura 17 – Usina Solar MPX Tauá.....	38
Figura 18 – Usina Fotovoltaica Nova Aurora.....	39
Figura 19 – Distorção da forma de onda fundamental.....	46
Figura 20 – Fluxograma da metodologia.....	52
Figura 21 – (a) Módulos fotovoltaicos da Yingli Solar de 245Wp e (b) inversor Sunny Boy de 3kW.....	55
Figura 22 – Medidor bidirecional instalado na subestação da UFERSA.....	55
Figura 23 – Analisador de energia instalado na saída do inversor.....	56
Figura 24 – Analisador de energia instalado no Quadro de distribuição do CITED.....	57
Figura 25 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal.....	58
Figura 26 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica real.....	59

Figura 27 – Filtro passivo passa-baixa RC.....	63
Figura 28 – Resposta de um filtro passivo passa-baixa RC.....	66
Figura 29 – Tensão fase-neutro para o mês de Agosto de 2015.....	69
Figura 30 – Tensão neutro-terra para o mês Agosto de 2015.....	70
Figura 31 – Frequência para o mês de Agosto de 2015.....	70
Figura 32 – Corrente para o mês de Agosto de 2015.....	71
Figura 33 – Potência ativa para o mês de Agosto de 2015.	71
Figura 34 – Energia ativa para o mês de Agosto de 2015.	72
Figura 35 – Fator de potência indutivo ativa para o mês de Agosto de 2015.....	73
Figura 36 – Taxa de distorção harmônica de tensão para o mês de Agosto de 2015.....	73
Figura 37 – Taxa de distorção harmônica de corrente para o mês de Agosto de 2015.....	74
Figura 38 – Valores para a tensão fase-neutro nos meses de Março a Maio.....	76
Figura 39 – Valores para a tensão neutro-terra nos meses de Março a Maio.....	76
Figura 40 – Valores para a frequência nos meses de Março a Maio.....	77
Figura 41 – Valores para corrente elétrica nos meses de Março a Maio.....	77
Figura 42 – Valores para potência ativa nos meses de Março a Maio.....	78
Figura 43 – Valores para energia ativa nos meses de Março a Maio.....	78
Figura 44 – Valores para o fator de potência indutivo nos meses de Março a Maio.....	79
Figura 45 – Valores para a taxa de distorção harmônica de tensão nos meses de Março a Maio.....	79
Figura 46 – Valores para a taxa de distorção harmônica de corrente nos meses de Março a Maio.	80
Figura 47 – Valores de tensão fase-neutro (a), tensão neutro-terra (b), frequência (c), corrente (d), potência ativa (e) e fator de potência (f), 08/08/2015.....	81
Figura 48 – Taxa de distorção harmônica para tensão (a) e corrente para corrente (b), 08/08/2015.....	82
Figura 49 – Curva para o filtro passa-baixa projetado.	83
Figura 50 – Filtro passa-baixa RC com sinal de entrada de 60 Hz (a), 180 Hz (b), 300 Hz (c) e 420 Hz (d).....	85
Figura 51 – Sinal de entrada e saída para 60 Hz.....	86
Figura 52 – Sinal de entrada e saída para 180 Hz.....	86
Figura 53 – Sinal de entrada e saída para 300 Hz.....	87
Figura 54 – Sinal de entrada e saída para 420 Hz.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os 10 países com maior instalação em potência total instalada em 2016.....	20
Tabela 2 – Produção Anual de Módulos fotovoltaicos na China.....	22
Tabela 3 – Potência instalada por região no Brasil.....	27
Tabela 4 – Faixa de valores aceitáveis para o fator de potência.....	40
Tabela 5 – Valores de referência para a Flutuação de tensão.....	41
Tabela 6 – Radiação global diária.....	53
Tabela 7 – Insolação diária.....	54
Tabela 8 – Média mensal dos parâmetros de geração do SFCR de Agosto à Dezembro de 2015.....	68
Tabela 9 – Desvio padrão dos parâmetros de geração do SFCR de Agosto à Dezembro de 2015.....	68
Tabela 10 – Média mensal dos parâmetros de geração do SFCR de Março a Maio de 2016.....	75
Tabela 11 – Desvio padrão dos parâmetros de geração do SFCR de Março a Maio de 2016.....	75
Tabela 12 – Valores médios de tensão para a as harmônicas analisadas.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BLM	Federal Bureau of Land Management
BMWi	Ministério da Economia e Tecnologia da Alemanha
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CITED	Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido
COSERN	Companhia Energética do Rio Grande do Norte
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
EPA	Agência de Proteção Ambiental
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
IEA	International Energy Agency
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GW	Gigawatt
LNEG	Laboratório nacional de engenharia e geologia
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MW	Megawatt
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
NUPEP	Núcleo de Pesquisas em Eletrônica de Potência
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional
PWM	Pulse Width Modulation ou Modulação de Largura de Pulso
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SCR	Silicon Controlled Rectifier
TRIAC	Triode for Alternating Current
Wp	Watt pico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	19
2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica no Mundo	19
2.1.1.1 China.....	21
2.1.1.2 Japão	22
2.1.1.3 Alemanha.....	23
2.1.1.4 Estados Unidos	25
2.1.1.5 Itália	26
2.1.2 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	27
2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	29
2.2.1 Componentes de um SFCR	29
2.2.1.1 Células Fotovoltaicas.....	30
2.2.1.2 Módulos Fotovoltaicos	32
2.2.1.3 Inversores	34
2.2.2 Sistemas Fotovoltaicos no Mundo	35
2.2.2.1 Desert Sunlight Solar Farm	35
2.2.2.2 Topaz Solar Farm	36
2.2.2.3 California Valley Solar Ranch.....	36
2.2.3 Sistemas Fotovoltaicos no Brasil	37

2.2.3.1 Usina Solar MPX Tauá.....	37
2.2.3.2 Usina Fotovoltaica Nova Aurora.....	38
2.3 QUALIDADE DE ENERGIA.....	39
2.4 NORMATIZAÇÃO PARA SFCR.....	42
2.5 IMPACTOS ASSOCIADOS AOS SFCR.....	43
2.5.1 Principais Problemas.....	44
2.5.1.1 Sobretensão.....	44
2.5.1.2 Potência Reativa.....	44
2.5.1.3 Fator de Potência.....	45
2.5.1.4 Harmônicos.....	45
2.5.1.5 <i>Flicker</i>	46
2.5.2 Outros Casos Estudados.....	47
2.5.2.1 Expansão dos Sistemas Fotovoltaicos na Espanha.....	47
2.5.2.2 Sistema Fotovoltaico do LNGE em Lisboa.....	49
2.5.2.3 Projeto Parintins.....	49
2.5.2.4 Sistema Fotovoltaico da PGM Suporte em Tecnologia LTDA.....	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	52
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	53
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SFCR DA UFERSA.....	54
3.4 MEDIÇÕES DOS DADOS DE GERAÇÃO DO SFCR.....	56
3.5 MEDIÇÕES DOS DADOS DA REDE ELÉTRICA.....	57
3.6 MODELAGEM DE UM SFCR.....	57
3.7 FILTRO PASSIVO PASSA-BAIXA RC.....	63
3.7.1 Ganho e Fase.....	64
3.7.2 Frequência de Corte.....	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67

4.1 ANÁLISE DA GERAÇÃO DO SFCR	67
4.1.1. Tensão fase-neutro.....	69
4.1.2. Tensão neutro-terra.....	69
4.1.3. Frequência.....	70
4.1.4. Corrente elétrica, potência ativa e energia ativa	71
4.1.5. Fator de potência	72
4.1.6. Taxa de distorção harmônica de tensão	73
4.1.7. Taxa de distorção harmônica de corrente.....	74
4.2 ANÁLISE DO IMPACTO DO SFCR SOBRE A REDE ELÉTRICA	74
4.3 ANÁLISE DAS TAXAS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	80
4.3.1. Análise da geração diária.....	81
4.4 PROJETO DE UM FILTRO PASSA BAIXA RC.....	83
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	89

1. INTRODUÇÃO

A energia solar vem ganhando destaque no cenário mundial, principalmente por ser uma fonte de energia renovável e abundante. Segundo o CRESESB (2014) a energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras e considerada inesgotável na escala de tempo terrestre. Dentre as formas de aproveitamento da energia solar está a conversão desta em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico no caso, a energia solar fotovoltaica. Segundo RONEY (2013), em 2012 o maior produtor mundial de painéis fotovoltaicos era a China, atingindo 60% da produção mundial. Este fato foi possível graças aos incentivos fiscais e subsídios advindos do governo, o que possibilitou que a China ultrapassasse os Estados Unidos e o Japão, até então pioneiros na indústria solar.

Segundo EPIA (2016), em 2012 foi atingida a marca de 100 GW de capacidade instalada acumulada mundial de sistemas fotovoltaicos, e em 2013 esse valor chegou à aproximadamente 140 GW, capacidade esta que pode gerar até 160 TWh por ano de eletricidade. Em 2015 a capacidade total instalada mundial fechou em 229,3 GW. A Figura 1 apresenta a evolução da capacidade instalada acumulada anual, do ano 2000 à 2015.

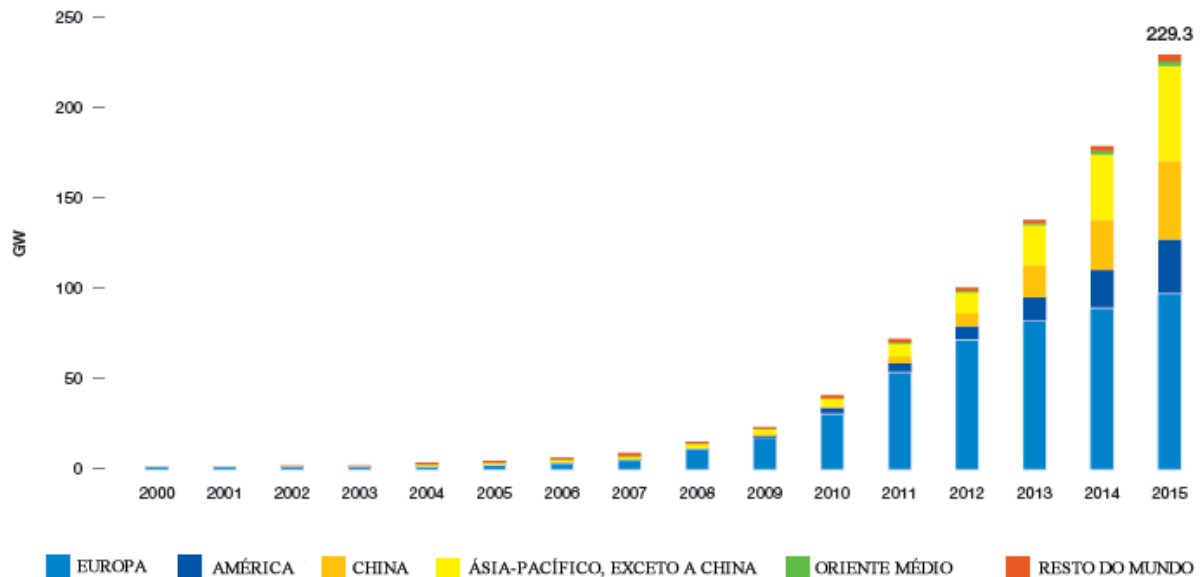


Figura 1 – Evolução da capacidade instalada acumulada de energia fotovoltaica no mundo.

Fonte: Adaptado de EPIA (2016)

Segundo a ANEEL (2017) a capacidade de geração do Brasil é de 162,48 GW. Porém, atualmente, a geração fotovoltaica compreende 50 empreendimentos, os quais possuem capacidade de geração de 148,23 MW de energia elétrica, representando valores inferiores a menos de 1% da potência total instalada. Há a previsão de futuramente serem construídos mais 107 empreendimentos, que correspondem a um total de 2,86 GW que será adicionada à potência atualmente instalada.

Diante deste cenário observa-se que a difusão dos SFCR seria maior se não fossem os custos financeiros relacionados à sua construção e instalação. Porém, um novo cenário vem sendo remodelado, e a energia solar fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, principalmente devido à redução de seus custos e elevação dos custos de outros tipos de fontes, tudo isso também diretamente associados à questão ambiental. (CRESESB, 2014)

Por ser uma tecnologia relativamente nova no Brasil existem poucos estudos sobre os impactos na qualidade de energia elétrica. Há vários aspectos que se devem analisar ao se instalar um SFCR para que se mantenha a qualidade de energia elétrica. Problemas como fator de potência, harmônicos e sobretensão são recorrentes desses tipos de sistemas. Assim o presente trabalho visa realizar a análise e estudo de um SFCR instalado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), na cidade de Mossoró-RN. Foram coletados dados para a análise dos parâmetros da rede, a fim de avaliar a qualidade da energia elétrica gerada e então, correções para os problemas detectados na fase de análise foram propostas e discutidas, de maneira a manter a qualidade de energia elétrica dentro dos padrões preestabelecidos pelo Procedimentos de Distribuição (PRODIST) e da COSERN.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede da UFERSA, de 3 kWp de potência instalada, a fim de se verificar e propor correções aos possíveis problemas causados à qualidade da energia elétrica.

1.1.2 Objetivos Específicos

De forma a alcançar os objetivos gerais, foram estabelecidos cinco objetivos específicos, sendo eles:

- Identificar os principais componentes do SFCR da UFERSA;
- Medir os principais parâmetros da energia elétrica produzida pelo SFCR;
- Medir os principais parâmetros da rede elétrica com e sem a influência do SFCR;
- Identificar, analisar e propor correções para possíveis problemas verificados;
- Modelar e simular um filtro passivo passa-baixa RC, para minimizar os impactos causadas pelas harmônicas geradas pelo SFCR.

1.2 JUSTIFICATIVA

Como mencionado na Seção 1, a energia solar fotovoltaica é considerada uma das alternativas energéticas mais promissoras, e a cada ano vem crescendo de forma exponencial, seja a nível mundial ou nacional. Apesar desse crescimento, as normas e regulamentações que regem a instalação de SFCR no Brasil surgiram somente em 2012, como a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL que posteriormente foi atualizada para a Resolução Normativa 687/2015. Assim se faz necessário a realização de estudos para ao identificar, tentar minimizar os impactos causados pelos SFCR's à rede convencional, ou seja, ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e manter a qualidade da energia elétrica. Portanto, como motivação para a realização deste trabalho pode-se citar, primeiramente, o local e clima propício para o estudo dessa tecnologia, pois o SFCR analisado está localizado na região nordeste do país, mais especificamente no clima semiárido, e finalmente a verificação de problemas na qualidade da energia gerada e possíveis formas de correções.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa está estruturada em cinco capítulos. O presente capítulo traz uma breve introdução sobre a energia solar fotovoltaica e sua evolução nos últimos anos. Os objetivos gerais e específicos também são traçados e a justificativa para a realização desta pesquisa é comentada.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura utilizada como base para o desenvolvimento desta pesquisa. Este capítulo mostra o desenvolvimento da energia solar no cenário mundial, bem como as características e funcionamento de SFCR. É discutido, também, a importância da qualidade de energia, a normatização que permite o funcionamento adequados dos SFCR's, e os impactos associados a estes sistemas.

O Capítulo 3 aborda os materiais e métodos utilizados para a realização das medições do SFCR, de forma a observar a qualidade da energia elétrica gerada e seus impactos, e também a modelagem de um filtro passa-baixa RC.

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados e discussões sobre os parâmetros elétricos medidos, os impactos sobre a rede elétrica do prédio do CITED na UFERSA, uma análise das taxas de distorções harmônicas e o projeto de um filtro passa-baixa RC para a correção dos altos índices das taxas de distorções harmônicas observados.

O Capítulo 5, por sua vez, apresenta as conclusões sobre esta pesquisa e as recomendações para os trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O Presente capítulo apresenta a evolução e a situação atual da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo, destacando os cinco países com maior capacidade instalada. O mesmo também destaca os principais componentes de um SFCR e os impactos causados à qualidade da energia elétrica. Por fim, outros casos já estudados são apresentados, confirmando a importância de se estudar e analisar os impactos sobre a qualidade da energia elétrica.

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar é uma energia limpa e renovável, sendo o seu aproveitamento uma das alternativas energéticas mais promissoras, seja na forma de luz ou de calor. Segundo o CRESESB (2014) pode-se dizer que quase todas as outras fontes de energia se derivam do Sol, como por exemplo, a energia eólica, hidráulica, biomassa e os combustíveis fósseis.

A energia solar fotovoltaica é gerada pelo efeito fotovoltaico, que converte de forma direta a luz do Sol em eletricidade. Este efeito ocorre nas células fotovoltaicas, que são dispositivos construídos de material semicondutor, geralmente o Silício. (CRESESB, 2014)

2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica no Mundo

Em 2016, o mercado solar fotovoltaico quebrou vários recordes e continuou sua expansão pelo mundo, caracterizando um crescimento de 50% o que totalizou pelo menos 75 GW. Após um desenvolvimento limitado em 2014, e um crescimento de 25% em 2015, o mercado continuou a crescer, com muitas regiões do mundo contribuindo para o desenvolvimento. (IEA-PVPS, 2017)

Dentre os países que mais cresceram pode-se destacar o mercado chinês que atingiu cerca de 15,2 GW em 2015 e 34,45 GW em 2016. Nas Américas, o mercado dos EUA dobrou de 7,3 GW para 14,7 GW em 2016. No Japão, o rápido crescimento do mercado fotovoltaico que ocorreu até 2015 finalmente foi interrompido e o país atingiu cerca de 8,6 GW. (IEA-PVPS, 2017)

O Canadá teve queda e fechou em 200 MW de potência instalada. O Chile cresceu significativamente (746 MW) e se tornou o 10º país com maior potência instalada em 2016. O México, por sua vez, tem progredido nos últimos anos e deve se tornar um mercado maciço nos

próximos anos, o mesmo teve em 2016 uma potência instalada de cerca de 100 MW. Ainda se espera que outros mercados latino-americanos cresçam e se desenvolvam nos próximos anos, especialmente o Brasil.

Na Europa, depois de anos de queda no mercado solar fotovoltaico, houve um crescimento em 2015, porém o mercado recuou novamente, principalmente devido à desaceleração no mercado do Reino Unido. Apesar dessa desaceleração, o Reino Unido estabeleceu-se em primeiro lugar na Europa pelo terceiro ano consecutivo, possuindo uma potência instalada em 2016 de cerca de 2 GW. A Alemanha manteve-se estável e fechou 2016 com uma potência instalada de 1,5 GW. A França teve uma queda nos números de instalação e ficou abaixo de 0,6 GW, enquanto o mercado italiano manteve-se em um nível bastante baixo, cerca de 373 MW. (IEA-PVPS, 2017)

No continente africano, a África do Sul tornou-se o primeiro país africano a instalar cerca de 1 GW de potência fotovoltaica em 2014. Em 2016, cresceu novamente com cerca de 500 MW instalados. A Argélia instalou cerca de 50 MW em 2015, mas já iniciou projetos para 4 GW. Muitos países anunciaram projetos, com o Egito liderando com 5 GW, mas até agora, a maioria das instalações foi adiada ou simplesmente ainda está na fase de avaliação do projeto. (IEA-PVPS, 2017)

A Tabela 1 apresenta os 10 países com maior capacidade instalada em 2016 e os 10 países com maior capacidade instalada acumulada.

Tabela 1 – Os 10 países com maior instalação em potência total instalada em 2016

Posição	Capacidade instalada em 2014		Capacidade instalada acumulada	
1º	China	34,5 GW	China	78,1 GW
2º	EUA	14,7 GW	Japão	42,8 GW
3º	Japão	8,6 GW	Alemanha	41,2 GW
4º	Índia	4,0 GW	EUA	40,3 GW
5º	Reino Unido	2,0 GW	Itália	19,3 GW
6º	Alemanha	1,5 GW	Reino Unido	11,6 GW
7º	Coreia	0,9 GW	Índia	9,0 GW
8º	Austrália	0,8 GW	França	7,1 GW
9º	Filipinas	0,8 GW	Austrália	5,9 GW
10º	Chile	0,7 GW	Espanha	5,5 GW

Fonte: Adaptada de IEA-PVPS (2017)

Nas seções 2.1.1.1 a 2.1.1.5 serão abordados os cinco países com a maior capacidade instalada acumulada mundial. Mesmo que estes países não sejam os que mais possuíram

capacidade instalada em 2016, eles são os que mais investiram e instalaram sistemas fotovoltaicos no mundo, o que demonstra maturidade e desenvolvimento nesta área.

2.1.1.1 China

De acordo com o IEA-PVPS (2015-a), no final de 2014, a China juntamente com os EUA, lançou o U.S.-China Joint Announcement on Climate Change (Anúncio Conjunto EUA-China sobre as Alterações Climáticas), uma declaração que anuncia metas para reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Dentre suas metas estão:

- Em 2020, o consumo total de energia oriunda de fontes de energia não fóssil chegará a 15%;
- Até o ano de 2030, esse valor atingirá 20%;
- As emissões de CO₂ vão atingir o pico no máximo até 2030, e então começarão a cair.

Assim, a energia solar fotovoltaica contribuirá de forma significativa nos próximos anos, a fim de atingir as metas estabelecidas por ambos os países. Na China, em 2014, foi instalado um total de 10,64 GW de potência fotovoltaica, sendo 10,60 GW correspondente à conexão à rede e 40 MW correspondentes à sistemas isolados.

A Figura 2, apresenta o desenvolvimento da potência instalada anual na China do ano de 2010 até 2014 e uma previsão futura até 2020. Pode-se perceber o rápido crescimento do mercado chinês, tendo mais que triplicado sua potência instalada anual de 2012 para 2013. Em 2014 manteve-se quase constante fechando o ano com 10,6 GW. Observa-se também uma previsão futura do mercado fotovoltaico chinês. A meta à curto prazo é atingir 38 GW de potência instalada acumulada em 2015, e atingir a meta de 100 GW até 2020.

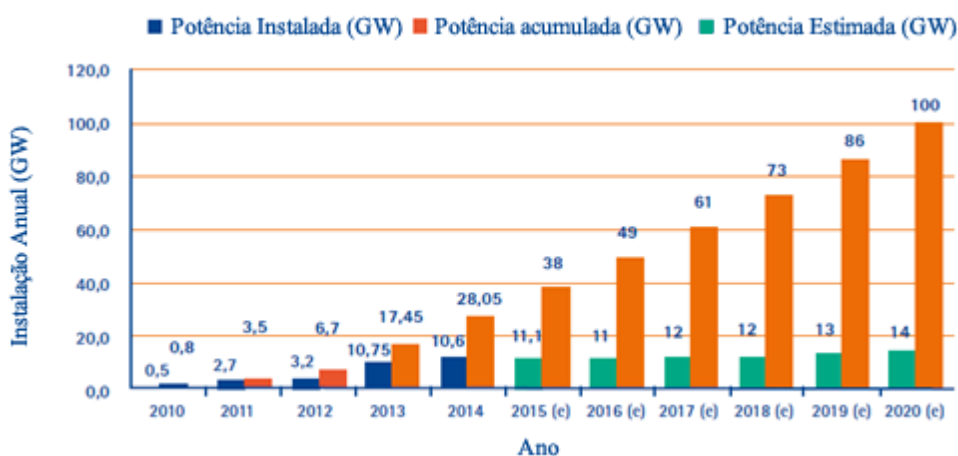


Figura 2 – Desenvolvimento do mercado fotovoltaico chinês e previsão futura.

Fonte: Adaptado de IEA-PVPS (2015-a)

A nível industrial, a China se tornou o maior produtor de módulos fotovoltaicos no mundo em 2007, e até hoje mantém esse posto. Em 2014 a China produziu cerca de 132.000 toneladas de silício policristalino, participando de 43% da produção mundial. Mesmo produzindo essa grande quantidade de silício policristalino, a China ainda precisa importar cerca de 100.000 toneladas de outros países. (IEA-PVPS, 2015)

A Tabela 2, apresenta a evolução da produção de módulos fotovoltaicos na China.

Tabela 2 – Produção Anual de Módulos fotovoltaicos na China

YEAR	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
PV Production (MW)	1340	2714	4990	12437	22798	25214	25610	35000
Dem. PV Market (MW)	20	40	160	500	2700	3560	10680	10640
Share of Export (%)	98,51	98,53	96,79	95,98	88,16	85,88	58,30	69,60

Fonte: IEA-PVPS (2015-a)

2.1.1.2 Japão

Em outubro de 2013, foi formulado o Plano Básico de Energia do Japão, este é o guia para a política energética do país. Em abril de 2014 foi aprovado pelo conselho de ministros o Quarto Plano Básico de Energia, que abrange a terceira revisão do plano original, levando em conta a demanda e o fornecimento de energia a longo prazo. No Quarto Plano Básico de Energia, o termo “energia de base” é utilizado para descrever as fontes de energia que podem gerar energia de forma estável, com baixo custo e no período de 24 horas por dia, dentre as quais está presente a energia nuclear. A energia solar fotovoltaica e a eólica estão incluídas como “fontes de energia de baixo carbono produzidas no Japão. O plano estima um período de três anos (2018 a 2020) para que o país se concentre na reforma da estrutura energética, e define a direção de várias medidas que devem ser tomadas. (IEA-PVPS, 2015)

O Quarto Plano Básico de Energia, como tem o objetivo de promover a utilização de energias renováveis nos sistemas de energia distribuídos, apoia esforços na geração de energia solar fotovoltaica a nível comunitário, pois a instalação de sistemas fotovoltaicos em pequena e média escala é fácil e não possui muita carga sobre a rede. (IEA-PVPS, 2015-b)

Os fabricantes japoneses de células e módulo fotovoltaicos, têm visto seus negócios crescendo de maneira rápida, principalmente devido ao crescimento do mercado fotovoltaico doméstico. Apesar da capacidade de produção fotovoltaica japonesa ser limitada, acordos de fornecimento com os fabricantes chineses e outros países estão aumentando a importação para

o mercado japonês. Ao mesmo tempo, as empresas e fabricantes têm realizado esforços para aumentar sua capacidade de produção e desempenho de seus produtos, como a Panasonic e Sharp que anunciaram células fotovoltaicas com eficiência de 25%. (IEA-PVPS, 2015)

De acordo com o IEA-PVPS (2015-a) os preços, continuamente decrescentes dos módulos fotovoltaicos, têm exercido pressão sobre a indústria de componentes e fabricação de equipamento para a redução de seus preços. Na indústria de inversores fotovoltaicos, a procura interna tem crescido significativamente. Com o aumento da competição os fabricantes iniciaram o desenvolvimento de tecnologias com o propósito de alcançar, cada vez mais, uma maior eficiência de conversão.

Devido aos incentivos governamentais, a redução dos preços e o aumento da competitividade, o Japão conseguiu alcançar o segundo lugar mundial em potência instalada anual atingindo 9,7 GW, tornando-se assim, o terceiro país com maior potência acumulada instalada, totalizando 23,3 GW no ano de 2014.

2.1.1.3 Alemanha

A Alemanha tem como objetivo a transformação do seu sistema de energia, e para isso busca uma fonte de energia viável, confiável e de caráter econômico ambiental. Aliado a isso, foi decidido no ano de 2011 que seria encerrada a produção de energia nuclear no país até 2022. Recentemente uma agenda de energia foi definida pelo Ministério da Economia e Tecnologia da Alemanha (BMWi), a qual compreende 10 projetos chave para alcançar seu objetivo da transição de energia. (IEA-PVPS, 2015)

Segundo o Renewable Energy Sources Act (EEG 2014) os objetivos serão alcançados através do uso eficiente de energia e da utilização de energias renováveis. No futuro as energias renováveis contribuirão com a maior parte na matriz energética do país, e a previsão é que o consumo bruto de eletricidade através desse tipo fontes seja de 40% a 45% em 2025, de 55% a 60% em 2035 e alcance pelo menos 80% em 2050.

A energia solar fotovoltaica torna-se, então, uma importante parte desse desenvolvimento, impulsionada pelas energias renováveis e pela diminuição dos preços do sistema. Há também a forte preocupação com as mudanças climáticas e a proteção do ambiente.

A Figura 3 mostra o desenvolvimento da capacidade instalada dos sistemas fotovoltaicos na Alemanha até o ano de 2014. Pode-se perceber o rápido crescimento a partir do ano de 2009, atingindo seu pico no ano de 2012 onde alcançou a marca de 7,6 GW de

potência instalada anual. A partir de 2013 a capacidade instalada anual deve um declínio, atingindo 1,9 GW no ano de 2014. Embora essa grande queda na capacidade instalada anual, a Alemanha possui capacidade instalada acumulada de 38,2 GW, sendo o país com maior potência solar fotovoltaica do mundo.

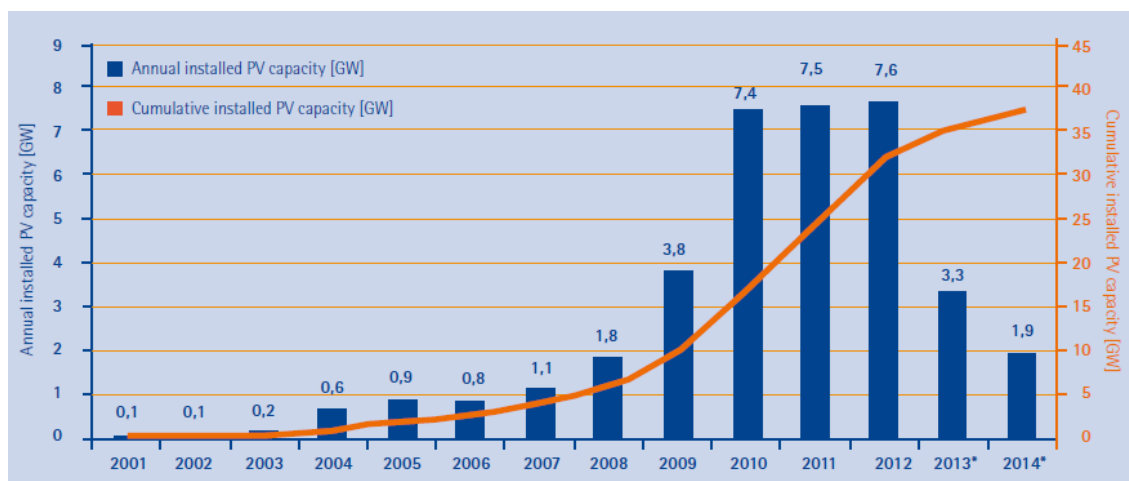


Figura 3 – Desenvolvimento da capacidade instalada dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede na Alemanha.

Fonte: IEA-PVPS (2015-a)

Segundo o IEA-PVPS (2015-a) os sistemas fotovoltaicos na Alemanha contribuíram com 35,2 TWh, o que corresponde à 6% da geração bruta de energia anual, um aumento de 14% em comparação ao ano anterior.

Quanto ao programa nacional da Alemanha, o Renewable Energy Sources Act (EEG 2014) é o principal responsável por impulsionar o setor fotovoltaico alemão, determinando as normas técnicas para conexão à rede e garantindo o sistema de compensação de energia.

Em 1º de Agosto de 2014 foram realizadas alterações adicionais ao EEG, devido ao rápido aumento dos sistemas fotovoltaicos e da geração eólica, dentre essas alterações pode-se destacar o fato de que novas instalações fotovoltaicas, que possuem capacidade maior que 500 kWp, são obrigadas a comercializar a energia elétrica gerada, sendo também às de 100 kWp também obrigadas a partir de 2016.

Segundo o IEA-PVPS (2015-a), durante os últimos anos a produção de equipamentos e a indústria fotovoltaica alemã se tornou a mais experiente em todo mundo, embora devido à crise econômica mundial tenha feito os fabricantes da indústria fotovoltaica, assim como os fornecedores de equipamentos, enfrentarem uma situação difícil. Fato este que pode ser observado com o declínio na capacidade instalada anual.

2.1.1.4 Estados Unidos

Os Estados Unidos (EUA) possuem incentivos financeiros tanto por parte nacional quanto estadual para desenvolvimento do mercado fotovoltaico. Em 2014, a Agência de Proteção Ambiental (EPA), agência esta responsável por regular as emissões de carbono de usinas de energia, propôs regras para a redução das emissões de carbono em 30%, comparado com o ano de 2005, para os anos de 2020 a 2030. As regras propostas pela EPA, não estão finalizadas, e mesmo que não contenha metas específicas para adoção da energia solar, caso sejam implementadas, estas regras poderiam incentivar a adoção de sistemas fotovoltaicos em diversas áreas dos EUA. Mesmo que não haja uma política nacional unificada, as políticas de nível nacional e estadual tem permitido o crescimento dos sistemas fotovoltaicos. (IEA-PVPS, 2015)

A Figura 4 apresenta o desenvolvimento da potência fotovoltaica instalada anual nos EUA. Percebe-se que o seu maior crescimento se deu a partir de 2010, tendo mais que dobrado sua potência com relação ao ano anterior. A partir daí a potência só tem crescido, atingindo em 2014, 6,2 GW de potência instalada anual, um crescimento de 1,4 GW se comparado com 2013, o que totaliza 18,3 GW de potência instalada acumulada.

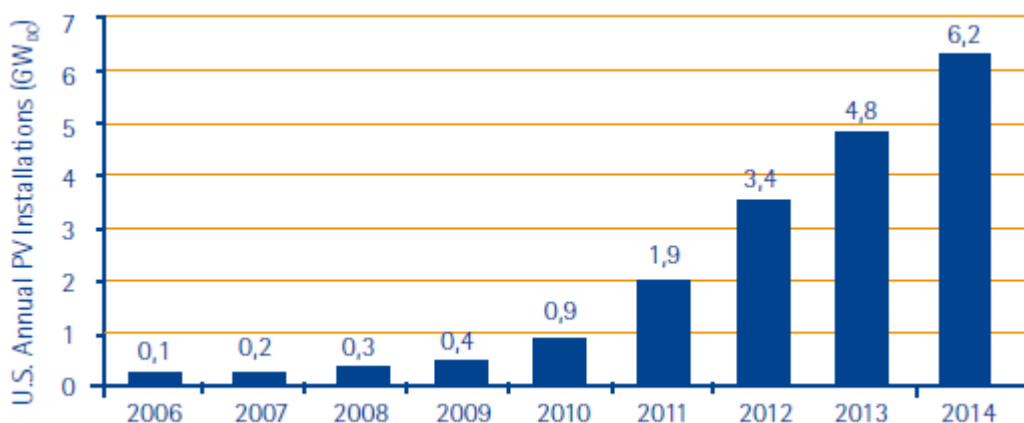


Figura 4 – Desenvolvimento da potência fotovoltaica instalada anual nos EUA.

Fonte: IEA-PVPS (2015-a)

Segundo o IEA-PVPS (2015-a) o mercado fotovoltaico americano possui potencial para expansão, pois várias políticas e financiamentos, que incluem programas de empréstimo a baixos custos, estão surgindo.

A capacidade fotovoltaica dos EUA está concentrada em um pequeno número de estados, a exemplo do Arizona, Califórnia e Nova Jersey, que juntos representam dois terços do mercado americano. Porém este cenário vem mudando lentamente, em 2014, 25 estados possuíam cerca 50 MW de capacidade fotovoltaica e 15 possuíam capacidade maior que 50 MW. Alguns dos programas de incentivo nos EUA se venceram ou foram reduzidos, mas mesmo assim há muitos projetos em construção atualmente. Uma parcela significativa de sistemas fotovoltaicos foi instalada recentemente, sem quaisquer incentivos estaduais, isto devido à redução dos preços dos sistemas fotovoltaicos, a disponibilidade de novos produtos e financiamento com menores custos. (IEA-PVPS, 2015)

2.1.1.5 Itália

O *Conto Energia* é o programa de incentivo da Itália para energias renováveis, e possui um sistema de compensação de energia elétrica. O ano de 2014 foi o primeiro ano após a conclusão deste programa, e no qual ocorreu uma importante revisão do mesmo. Segundo o IEA-PVPS (2015-a) a situação da Itália, no que diz respeito à regulamentação para instalação de sistemas fotovoltaicos, alcançou uma condição estável.

No ano de 2014, foi instalado cerca de 385 MW na Itália, sendo 85 MW realizadas no âmbito do programa “Conto Energia”. Embora esses resultados estejam abaixo do valor esperado, a Itália possui um mercado maduro em relação à tecnologia fotovoltaica, e no final de 2014 possuía 18,45 GW de potência instalada acumulada.

De acordo com o IEA-PVPS (2015-a) a Itália possui uma produção de eletricidade fotovoltaica de 23,3 GWh, correspondente a mais de 7,5% do consumo total de eletricidade do país, que é de 309 TWh. Em 2014, devido a redução do consumo de eletricidade, os SFCR atingiram 12% da demanda nacional de energia elétrica e, para algumas horas do meio-dia do mês de junho de 2014, a potência fornecida pelos SFCR atingiu o valor da carga elétrica nacional.

De acordo ainda com o IEA-PVPS (2015-a) o desenvolvimento do mercado fotovoltaico na Itália, possui grandes perspectivas para o futuro, pois o mesmo continua a crescer e não possui nenhum custo para as finanças públicas, isto se dá pelos seguintes pontos:

- A Itália possui regras estáveis para venda ou troca de eletricidade;
- Possui um processo de licenciamento simplificado para instalações fotovoltaicas;

- Grande foco no auto-consumo de energia produzida através de armazenamento de energia;
- Acesso mais fácil ao crédito.

Quando ao mercado fotovoltaico italiano, em 2014 houve uma queda drástica na produção de células fotovoltaicas devido à parada na produção de importantes operadores nacionais. Mesmo com essa queda a capacidade de produção tem se mantido estável em relação ao ano anterior, graças as empresas 3Sun e Enel Green Power que mantiveram seu funcionamento. É estimada uma capacidade de produção total de cerca de 800 MW em módulos solares. Na área de fabricação de inversores para sistemas conectados e não conectados à rede, a capacidade de produção em 2014 foi de 7 GW. (IEA-PVPS, 2015)

2.1.2 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

Segundo a ANEEL (2017) a capacidade de geração do Brasil é de 143,58 MW. A geração fotovoltaica compreende 50 empreendimentos, e representam apenas 0,09% da potência total instalada. Futuramente está previsto a construção de mais 107 empreendimentos, somando um total de 2,86 GW à potência atualmente instalada.

Dividindo as usinas por região, pode-se observar na Tabela 33 que a região brasileira que mais possui potência solar fotovoltaica instalada é a região Nordeste, mostrando o grande potencial que essa região possui, seguida pela região Sul e Sudeste. As regiões Centro-Oeste e Norte apresentam baixa potência instalada, o que caracteriza uma participação ínfima se comparada as outras regiões brasileiras.

Tabela 3 – Potência instalada por região no Brasil

Região	Potência Instalada (MW)
Centro-Oeste	0,90
Nordeste	135,00
Norte	0,20
Sudeste	3,75
Sul	4,07
Total	143,58

Fonte: Autoria própria.

O Figura 5 apresenta os dados da distribuição da potência instalada por região da Tabela 3.

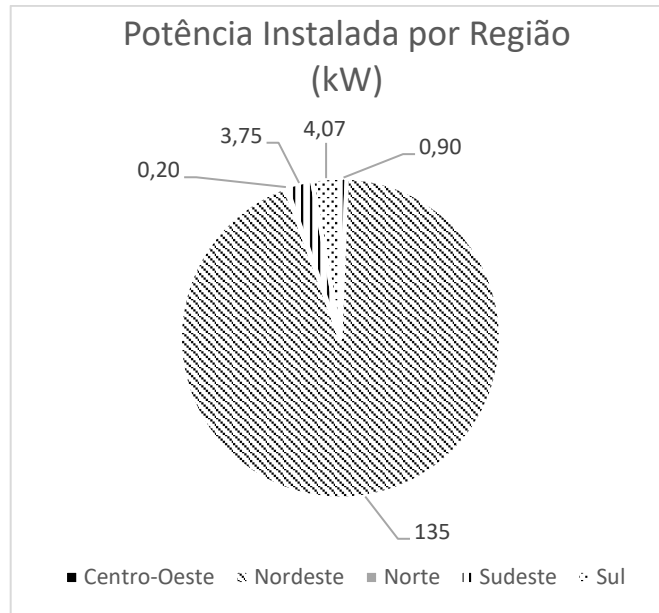


Figura 5 – Potência Instalada por região.

Fonte: Autoria própria.

Segundo a EPE (2015) a energia solar fotovoltaica só começou a ser contabilizada do ano de 2010, tendo uma capacidade instalada de 1 MW. No ano de 2011 esse valor manteve-se constante, sendo que em 2012 esse valor dobrou, atingindo 2 MW. Em 2013 a potência solar fotovoltaica alcançou 5 MW, triplicando no ano seguinte. O Figura 6 reúne os dados da EPE (2015) e ANEEL (2017) sobre a potência fotovoltaica instalada no Brasil até o ano de 2015.



Figura 6 – Desenvolvimento da potência fotovoltaica instalada e acumulada no Brasil

Autor: Autoria própria.

2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos são sistemas voltados para a geração de energia elétrica através da luz do Sol. Podem ser conectados ou não à rede elétrica.

Os Sistemas Fovoltavicos Conectados à Rede (SFCR) injetam energia elétrica diretamente na rede elétrica, que é transportada para ser consumida pelas unidades consumidoras, dessa forma os SFCR dispensam o uso de acumuladores, que são utilizados apenas em sistemas isolados. Os SFCR são basicamente de um único tipo, são sistemas em que a geração fotovoltaica representa uma fonte de energia complementar ao sistema elétrico ao qual está interligado. (CRESESB 2014)

Esta seção apresenta os principais componentes de um SFCR e os principais sistemas fotovoltaicos no Brasil e no mundo.

2.2.1 Componentes de um SFCR

Segundo o CRESESB (2014) um sistema fotovoltaico é constituído por basicamente dois blocos, sendo eles:

- **Um bloco gerador:** consiste dos módulos fotovoltaicos, bem como o cabeamento elétrico que os interliga e a estrutura de suporte;
- **Um bloco de condicionamento de potência:** consiste dos conversores, inversores, controladores de carga, dispositivos de proteção, supervisão e controle;

Segundo BLASQUES (2012), uma possível configuração de um SFCR pode ser observada na Figura 7.

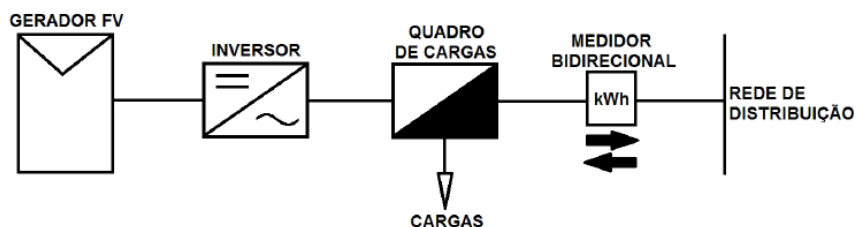


Figura 7 – Configuração de um SFCR.

Fonte: Blasques (2012, p. 2)

2.2.1.1 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são as unidades básicas de um sistema fotovoltaico. São elas que convertem a energia luminosa do Sol em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

As células fotovoltaicas são fabricadas com materiais semicondutores, cuja principal característica é possuir uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e sua banda de condução não possuir elétrons, sendo assim vazia na temperatura de 0 K. (CRESESB, 2014)

Segundo o CRESESB (2014) entre as duas bandas de energia dos materiais semicondutores há uma banda denominada banda proibida ou gap, que pode atingir até 3 eV (elétron-volt). A diferença entre os materiais semicondutores e os isolantes, é que os isolantes possuem um gap maior que 3 eV. A Figura 8 apresenta a estrutura das bandas de energia para os 3 tipos de materiais.

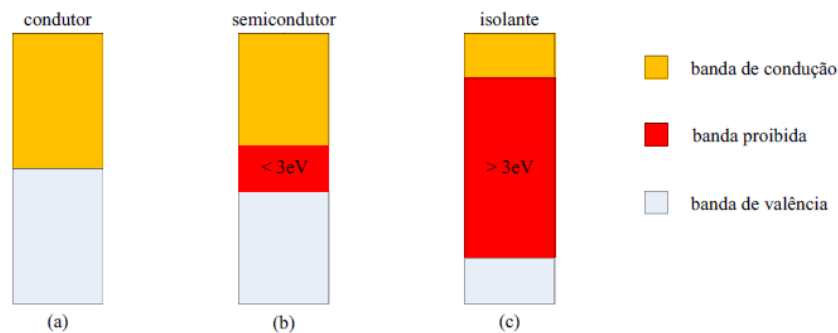


Figura 8 – Estrutura de bandas de energia para (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes.

Fonte: CRESESB (2014)

Ao atingir a superfície do semicondutor, a luz do Sol transfere energia para os elétrons da banda de valência, que atravessam o *gap* e vão para a banda de condução, produzindo assim uma corrente elétrica. Quando o elétron passa para a banda de condução, o mesmo deixa uma lacuna, que será preenchida por outro elétron. Uma forma de aumentar a corrente elétrica é adicionar elementos químicos que possuam 3 ou 5 elétrons em sua camada de valência. A esse processo dá-se o nome de dopagem. (VIEIRA, 2014)

Se o semicondutor for dopado com um elemento pentavalente, haverá um elétron fracamente ligado ao átomo do semicondutor, de forma que o material ficará carregado negativamente, sendo chamado de semicondutor tipo N. Se o semicondutor for dopado com um elemento trivalente, haverá uma lacuna na ligação dos átomos do semicondutor, de forma que o material ficará carregado positivamente, sendo chamado de semicondutor tipo P. (VIEIRA, 2014)

A união de um semicondutor tipo N com um tipo P formam uma célula fotovoltaica que irá gerar um fluxo de corrente quando houver incidência de luz sobre ela, como mostra a Figura 9.

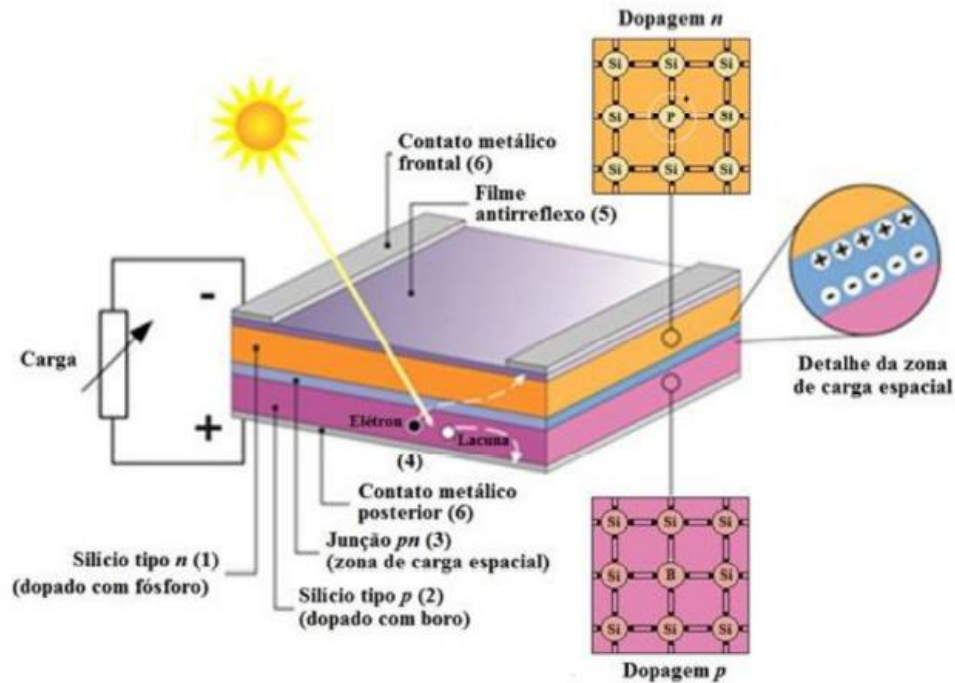


Figura 9 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

Fonte: CRESESB (2014)

Os principais semicondutores utilizados em células fotovoltaicas são o silício e o germânio, sendo o silício mais largamente usando. Os tipos de células mais comuns são as de silício monocristalino e silício policristalino, como apresentado na Figura 10.

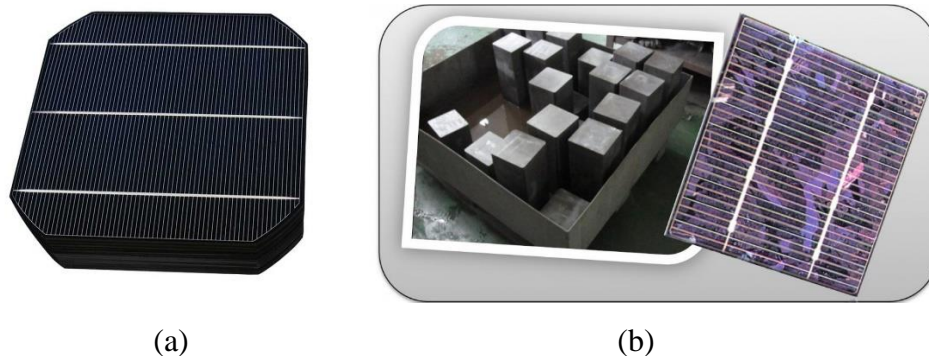


Figura 10 – Célula fotovoltaica de (a) silício monocristalino e (b) silício policristalino.

Fonte: Blue Sol (2012)

2.2.1.2 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são o conjunto de células fotovoltaicas conectadas em arranjos de forma a produzir tensão e corrente e para a proteção das células.

A Tensão produzida por uma única célula de silício gira em torno de 0,5 V a 0,8 V, logo para que se obtenham tensões adequadas para uso em grande escala é necessária sua ligação em série, que resultará numa tensão resultante cujo valor será a soma das tensões individuais de cada célula. Quanto a proteção mecânica, as células são muito frágeis e necessitam de um encapsulamento que possa protege-las contra as intempéries. (CRESESB, 2014)

Segundo o CRESESB (2014) as células são conectadas em série e/ou paralelo, dependendo da tensão e corrente desejadas. As tensões mais usuais são de 12V em corrente contínua, para um conjunto de 36 células em série, 24V e 48V, sendo estas últimas obtidas através da associação em série dos módulos de 12V. Há ainda outros módulos com tensões nominal de 30V e 120V

Em SFCR ou para sistemas de bombeamento de água, os níveis de tensão de saída são muito variáveis e, muitas vezes, necessitam da associação de vários módulos em série, o que torna comum encontrar módulos com tensões nominais diversificadas. (CRESESB, 2014)

Segundo o CRESESB (2014) um módulo fotovoltaico é identificado por sua potência elétrica de pico (Wp), sendo esta definida nas condições padrões de ensaio, considerando uma irradiância solar de 1000 W/m² e temperatura ambiente de 25 °C. As características elétricas dos módulos são determinadas pela curva característica I-V e a curva de potência P-V como mostra a Figura 11.

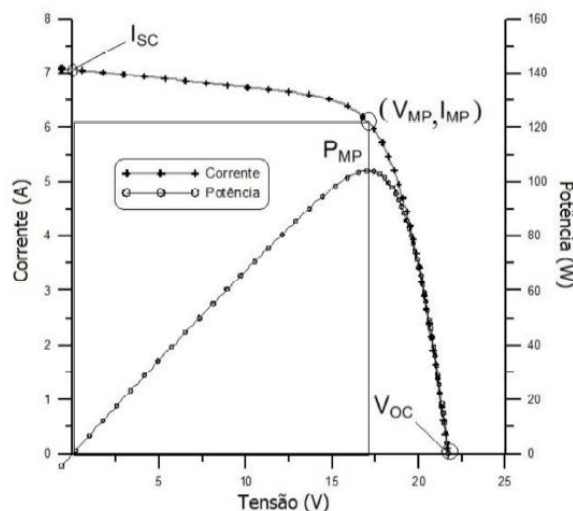


Figura 11 – Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo fotovoltaico com potência nominal de 100Wp.

Fonte: CRESESB (2014)

Onde:

- Potência máxima de pico (P_{mp})
- Tensão máxima de pico (V_{mp})
- Corrente máxima de pico (I_{mp})
- Corrente de curto circuito (I_{sc})
- Tensão de circuito aberto (V_{oc})

Segundo o CRESESB (2014) os módulos fotovoltaicos assim como as células fotovoltaicas, têm seu desempenho influenciado pela irradiância solar e pela temperatura das células. A corrente elétrica produzida por um módulo fotovoltaico é diretamente proporcional ao aumento da irradiância solar, de forma que a corrente aumenta com o aumento da irradiância. A Figura 12 apresenta o efeito causado pela variação da irradiância solar.

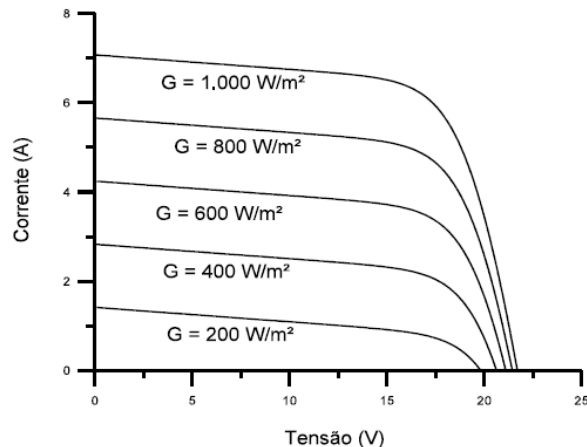


Figura 12 – Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva I-V. Módulo de 36 células de silício cristalino a 25 °C.

Fonte: CRESESB (2014)

A irradiância solar e a temperatura ambiente influenciam na temperatura das células presentes no módulo, assim para diferentes temperaturas tem-se diferentes curvas I-V. Com o aumento da temperatura percebe-se a queda da tensão do módulo. Vale salientar que a corrente tem um leve aumento, porém este efeito não compensa a perda causada pela queda da tensão, como mostra a Figura 13. (CRESESB, 2014)

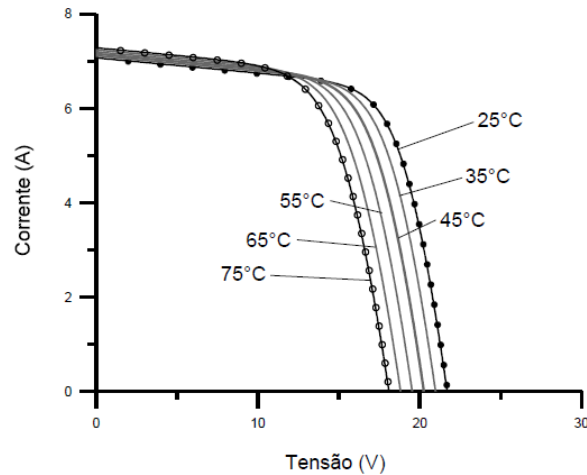


Figura 13 – Efeito da temperatura sobre um módulo de 36 células de silício cristalino com irradiância de 1000 W/m².

Fonte: CRESESB (2014)

2.2.1.3 Inversores

O inversor é um dispositivo eletrônico que transforma a corrente contínua CC de entrada em corrente alternada CA de saída. Nos SFCR a tensão de saída proveniente do inversor deve ser sincronizada com a tensão rede ao qual o mesmo está ligado. Os inversores para SFCR com potências até 5kW tem saída monofásica, e acima desta são geralmente trifásicos ou conjuntos de três inversores monofásicos associados. (CRESESB, 2014)

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, os inversores foram cada vez mais evoluindo e melhorando seu rendimento. Com a redução dos custos de fabricação associado a este fato, atualmente é possível construir inversores com 99% de eficiência. (CRESESB, 2014)

Segundo CRESESB (2014) existem dois tipos de inversores quanto ao seu princípio de operação, são os inversores comutados pela rede (comutação natural) e autocomutados (comutação forçada).

Em SFCR são utilizados os inversores comutados pela rede. Os primeiros inversores utilizavam tiristores como os SCR e TRIAC para chaveamento, os quais são capazes de suportar altas tensões e correntes. Embora robustos, possuem uma baixa qualidade de tensão e corrente de saída, gerando harmônicos na rede, portanto com o surgimento dos transistores MOSFET e IGBT, os tiristores foram perdendo espaço e sua aplicação passaram a ser unidades com potência acima de 100kW e acionadores de motores de grande porte. (CRESESB, 2014)

2.2.2 Sistemas Fotovoltaicos no Mundo

Os sistemas fotovoltaicos estão a cada dia mais ganhando espaço e se expandindo em todo mundo. Atualmente há grandes empreendimentos que geram, por si só, em torno de 500MW de energia elétrica.

2.2.2.1 Desert Sunlight Solar Farm

O Desert Sunlight Solar Farm, é uma usina de co-propriedade da NextEra Energy Resources. Um empreendimento constituído de 8 milhões de módulos fotovoltaicos com capacidade total de 550 MW, localizado em Riverside na Califórnia, e é administrado pelo Federal Bureau of Land Management (BLM). A mesma pode fornecer energia à cerca de 160.000 casas na Califórnia, e reduz em cerca de 300.000 toneladas de dióxido de carbono por ano. A construção do projeto deu-se em setembro de 2011 e iniciou sua operação comercial em 2013. (NEXTERA ENERGY RESOURCES, 2016)

Podem-se citar como principais benefícios:

- Quinze funcionários em tempo integral;
- Aumento da receita de imposto sobre vendas;
- Energia segura, limpa e renovável;
- Não usa recursos hídricos para gerar eletricidade;
- Evita cerca de 300.000 toneladas de dióxido de carbono por ano, que teriam sido gerados na produção de eletricidade utilizando combustíveis fósseis.

A Figura 14 apresenta a usina Desert Sunlight Solar Farm.



Figura 14 – Usina Desert Sunlight Solar Farm.

Fonte: Smart Solar (2015)

2.2.2.2 Topaz Solar Farm

A Topaz Solar Farm está localizada em San Luis Obispo na Califórnia, EUA. Sua localização foi escolhida após várias análises até que fosse encontrado um local onde o recurso solar disponível seria adequado. A Topaz Solar Farm conta com 9 milhões de módulos fotovoltaicos, com capacidade de 550 megawatt. Esta usina produz eletricidade suficiente para abastecer 160.000 casas, e seus benefícios econômicos são estimados em U\$\$ 417 milhões, incluindo propriedade e impostos sobre vendas, empregos diretos e indiretos e etc. Anualmente são reduzidas 377 mil toneladas de dióxido de carbono que teriam sido gerados na produção de eletricidade utilizando combustíveis fósseis. A Figura 15 apresenta a usina Topaz Solar Farm. (FIRST SOLAR, 2016)



Figura 15 – Topaz Solar Farm.

Fonte: Smart Solar (2015)

2.2.2.3 California Valley Solar Ranch

Está localizada em San Luis Obispo na Califórnia, EUA, e pertence à NRG Energy e a NRG Yield. Sua operação comercial iniciou-se em outubro de 2013, totalizando uma capacidade instalada de 250 MW e abastece 100.000 residências. (SUNPOWER, 2016)

Dentre os principais benefícios pode-se citar:

- Foram criados 700 postos de trabalho durante o pico de construção entre os anos de 2011 à 2013;
- Protege e preserva mais de 12.000 acres de terra;
- Diminui a produção de até 336.000 toneladas métricas de gases de efeito estufa;

- Gera energia livre de emissões de cerca de 100.000 casas, o equivalente a quase todas as casas em San Luis Obispo.

A Figura 16 apresenta a vista aérea da Califórnia Valley Solar Ranch.



Figura 16 – Califórnia Valley Solar Ranch.

Fonte: SunPower (2016)

2.2.3 Sistemas Fotovoltaicos no Brasil

O Brasil a pouco mais de 10 anos deu início a instalação de sistemas fotovoltaicos no país, a primeira grande usina foi a Usina Solar MPX Tauá. Após sua instalação novas usinas vêm sendo instaladas a cada ano, como a Usina de Nova Aurora, dentre outras de pequeno porte.

2.2.3.1 Usina Solar MPX Tauá

A Usina Solar MPX Tauá é uma empresa pertencente a empresa de energia do grupo EBX, pertencente ao empresário Eike Batista. A Usina Solar Tauá foi a primeira usina solar de geração de energia elétrica do Brasil.

A Usina Solar Tauá entrou em funcionamento no dia 1 de junho de 2011. A mesma está localizada na cidade de Tauá no estado do Ceará. Inicialmente a usina possuía capacidade instalada de 1MW e posteriormente sua ampliação atingiria 2MW, 5MW e 50MW, respectivamente ao longo dos anos.

Segundo MPX (2011) na fase de 1MW, o fator de capacidade esperado era de 17%. Pode-se destacar alguns pontos:

- Quanto aos painéis utilizados possuíam:
 - Potência: 215Wp;
 - Tensão: 26,6V;
 - Eficiência: 14,5%;
 - Quantidade: 4.680.
- Quanto aos inversores:
 - Potência nominal: 100kW;
 - Tensão de saída: 220V trifásico;
 - Temperatura de funcionamento: -10°C até +65°C
 - Eficiência: > 95%
 - Quantidade: 9

Segundo dados da ANEEL (2017), a potência outorgada é de 5MW, porém sua capacidade fiscalizada se mantém em 1MW, o que demonstra que as obras de expansão não foram aplicadas até o momento.

A Figura 17 apresenta a Usina Solar MPX Tauá.



Figura 17 – Usina Solar MPX Tauá.
Fonte: MPX (2011)

2.2.3.2 Usina Fotovoltaica Nova Aurora

A Usina Fotovoltaica Nova Aurora, também conhecida como Cidade Azul, está localizada na cidade de Tubarão em Santa Catarina e é a maior usina fotovoltaica em operação no Brasil. A mesma é de propriedade da Tractebel Energia, possui uma área total de 10 hectares

e um conjunto de 19.424 módulos fotovoltaicos totalizando uma capacidade instalada de 3MWp. Esta usina está conectada à rede de 13,8 kV da Celesc e pode abastecer cerca de 2,5 mil residências. (TRACTEBEL ENERGIA, 2014)

A Figura 18 apresenta a usina Nova Aurora.



Figura 18 – Usina Fotovoltaica Nova Aurora.

Fonte: Portal Solar (2016)

A Usina Fotovoltaica Nova Aurora foi concebida para fins de pesquisa, desenvolvimento e capacitação técnica. A mesma foi construída próximo ao complexo termelétrico Jorge Lacerda, local estratégico pois recupera a área onde eram depósitos de cinzas oriundas da queima de carvão mineral. Foram cerca de nove meses desde o início até a finalização de sua construção.

Analisar o crescimento e aumento da participação dos sistemas fotovoltaicos no mundo mostra que esta tecnologia tem se tornado cada vez mais promissora. Assim, mesmo sistemas de baixa potência como é o caso do SFCR da UFERSA, com 3 kWp de capacidade instalada, merece atenção, pois a partir desses sistemas podem-se realizar estudos que servirão para evitar problemas futuros em usinas de energia solar de maior porte.

2.3 QUALIDADE DE ENERGIA

A Qualidade de Energia elétrica é um fator importante quando se fala de sistemas elétricos. Deve-se manter uma boa qualidade de energia elétrica para que o sistema funcione adequadamente. Se não forem mantidos os valores para os parâmetros elétricos descritos em

normas e resoluções, o sistema elétrico tende a falhar, podendo em certos casos ocasionar a interrupção do mesmo.

A Qualidade de Energia é regulamentada pelo PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional), mais especificamente o Módulo 8.

O principal objetivo é estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, bem como caracterizar os fenômenos, parâmetros e valores de referência para a tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda da tensão. (ANEEL, 2010-a)

Segundo a ANEEL (2010-a), os aspectos que devem ser considerados na qualidade da energia elétrica são:

- **Tensão em regime permanente:** estabelece os limites para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição e registro e os prazos para regularização. O PRODIST determina que a tensão contratada nos pontos de conexão com a tensão nominal deve ser de no mínimo 95% e no máximo 105%;
- **Fator de potência:** O PRODIST determina que as medições dos valores reativos deverão ser feitas por instrumentos eletrônicos de medição adequados, de amostragem digital e aprovados por órgão responsável. Para consumidores atendidos a uma tensão igual ou inferior à 230 kV, o fator de potência deve estar entre 0,92 e 1,00, seja indutivo ou capacitivo. Para unidades produtoras de energia o fator de potência deve seguir a faixa de valor estabelecidos nos procedimentos de Rede. Assim a COSERN (2013) estabelece os valores dados na Tabela 4.

Tabela 4 – Faixa de valores aceitáveis para o fator de potência

Potência nominal do sistema de microgeração (kW)	Faixa
$P \leq 3$	0,98 indutivo a 0,98 capacitivo
$3 < P \leq 6$	0,95 indutivo a 0,95 capacitivo
$P > 6$	0,90 indutivo a 0,90 capacitivo

Fonte: COSERN (2013)

- **Harmônicos:** O PRODIST define as distorções harmônicas como fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. As formas de onda das distorções harmônicas

monitoradas devem permitir o processamento por meio de recurso computacional. Em sistemas trifásicos, as medições devem ser feitas através das tensões fase-neutro para configuração estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações. Para fins de cálculo, devem ser considerados até no mínimo a 25ª harmônica. Em sistemas com tensão nominal menor que 1kV, a taxa máxima de distorção harmônica é de 10%, já para tensões entre 1kV e 13,8kV esse valor é de 8%. Segundo a COSERN (2013), o limite máximo para a taxa total harmônicos de corrente, no seu sistema de distribuição, é de 5%.

- **Desequilíbrio de tensão:** é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. O PRODIST estabelece um valor igual ou inferior a 2% do valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão;
- **Flutuação de tensão:** é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. Também conhecido como *Flicker*, e tem o objetivo de determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição referente à flutuação de tensão. Para analisar o nível de flutuação de tensão, deve-se calcular o PstD95% (Valor diário do indicador Severidade de Curta Duração, Pst, que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 24 hrs) e o PltS95% (Valor semanal do indicador Severidade de Longa Duração, Plt, que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos). Os Valores referência são descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de referência para a Flutuação de tensão

Valor de Referência	PstD95%	PltS95%
Adequado	< 1 p.u. / FT	< 0,8 p.u. / FT
Precário	1 p.u. – 2 p.u. / FT	0.8 – 1.6 p.u. / FT
Crítico	> 2 p.u. / FT	> 1,6 p.u. / FT

Fonte: ANEEL (2010-a)

Onde FT é o Fator de Transferência;

- **Variação de frequência:** os sistemas de distribuição e geração, devem operar dentro dos limites de frequência que vão de 59,9 Hz e 60,1 Hz, em condições normais e em regime permanente. Caso os sistemas de geração conectados à rede saiam da faixa de

frequência de 59,5 Hz a 60,5 Hz, os mesmos devem garantir o retorno da frequência a esta faixa no período máximo de 30 segundos. Se houver necessidade de interrupção da geração ou de carga, a frequência não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz; pode permanecer no máximo acima de 62 Hz durante 30 segundos e acima de 63,5 Hz durante 10 segundos; pode permanecer no máximo abaixo de 58,8 Hz por 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por 5 segundos.

2.4 NORMATIZAÇÃO PARA SFCR

Para a conexão à rede de qualquer tipo de geração, há normas e regulamentos que devem ser seguidos para manter o funcionamento adequado da rede elétrica. Para os sistemas fotovoltaicos não é diferente. Essas normas são definidas pela ANEEL, a nível nacional, e pela COSERN a nível estadual referente ao Rio Grande do Norte. A ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 482/2012 para normatizar a conexão de pequenas centrais geradoras na rede de distribuição.

A Resolução Normativa nº 482/2012 define micro e minigeração distribuída. De modo geral, a micro e minigeração distribuída consistem em sistemas conectados à rede que produzem energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras, podendo ser hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada. (ANEEL, 2012)

A ANEEL (2012) diferencia micro e minigeração distribuída, sendo a primeira referente à central geradora de energia elétrica com potência instalada menor que 100 kW, e a segunda com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual à 1 MW.

A ANEEL (2012) ainda regulamenta o sistema de compensação de energia elétrica. Esse sistema, no qual a energia ativa produzida por uma microgeração distribuída é injetada na rede elétrica, será posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa para a mesma unidade consumidora ou de outra unidade, desde que as mesmas estejam cadastradas sobre o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ).

A nível de faturamento, o consumo de energia elétrica ativa será a diferença entre a energia consumida e a injetada na rede. Quando houver excedente no mês de faturamento, este excedente será faturado como créditos que serão faturados nos meses subsequentes. Os créditos terão validade de 36 meses após sua data de faturamento, e a fatura deverá conter a informação do saldo de energia ativa e, se for o caso, o total de créditos que irão expirar. (ANEEL, 2012)

Quanto a medição, é de responsabilidade do interessado, os custos para a adequação do sistema de medição para implantar o sistema de compensação de energia elétrica. (ANEEL, 2012)

No que se refere as responsabilidades por dano ao sistema elétrico, a Resolução Normativa nº 414/2010, determina que se os danos ao sistema elétrico forem oriundos de micro e minigeração distribuída, devido negligência das normas e padrões de distribuição local, a unidade consumidora não poderá utilizar os créditos de energia gerados no respectivo período para compensação de energia elétrica. (ANEEL, 2010-b)

Durante a realização desta pesquisa houve passou a vigorar a Resolução Normativa nº 687/2015 da ANEEL, e que veio para alterar a Resolução Normativa nº 482/2012. As alterações realizadas foram:

- Será considerada microgeração distribuída a instalação de geradores com potência de até 75 kW. Minigeração distribuída passa a ser caracterizada pelos geradores com potência superior a 75 kW e 3 MW, para fontes hídricas, e 5 MW para cogeração qualificada e demais fontes renováveis de energia elétrica;
- O prazo máximo para compensação de créditos passou a ser de 60 meses;
- Pela nova norma pode-se realizar geração distribuída em condomínios, onde os créditos gerados podem ser compensados nas múltiplas unidades.
- A realocação de créditos não está mais limitada ao mesmo CPF/CNPJ. A 687/2015 permite que diferentes consumidores possam se unir em consórcio ou cooperativa, instalar uma mini ou microgeração distribuída e os créditos compensados para todos os consumidores.

A COSERN segue os mesmos regulamentos presentes na Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, conforme apresentado em COSERN (2013).

2.5 IMPACTOS ASSOCIADOS AOS SFCR

Os sistemas fotovoltaicos, quando conectados à rede, podem causar impactos na qualidade da energia elétrica. Podem gerar tensões mais elevadas ou mais baixas que a nominal, alterar o fator de potência, gerar harmônicos. Esta seção tem por objetivos apresentar os principais problemas associados aos SFCR, além disso apresentar alguns casos já estudados onde foram identificados problemas na qualidade da energia elétrica devido os SFCR.

2.5.1 Principais Problemas

No geral, há cinco principais problemas associados aos SFCR, são eles: sobretensão, potência reativa, fator de potência, harmônicos e Flicker. Estes problemas devem ser resolvidos ou amenizados quando se pretende instalar um SFCR, pois a negligência dos mesmos pode acarretar a parada do sistema elétrico bem como acidentes.

2.5.1.1 Sobretensão

A corrente elétrica flui do ponto de maior tensão para o ponto de menor tensão. Ao longo do percurso, as cargas consumidoras conectadas a rede causam a queda da tensão. Assim a tensão diminui em relação a distância do ponto de medição. Porém, a tensão deve ser mantida dentro de um intervalo determinado, para que os aparelhos e as máquinas possam funcionar corretamente. Assim as concessionárias tomam medidas para que a tensão seja mantida nesse intervalo. (IEA-PVPS, 2015-b)

Quando há excedente na produção de energia elétrica em um SFCR, este excesso irá fluir para a rede invertendo a direção do fluxo da corrente e elevando a tensão. Na malha urbana, com a alta impedância de rede e o pequeno número de SFCR, este problema ainda não é tão significativo, mas para malhas rurais com baixa impedância, à medida que são instalados mais SFCR a tensão tende a exceder o limite predeterminado, caracterizando então a sobretensão. (IEA-PVPS, 2015-b)

2.5.1.2 Potência Reativa

A Potência Reativa é a energia que circula entre os campos elétricos e magnéticos sem que haja a produção de trabalho.

Segundo Mamede Filho (2010) a energia reativa se divide em duas parcelas: a energia reativa indutiva e a energia reativa capacitiva. A energia reativa indutiva é gerada por aparelhos constituídos de bobinas como, por exemplo, motores, reatores e transformadores. A energia reativa capacitiva, por sua vez, é gerada por motores síncronos e capacitores.

Na maior parte das instalações elétricas há a predominância da energia reativa indutiva, devido principalmente a motores de indução e reatores presentes nas cargas. O excesso de energia reativa indutiva na rede elétrica traz consigo alguns problemas, como as perdas de energia elétrica e a quedas de tensão.

Com o aumento da energia reativa, a corrente elétrica também aumenta, e consequentemente as perdas aumentam, pois são proporcionais ao quadrado da corrente total, provocando assim o aquecimento dos condutores e equipamentos. Logo, esse aumento da corrente provoca a queda da tensão, esse efeito é maior quanto mais solicitada a rede é, e pode ocasionar a interrupção do fornecimento de energia elétrica. (CODI, 2004)

2.5.1.3 Fator de Potência

O Fator de Potência é a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa.

Em um sistema com cargas puramente indutivas as formas de onda da tensão e da corrente estão em fase, porém ao se adicionar cargas reativas haverá uma diferença de fase entre elas. Essa diferença de fase significa que a potência ativa é menor que a potência aparente. Essa defasagem também pode ser causada pelos harmônicos no sistema. (RAMPINELLI, 2010)

Os inversores dos sistemas fotovoltaicos possuem a capacidade de regular a defasagem entre a corrente alternada de saída com a tensão da rede, mantendo o fator de potência unitário ou próximo a ele. Quando a potência gerada está abaixo de 10% da capacidade nominal do sistema, os inversores podem operar com fator de potência menor que 1,0, devido principalmente aos componentes do próprio inversor como, por exemplo, filtros de saída e transformadores. (CARVALHO, 2012)

Segundo a ANEEL (2010-b), o valor limite para o fator de potência é de no mínimo 0,92 indutivo ou capacitivo, sendo multado o consumidor que não cumprir este valor mínimo.

2.5.1.4 Harmônicos

Os harmônicos de uma onda são componentes do sinal de frequência que são múltiplos inteiros da frequência fundamental. Alguns tipos de cargas ligadas à rede modificam a forma da onda CA para a forma de onda desejada e, nesse processo, geram harmônicos na rede que podem modificar a onda da rede. A Figura 19 apresenta a distorção da onda fundamental pelos harmônicos. (IEA-PVPS, 2015-b)

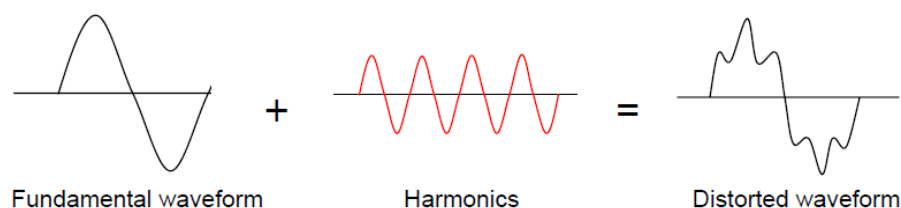


Figura 19 – Distorção da forma de onda fundamental.

Fonte: IEA-PVPS (2015-b)

Segundo o IEA-PVPS (2015-b), os inversores dos sistemas fotovoltaicos convertem a corrente contínua, dos painéis fotovoltaicos, para corrente alternada através de circuitos de comutação de forma que a onda CA na saída dos dispositivos não será perfeitamente senoidal. Os inversores mais modernos podem gerar pequenos harmônicos, porém inversores mais antigos ou de má qualidade podem gerar muitos harmônicos durante a conversão. Ao medir os harmônicos de um SFCR deve-se levar em conta os harmônicos gerados pela carga, pois há casos onde os harmônicos são gerados pela carga e não pelo sistema fotovoltaico.

Atualmente os sistemas fotovoltaicos estão sendo projetados para minimizar os harmônicos. Aplicando a modulação por largura de pulso (PWM), a tensão é controlada e assim altera-se o intervalo e a largura do pulso de modo que o valor médio da tensão torna-se igual ao da forma de onda fundamental desejada, prevenindo assim a maior parte dos harmônicos. (IEA-PVPS, 2015-b)

2.5.1.5 Flicker

A cintilação luminosa ou Flicker é a impressão visual das variações do fluxo luminoso nas lâmpadas, quando a rede elétrica sofre flutuações de tensão.

Segundo Cândido (2008) se essas flutuações ocorrerem em frequências e amplitudes determinadas, as lâmpadas irão piscar e podem ocorrer interferências em alguns dispositivos que sejam sensíveis a essas flutuações, como inversores de frequência e computadores industriais. As principais causas do flicker são equipamentos como fornos a arco, máquinas de solda, partida de motores e etc. As lâmpadas incandescentes são sensíveis aos flickers, de forma que nelas são possíveis ver mais facilmente a impressão visual.

2.5.2 Outros Casos Estudados

Ao se projetar e instalar um SFCR, deve-se seguir as normas bem como realizar um prévio estudo sobre os impactos gerados pelos SFCR, para que o sistema não cause danos, nem interfira no bom funcionamento da rede elétrica ao qual está instalado. Nesta seção serão abordados casos de estudo sobre os problemas associados aos impactos causados pelos SFCR.

2.5.2.1 Expansão dos Sistemas Fotovoltaicos na Espanha

Segundo Gonzales et al. (2014) a penetração de sistemas fotovoltaicos na rede de alguns países da Europa cresceu fortemente nos últimos anos, principalmente na Espanha. Esse crescimento se deu sem antes se determinar os impactos gerados na qualidade da energia elétrica, causando problemas como sobretensão em nós, fluxo de potência reverso, afundamentos de tensão, entre outros. Atualmente empresas de distribuição resolvem esses problemas assumindo novas exigências regulatórias para todos os produtores de energia fotovoltaica.

No trabalho realizado por Gonzales et al. (2014) foram analisados o nível de tensão, frequência, fator de potência, distorção harmônica, *flicker* e desbalanceamento de fases. Foi analisado os impactos, através das medições, e então proposto soluções para a melhoria dos sistemas.

- **Potência Ativa:** a potência nominal é alcançada em condições ideais de temperatura e irradiação solar. Observou-se que em dias nebulosos houve muitas flutuações de potência ativa e a produção de energia poderia diminuir em até 30%. Estas flutuações de potência poderiam ser diminuídas através do uso de dispositivos de armazenamento, como supercapacitores com capacidade suficiente para responder a mudanças bruscas de irradiação. Picos de potência ativa negativa, ou seja, energia ativa consumida, foram detectados nos inversores de muitas plantas. Tais picos são devido a medidas de impedância realizadas pelos inversores em horários programados antes dos mesmos se conectarem e após a desconexão da rede. Em alguns inversores esses processos podem se repetir durante uma hora. A solução é programar a ligação do inversor de acordo com a estação atual.
- **Potência Reativa:** há sistemas fotovoltaicos que consomem potência reativa e outros que fornecem potência reativa durante as horas de sol. Medias realizadas na subestação, nos alimentadores rurais, mostraram que a potência reativa demandada pelos clientes é

fornecida pelo sistema fotovoltaico, mas um decréscimo de potência reativa é observado na subestação. Então, os bancos de capacitores utilizados pelas empresas de distribuição deveriam ser reprogramados para ter em conta o apoio de sistemas fotovoltaicos.

- **Fator de Potência:** nos dias nublados, as flutuações geram baixos valores de fator de potência. Atualmente os inversores mais modernos permitem a regularização do fator de potência, no entanto os sistemas fotovoltaicos não são automatizados para atender a esse requisito. O valor do fator de potência na subestação depende do perfil de carga e da produção de energia fotovoltaica, com baixa carga o sistema fotovoltaico fornece potência ativa, reduzindo a demanda de potência ativa da rede e mantendo a mesma potência reativa, assim o valor de fator de potência diminui na subestação durante a operação do sistema fotovoltaico.
- **Harmônicos:** os sistemas fotovoltaicos têm um baixo impacto sobre a distorção harmônica das tensões. Observou-se que os harmônicos das tensões estão sempre dentro dos limites estabelecidos pelas normas europeias, abaixo de 8%. Os harmônicos de corrente medidos se devem as cargas não lineares e também a corrente injetada pelos inversores fotovoltaicos na rede. Altas taxas de distorções harmônicas para correntes ocorrem em situações onde há um baixo valor do componente fundamental da corrente, ou seja, quando o sistema fotovoltaico atinge sua potência nominal e o fluxo de energia inverso é produzido na subestação.
- **Desbalanceamento de fases:** foram encontrados em nível de baixa tensão devido às nuvens sobre os blocos de geração de diferentes fases, mas o problema não é tão comum para maiores potências porque há uma compensação na produção de corrente contínua CC entre as fases.
- **Flicker:** a norma europeia define que o *flicker* (cintilação) deve ter um valor igual ou menor do que 95% por unidade de tempo dentro de uma semana. As medições mostraram um valor de 1% para 66% do tempo. Portanto estando dentro dos padrões exigidos.
- **Sobretensão:** são identificados sobretensões em alguns nós de redes com a presença de sistemas fotovoltaicos. Em particular nas redes de distribuição rurais com alta impedância, a tensão aumenta quanto mais próximos à geração. Assim deve-se ajustar o inversor, no que se refere ao algoritmo rastreador de máxima potência para reduzir a potência de saída e manter as faixas de tensão admissíveis. A sobretensão medida do trabalho atingiu uma taxa de 14%.

2.5.2.2 Sistema Fotovoltaico do LNGE em Lisboa

Este estudo foi realizado por Nascimento (2013), o qual conduziu um ensaio para avaliar a qualidade de energia quanto a taxa de distorção harmônica. O sistema em estudo está localizado no Laboratório nacional de engenharia e geologia (LNEG) em Lisboa, possui 18 painéis de silício policristalino de 225Wp. Foi utilizado um analisador de qualidade de energia da FLUKE para analisar o comportamento dos harmônicos de tensão e corrente.

O valor da taxa de distorção harmônica de tensão de fase foi de 0,7%, e está dentro das normas estabelecidas. Já a taxa de distorção harmônica de tensão no neutro apresentou um valor de 63,1%.

O valor da taxa de distorção harmônica de corrente na fase foi 3,7%, e está dentro das normas estabelecidas. Já a taxa de distorção harmônica de corrente no neutro apresentou um valor de 36,9%.

2.5.2.3 Projeto Parintins

Realizado por Galdino, Visconti e Olivieri (2012) este projeto é conduzido pela Eletrobras, Amazonas Energia e Cepel. Seu objetivo é a implantação de uma smart grid e de SFCRs na cidade de Parintins no Amazonas. Para a análise do sistema foi utilizado o programa Interplan que calcula e fornece dados sobre o fluxo de potência, nível de tensão, desequilíbrio de fases e perdas. Segundo Galdino, Visconti e Olivieri (2012) a simulação visa avaliar as condições da rede levando em conta o pior caso, que ocorre quando se tem uma geração máxima para o SFCR e carga elétrica leve.

Um levantamento sobre os transformadores da rede foi realizado, a partir daí conclui-se que para a simulação deveria ser escolhido um transformador de 45 kVA, uma vez que este é bastante comum para a rede em análise.

Foram realizados um total de três simulações. Na primeira simulação foram inseridos na rede conjuntos de 3 SFCRs, um entre cada 2 fases ligados em Δ , com potência nominal de 3 kWp. Foram escolhidos cinco barramentos com o perfil de tensão mais baixo, em torno de 0,94 p.u. em regime permanente. A medida que são inseridos os SFCRs (0, 3, 6, 9, 12 e 15 SFCRs) as tensões dos barramentos aumentam mas ficam dentro da faixa adequada de operação, apresentando maior tensão no período da tarde, devido a maior irradiação solar.

Segundo Galdino, Visconti e Olivieri (2012) antes de inserir os SFCRs, o desequilíbrio entre fases é considerado desprezível, não sendo significativo mesmo depois de inserir 15 SFCRs. O desequilíbrio reduz a medida que os SFCRs suprem a carga e voltam a aumentar quando o mesmo começa a exportar excedente de energia para a rede. O mesmo efeito foi observado com relação a corrente.

Na segunda simulação, manteve-se os 15 SFCRs e foram inseridos mais 15 SFCRs. Nessa simulação, os barramentos escolhidos possuíam um perfil de tensão próximo de 1,0 p.u. em regime permanente e ao ser inserido os SFCRs, observou-se que as tensões em todos os barramentos ultrapassaram o limite operacional de 1,1 p.u. Quanto as perdas da rede secundária do transformador, observou-se uma perda de 7 kVA.

A terceira simulação teve como objetivo esclarecer se ao instalar os SFCRs em barramentos mais próximos ao transformador as perdas iriam diminuir. Assim, os SFCRs foram reposicionados para barramentos mais próximos e observou-se que as perdas diminuía consideravelmente. Deve-se ressaltar que foram observadas, nos barramentos de final de rede, tensões de 1,2 p.u., de forma que só podem ser instalados um número inferior à 6 SFCRs.

2.5.2.4 Sistema Fotovoltaico da PGM Suporte em Tecnologia LTDA.

Este estudo foi realizado por Melo (2014) no sistema fotovoltaico de 6,58 kWp instalado na PGM Suporte em Tecnologia LTDA em parceria com a ECONOVA Sistemas de Energia LTDA e o Núcleo de Pesquisas em Eletrônica de Potência (NUPEP) da Universidade Federal de Uberlândia.

Foi montado o sistema de medição para aquisição dos dados referentes às distorções harmônicas no ponto de conexão com a rede elétrica. As medições foram realizadas em duas etapas, utilizando dois medidores distintos, sendo um analisador de qualidade de energia e um osciloscópio.

Através do osciloscópio foram observados harmônicos de tensão e corrente no barramento CA do inversor, com taxa de 2,16% e 5,27%, respectivamente. Melo (2014), salientou que a rede já possuía distorção harmônica mesmo antes da inserção do sistema fotovoltaico. Assim os inversores atendem as normas internacionais, as quais exigem uma distorção harmônica total menor que 5%. Com o analisador de energia foi observado que independentemente da distorção harmônica de corrente, a distorção harmônica de tensão permaneceu em torno de 2%, conforme apresentado na análise do osciloscópio.

Mesmo que atendam as normas internacionais, as normas da concessionária local para distorção harmônica de corrente deve ser analisada. Tomando como base a COSERN que exige que a mesma seja menor que 5%, e na análise esse valor foi de 5,27%, o sistema apresenta um problema que deve ser corrigido para que se mantenha o bom funcionamento do sistema fotovoltaico na rede inserida.

As harmônicas de tensão e corrente são problemas recorrentes dos SFCR. Assim, nesta pesquisa, será analisada a qualidade da energia elétrica gerada pelo SFCR da UFERSA e avaliado o nível de harmônicas geradas. Posteriormente será projetado um filtro para amenizar o impacto causados pelas harmônicas, de forma a melhorar a qualidade da energia gerada pelo sistema.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a caracterização do sistema, os procedimentos e métodos de medição e o método para projetar um filtro passa-baixa RC.

3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa baseia-se na análise da qualidade de energia de um SFCR. Utilizando um analisador de energia, procura-se medir os parâmetros da energia elétrica proveniente da rede elétrica, bem como os parâmetros da energia elétrica gerada pelo SFCR, com o intuito de fazer uma análise de impactos e propor correções para os mesmos.

O desenvolvimento da pesquisa será realizado em cinco etapas conforme a Figura 20.



Figura 20 – Fluxograma da metodologia.

Fonte: Autoria própria.

A primeira etapa, mostrada na Figura 20, corresponde à caracterização do SFCR, na qual será apresentado o SFCR utilizado. Na segunda etapa serão coletados dados dos parâmetros da rede elétrica com o SFCR ligado à mesma. Na terceira etapa serão medidos os parâmetros da rede elétrica sem a influência do SFCR, ou seja, com o mesmo desligado.

Através dos dados coletados nas etapas dois e três, pode-se fazer a análise da qualidade de energia elétrica gerada pelo SFCR, que corresponde à etapa quatro deste trabalho, e observar os possíveis impactos. Assim, na última etapa será apresentada a correção ou amenização dos impactos encontrados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

O SFCR utilizado no desenvolvimento deste trabalho está interligado à rede elétrica do prédio do Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido (CITED). O CITED está localizado no campus central da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), no município de Mossoró/RN.

O município de Mossoró/RN está situado no nordeste do país, na região do semiárido, cujas coordenadas geográficas são 5° 11' Latitude Sul (S) e 37° 20' Longitude Oeste (W), a uma altitude de 18 m acima do nível do mar. O índice médio de radiação solar anual em Mossoró é de 5,50 kWh/m². A Tabela 6 apresenta as médias mensais de radiação. (TIBA et al., 2000)

Tabela 6 – Radiação global diária

MÊS	MÉDIA (kWh/m²)
Janeiro	5,39
Fevereiro	5,36
Março	5,08
Abril	4,81
Mai	5,00
Junho	4,67
Julho	5,06
Agosto	5,89
Setembro	6,03
Outubro	6,39
Novembro	6,39
Dezembro	5,92
Anual	5,50

Fonte: Adaptado de Tiba et al. (2000)

A Tabela 7 apresenta a insolação diária média para os meses do ano, e a média anual, na cidade de Mossoró.

Tabela 7 – Insolação diária

MÊS	MÉDIA (h)
Janeiro	7,6
Fevereiro	6,6
Março	6,3
Abril	6,5
Maió	7,0
Junho	7,3
Julho	7,6
Agosto	8,7
Setembro	8,5
Outubro	9,3
Novembro	8,9
Dezembro	7,2
Anual	7,6

Fonte: Adaptado de Tiba et al. (2000)

Segundo Vieira (2014) a proximidade da cidade de Mossoró com a linha do equador, não provoca grandes variações da posição do sol ao longo do ano e também nas horas de sol ao longo do dia. Esse fato pode ser observado nos dados da Tabela 7, citada anteriormente.

Nos sub-tópicos 3.3, 3.4 e 3.5 serão detalhadas as etapas 1, 2 e 3 da Figura 20, respectivamente, referente à metodologia adotada.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SFCR DA UFERSA

Como mencionado na seção 3.2, o SFCR abordado neste trabalho, pertence à UFERSA, está instalado no CITED e localizado no município de Mossoró-RN.

O SFCR é composto por 14 módulos fotovoltaicos da Yingli Solar YL245P -29b, cuja potência nominal individual de pico é de 245Wp. Os mesmos estão ligados em série, e produzem uma potência máxima de 3,43 kWp. Também faz parte do sistema um inversor Sunny Boy 3000HFUS da SMA de 3kW, monofásico, conforme a Figura 21. Apesar da potência dos módulos ser maior do que a do inversor, o mesmo limita a potência do sistema a sua potência nominal, ou seja, 3kW, por isso diz-se que o SFCR em questão possui potência de 3kWp.



(a)

(b)

Figura 21 – (a) Módulos fotovoltaicos da Yingli Solar de 245Wp e (b) inversor Sunny Boy de 3kW.

Fonte: Autoria própria.

Para proteção do sistema, após o inversor há um disjuntor de 25A. A conexão à rede ocorre no Quadro de Distribuição Térreo (QDT) do CITED, o qual possui um disjuntor geral de 80A e, logo após, é conectado ao Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT). Este, por sua vez, é conectado à subestação aérea que alimenta o prédio e que está conectada a subestação abrigada da COSERN, o qual possui um medidor bidirecional, conforme mostra a Figura 22.



Figura 22 – Medidor bidirecional instalado na subestação da UFERSA.

Fonte: Autoria própria.

O medidor bidirecional tem como principal função realizar a mediação da energia elétrica consumida e a gerada, de forma que a diferença entre elas resulta na compensação de energia elétrica.

3.4 MEDIÇÕES DOS DADOS DE GERAÇÃO DO SFCR

Primeiramente será realizada a medição dos dados de geração do SFCR. Para esta análise será utilizado um analisador de qualidade de energia elétrica trifásico da Minipa, modelo ET-5061C.

Os parâmetros da rede elétrica que serão medidos são:

- Tensão fase-neutro;
- Tensão fase-fase;
- Tensão neutro-terra ;
- Corrente;
- Frequência;
- Potência ativa, reativa e aparente;
- Energia ativa, reativa e aparente;
- Fator de potência;
- Harmônicos de tensão e corrente;
- Taxa de distorção harmônica;
- Flicker.

Vale ressaltar que o SFCR estudado é monofásico, portanto o analisador será configurado para coleta de dados de apenas uma fase, ao contrário da medição para a rede elétrica que será feita em trifásica. Assim, serão medidos todos os parâmetros descritos, porém por se tratar de um sistema monofásico não haverá a medição da tensão fase-fase.

A Figura 23 mostra o analisador de qualidade de energia instalado na saída do inversor.



Figura 23 – Analisador de energia instalado na saída do inversor.

Fonte: Santiago (2017).

O analisador de qualidade de energia elétrica foi instalado no ponto de conexão com a rede elétrica, ou seja, na saída do inversor, pois nesse ponto pode-se medir mais precisamente os dados sobre a geração de energia.

3.5 MEDIÇÕES DOS DADOS DA REDE ELÉTRICA

Nesta etapa, será realizada a medição dos dados da rede elétrica sem a presença do SFCR, ou seja, com o mesmo desligado. Foi utilizado o mesmo analisador de qualidade de energia mencionado anteriormente, desta vez instalado no barramento principal de baixa tensão do CITED, como mostra a Figura 24.

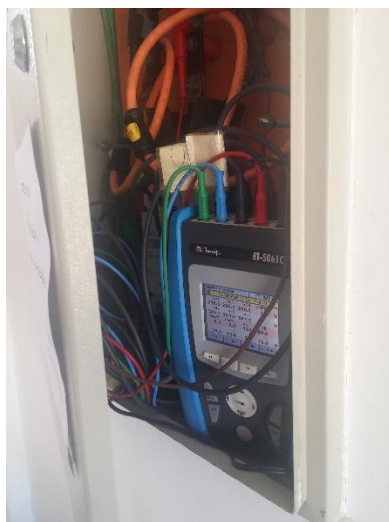


Figura 24 – Analisador de energia instalado no Quadro de distribuição do CITED.

Fonte: Autoria própria.

Isso é necessário para que se possa conhecer o comportamento da rede elétrica sem a influência do SFCR e então poder mensurar as alterações advindas da conexão do SFCR quando ligado à rede elétrica.

3.6 MODELAGEM DE UM SFCR

Após as etapas citadas anteriormente, será feita a modelagem matemática do SFCR. A mesma tem como objetivo entender melhor o funcionamento do SFCR instalado na UFERSA.

Para modelar um sistema fotovoltaico, é preciso modelar matematicamente sua unidade básica: a célula fotovoltaica. Segundo Vera (2004), pode-se considerar a célula fotovoltaica

ideal como um diodo, que ao ser exposta à luz solar produz corrente elétrica I que é igual a corrente fotogerada I_L menos a corrente para o diodo no escuro I_D , dada na Equação 1.

$$I = I_L - I_D \quad (1)$$

Esta relação pode ser melhor visualizada através do seu circuito equivalente, como mostra a Figura 25, que demonstra a célula fotovoltaica ideal como sendo, basicamente, um diodo em paralelo à uma fonte de corrente.

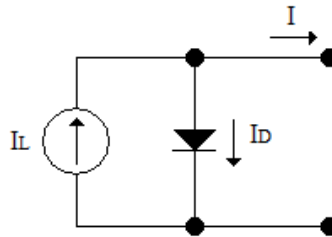


Figura 25 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal.

Fonte: Autoria própria.

A corrente para o diodo no escuro é dada pela Equação 2.

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Logo, substituindo a Equação 2 na Equação 1, tem-se a Equação 3 que representa a corrente elétrica de uma célula fotovoltaica ideal.

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Onde,

- I_0 : corrente de saturação reversa;
- e : carga elétrica do elétron;
- V : tensão nos terminais da célula;
- m : fator de idealidade do diodo;
- k : constante de Boltzmann;
- T : temperatura de junção da célula.

Porém, para circuitos reais, deve-se considerar as perdas internas da própria célula fotovoltaica, pois na mesma existem fugas de correntes proporcionais à tensão. Para representar estas perdas internas, são adicionadas uma resistência em série e uma em paralelo ao circuito equivalente da célula fotovoltaica ideal, como mostra a Figura 26. (VERA, 2004)

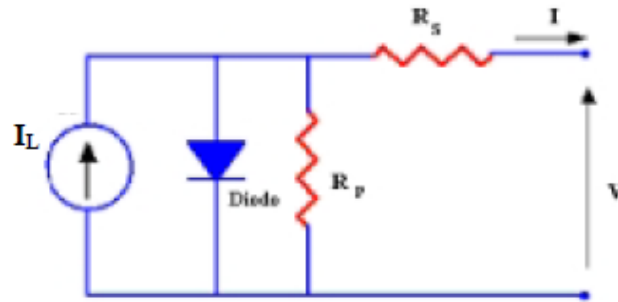


Figura 26 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica real.

Fonte: Vera (2004).

Onde,

- R_p : é a resistência oriunda das imperfeições ou as bordas da junção P-N.
- R_s : é a resistência devido à dopagem do semiconductor.

Portanto, considerando as perdas da célula fotovoltaica, a Equação 3 dada anteriormente, torna-se a Equação 4, cujo os cinco parâmetros apresentados na mesma podem determinar a curva I-V de uma célula fotovoltaica.

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\exp \frac{e(V+IR_s)}{mkT} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (4)$$

Segundo Vera (2004) a partir das equações da célula fotovoltaica, pode-se modelar as equações para os módulos fotovoltaicos multiplicando o fator (e/mkT) , na Equação 4, pelo número de células em série no módulo fotovoltaico (N_s), obtendo-se a Equação 5.

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\left(\exp \frac{V+IR_s}{vt} \right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (5)$$

Onde,

$$V_t = N_s \left(\frac{mkT}{e} \right)$$

Assim como a Equação 4 pode determinar a curva I-V de uma célula fotovoltaica, a Equação 5 pode determinar a curva I-V de um módulo, bastando para isso encontrar os valores dos parâmetros I_L , I_0 , R_s , R_p e m , partindo das especificações dos fabricantes dos módulos, como tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, tensão no ponto de máxima potência e corrente no ponto de máxima potência, os quais são dados em condições padrões de operação (Irradiância de 1000W/m^2 e temperatura de 25°C). (VERA, 2004)

Ainda segundo Vera (2004) pode-se considerar que a corrente de curto-circuito do módulo (I_{sc}) é igual a corrente fotogerada (I_L). A tensão de circuito aberto (V_{oc}) dada pelo fabricante, como citado anteriormente, é dada pela Equação 6.

$$V_{oc} = V_t \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (6)$$

Segundo Vera (2004) apud Krezinger (1993), para solucionar a Equação 6 é necessário determinar o coeficiente de idealidade do diodo (m), dada pela Equação 7.

$$m = 2,8 - 2,3 \left(\frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \right) \quad (7)$$

Onde,

- I_{mp} : corrente de máxima potência;
- V_{mp} : tensão de máxima potência;
- I_{sc} : corrente de curto-circuito;
- V_{oc} : Tensão de circuito aberto.

Ainda de acordo Vera (2004) apud Krezinger (1993), pode-se determinar a R_p e R_s quando o módulo fotovoltaico opera nas condições de máxima potência, as mesmas são dadas pela Equação 8 e Equação 9, respectivamente.

$$R_p = \frac{V_{mp} - I_{mp}R_s}{\frac{I_0}{V_t} \left[(I_{mp}R_s - V_{mp}) \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{V_t}\right) \right] + I_{mp}} \quad (8)$$

$$R_s = \left\{ \frac{\left(\frac{V_{mp}}{I_{mp}}\right) - R_s}{\left[\frac{I_0}{V_t} (I_{mp}R_s)\right] \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{V_t}\right)\right] + I_{mp}} \right\} \cdot \left\{ I_L - I_{mp} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{V_t}\right) - 1\right] \right\} - \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (9)$$

Para a resolução dessas equações, se faz necessário utilizar um método numérico, como Newton-Raphson, para encontrar os valores de R_s e R_p , os quais são considerados constantes para qualquer ponto da curva I-V e para qualquer valor de irradiância e temperatura. (VERA, 2004)

Como citado anteriormente, a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto, são dados pelo fabricante através de valores padrões. Porém, para condições diferentes dos padrões, deve-se utilizar a Equação 10 e a Equação 11 para determinar os seus respectivos valores, nestas dadas condições. (VERA, 2004)

$$I_{SC} = I_{SC}^s \frac{G}{1000 \text{ Wm}^{-2}} [1 + \alpha(T_c - 298 \text{ K})] \quad (10)$$

$$V_{OC} = V_{OC}^s + N_s \beta (T_c + 298 \text{ K}) + V_t \ln\left(\frac{G}{1000 \text{ Wm}^{-2}}\right) \quad (11)$$

Onde,

- I_{SC}^s : corrente de curto-circuito nas condições padrões;
- V_{OC}^s : tensão de circuito aberto nas condições padrões;
- α : coeficiente de variação relativa de I_{sc} com a temperatura;
- β : coeficiente de variação de V_{oc} com a temperatura;
- G : irradiância solar.

Quanto a modelagem da temperatura das células, Vera (2004) apud Krezinger (1993) determina seu valor como dado pela Equação 12, onde a mesma é determinada para as condições nominais de operação (NOCT, Nominal Operating Cell Temperature), dada pelos

fabricantes dos módulos, e definida a uma temperatura ambiente de 20°C (T_a), irradiância de 800 W/m² (G) e velocidade do vento de 1m/s.

$$T_c = T_a + \frac{G(NOCT-20)}{800} \quad (12)$$

Além da modelagem da célula fotovoltaica, será modelado o inversor, sendo este responsável por transformar a corrente contínua dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada para a interligação com a rede. Segundo Cáceres et al. (2012), os parâmetros que definem o funcionamento de um inversor é a eficiência de conversão e a eficiência do rastreamento de máxima potência. Como a eficiência global do rastreamento de máxima potência gira em torno de 99%, a modelagem do inversor recai apenas sobre a sua eficiência de conversão.

A determinação da eficiência de conversão do inversor consiste no cálculo da potência de saída, levando em consideração a potência de entrada bem como suas perdas internas. Assim, pode-se determinar sua eficiência através da Equação 13. (CÁCERES, 2012)

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + (K_0 + K_1 P_0 + K_2 P_0^2)} \quad (13)$$

Onde,

- P_0 : potência de saída;
- K_0 : autoconsumo do inversor;
- K_1 : quedas de tensão;
- K_2 : perdas ôhmicas.

Finalizada a etapa de modelagem do sistema, são estudadas propostas para amenizar as distorções harmônicas de tensão e corrente, considerados problemas comuns em SFCR's. Uma das formas de corrigir tais problemas é através da utilização de um filtro de frequências. A Seção 3.7 apresenta o projeto de um filtro passa-baixa RC.

3.7 FILTRO PASSIVO PASSA-BAIXA RC

Segundo Mussoi (2004), filtro é um circuito que apresenta um comportamento típico em função da frequência do sinal que é aplicado a ele, o qual permite a passagem de sinais de certas frequências enquanto suprime sinais de outras frequências. Os filtros passivos são construídos apenas com elementos passivos dos circuitos, ou seja, resistores, capacitores e indutores.

Um filtro passa-baixa passivo é um circuito que permite a passagem de sinais de tensão e corrente para frequências abaixo de um certo limite, atenuando os sinais cuja frequência ultrapassar esse valor. (MUSSOI, 2004)

Existem dois tipos de circuitos passa-baixa: o RL, composto por resistor e indutor, e o RC, composto por resistor e capacitor. Nesta pesquisa será abordado apenas o circuito passa-baixa RC, por ser mais utilizado.

A Figura 27 apresenta um circuito RC como um filtro passa-baixa.

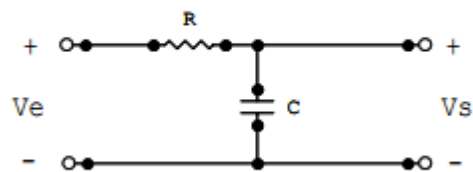


Figura 27 – Filtro passivo passa-baixa RC.

Fonte: Mussoi (2004).

Quando esse circuito recebe sinais de baixa frequência, o capacitor apresenta alta reatância ($X_c \gg R$) e seu comportamento tende a um circuito aberto, no qual a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o capacitor de saída. Assim, pode-se se dizer que o circuito “deixa passar” sinais com baixas frequências. (MUSSOI, 2004)

Para sinais com alta frequência o capacitor apresenta uma baixa reatância ($X_c \ll R$) e ele se comporta como um curto-circuito. Assim, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão sobre o capacitor de saída será muito pequena. O que caracteriza um circuito que “impede a passagem” de sinais de alta frequência. (MUSSOI, 2004)

3.7.1 Ganho e Fase

Segundo Mussoi (2004), para o circuito em questão, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada pela Equação 14:

$$V_s = \frac{X_c}{R+X_c} \cdot V_c = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}} \cdot V_c \quad (14)$$

Onde,

- V_s : Tensão de saída (V);
- X_c : Impedância capacitiva (Ω);
- R : Resistência (Ω)
- V_c : Tensão no capacitor (V);
- ω : frequência (rad/s);
- C : Capacitância (F).

ou ainda:

$$\frac{V_s}{V_c} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}} \quad (15)$$

Ao fatorar a Equação 15, dividindo tanto o numerador como o denominador por R , tem-se a Equação 16:

$$\frac{V_s}{V_c} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}} \cdot \left(\frac{R}{R}\right) = \frac{\frac{1}{j\omega RC}}{1+\frac{1}{j\omega RC}} = \frac{\frac{1}{j\omega RC}}{\frac{j\omega RC+1}{j\omega RC}} = \frac{1}{1+j\omega RC} \quad (16)$$

Portanto, a Função de Transferência de um Filtro Passa-Baixa RC, na forma fatorada, é dada pela Equação 17:

$$H(\omega) = \frac{1}{1+j\omega RC} \quad (17)$$

Ainda segundo Mussoi (2004), sabe-se que a função de transferência é um número complexo e que o ganho de tensão é o módulo da função de transferência na forma polar, e a

fase é o ângulo da função de transferência. Portanto, a equação para o ganho de tensão e fase para um Filtro Passa-Baixa RC são, respectivamente:

$$GV = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

$$\alpha = -\arctg(\omega RC)$$

Definida a Função de Transferência, e as equações do ganho e fase, é preciso definir a equação para a Frequência de corte. Esta é responsável por determinar a partir de que valor de frequência os sinais começam a ter uma amortização expressiva, cerca de 30%.

3.7.2 Frequência de Corte

Sabe-se que o ganho na frequência de corte é:

$$GV|_{\omega_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Então:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \quad (18)$$

Elevando ao quadrado ambos os lados e operando a Equação 18, para isolar ωC , tem-se:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{1 + (\omega_c RC)^2}$$

$$1 + (\omega_c RC)^2 = 2$$

$$(\omega_c RC)^2 = 2 - 1$$

$$\omega_c RC = \sqrt{1} = 1$$

Portanto, a Frequência de Corte para um Filtro Passa-Baixa RC pode ser dada pela Equação 19

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (19)$$

Na frequência de corte ($\omega = \omega_c$), a fase será:

$$\alpha = -\arctg(\omega_c RC) = -\arctg\left(\frac{1}{RC} \cdot RC\right) = -\arctg(1)$$

$$\alpha = -45^\circ$$

A curva de resposta em frequência do filtro será dado como na Figura 28.

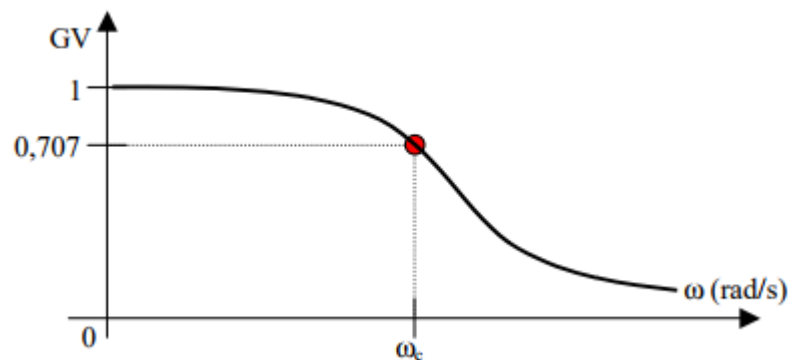


Figura 28 – Resposta de um filtro passivo passa-baixa RC.

Fonte: Mussoi (2004).

Percebe-se que a partir da frequência de corte, o ganho de tensão cai de forma exponencial e tende à zero no infinito. Isso significa que quanto maior a frequência do sinal maior será a atenuação.

Após definidos os materiais e métodos, tem-se as ferramentas necessárias para avaliar o SFCR da UFERSA quanto à qualidade de energia e seus impactos. O Capítulo 4 traz os resultados obtidos durante os períodos de medição Agosto à Dezembro e Março a Maio e, posteriormente, a análise e correção dos impactos observados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os principais resultados obtidos durante a realização desta pesquisa. Será feita uma análise da qualidade de energia frente aos limites impostos pelas normas, bem como a apresentação dos impactos causados pela inserção do SFCR ao sistema de energia elétrica, e a forma de resolvê-los. É importante ressaltar que este trabalho foi realizado paralelamente à pesquisa de Santiago (2017), na qual o mesmo analisou a qualidade de energia elétrica do SFCR da UFERSA e comparou os valores encontrados com as normas vigentes. A presente pesquisa dá continuidade ao trabalho de Santiago (2017), e além de analisar a qualidade de energia, apresenta e modela correções para os impactos observados.

4.1 ANÁLISE DA GERAÇÃO DO SFCR

A análise da qualidade da energia elétrica gerada pelo SFCR foi realizada durante o período de Agosto à Dezembro de 2015. Para isso foi realizada medições no ponto de conexão com a rede, ou seja, na saída do inversor. Foi utilizado um analisador de energia da Minipa, modelo ET-5061C. Em alguns dias de medição houve problema na coleta de dados, que podem ter ocorrido devido a manutenção na rede elétrica por parte da COSERN e/ou UFERSA. Destacam-se também problemas de mau contato com a tomada de energia elétrica ao qual o analisador estava ligado, de forma que em períodos de limpeza do laboratório houve a desconexão no analisador e a consequente interrupção na medição dos dados. Posteriormente esse problema foi sanado.

As Tabela 8 e Tabela 9 apresentam, respectivamente, a média mensal e o desvio padrão para os as medições de Agosto à Dezembro, com exceção da energia ativa gerada, pois está é cumulativa.

Tabela 8 – Média mensal dos parâmetros de geração do SFCR de Agosto à Dezembro de 2015.

Mês	V [V]	VNPE [V]	F [Hz]	I [A]	P [W]	Ea [kWh]	FPI	THDV [%]	THDI [%]
Agosto	221,21	0,60	59,98	6,54	1.495,55	16,55	0,9945	2,21	3,56
Setembro	220,85	0,01	60,00	7,06	1.632,46	17,88	0,9945	2,32	3,40
Outubro	220,98	0,02	60,00	6,59	1.506,73	16,66	0,9947	2,08	3,47
Novembro	220,84	0,00	60,00	6,45	1.472,39	16,40	0,9956	2,32	3,53
Dezembro	220,11	0,02	60,00	5,51	1.276,25	13,28	0,9934	2,10	3,36

Fonte: Santiago (2017).

Onde,

- V: Tensão (V);
- VNPE: Tensão entre o neutro e o terra (V);
- F: Frequência (Hz);
- I: Corrente (A);
- P: Potência (W);
- Ea: Energia Ativa (kWh)
- FPI: Fator de potência indutivo;
- THDV: Taxa de Distorção Harmônica de Tensão;
- THDI: Taxa de Distorção Harmônica de Corrente;

Tabela 9 – Desvio padrão dos parâmetros de geração do SFCR de Agosto à Dezembro de 2015

Mês	V [V]	VNPE [V]	F [Hz]	I [A]	P [W]	Ea [kWh]	FPI	THDV [%]	THDI [%]
Agosto	1,87	3,10	0,05	1,17	261,58	3,71	0,0027	0,30	0,35
Setembro	1,40	0,02	0,00	0,64	119,80	1,46	0,0015	0,33	0,37
Outubro	1,79	0,04	0,00	0,95	202,80	2,41	0,0019	0,40	0,42
Novembro	1,51	0,01	0,00	0,48	110,66	1,25	0,0011	0,36	0,41
Dezembro	1,55	0,03	0,01	1,01	204,54	3,39	0,0029	0,48	0,31

Fonte: Santiago (2017).

Os dados coletados durante esses meses apresentaram resultados similares no que diz respeito a análise da qualidade de energia, de forma que para esta pesquisa, será tomado apenas o mês de Agosto como base de análise, pois foi o mês com menos problemas de interrupção de medição, tendo ocorrido interrupção parcial nos dias 17 e 31, e interrupção total apenas no dia 30.

4.1.1. Tensão fase-neutro

A Figura 29 apresenta os valores para a tensão elétrica fase-neutro medida no ponto de conexão do SFCR com a rede elétrica do CITED. O valor nominal estabelecido pela concessionária é de 220V, podendo ter variação máxima para mais de até 20% (242 V) e para menos de 10% (176 V).

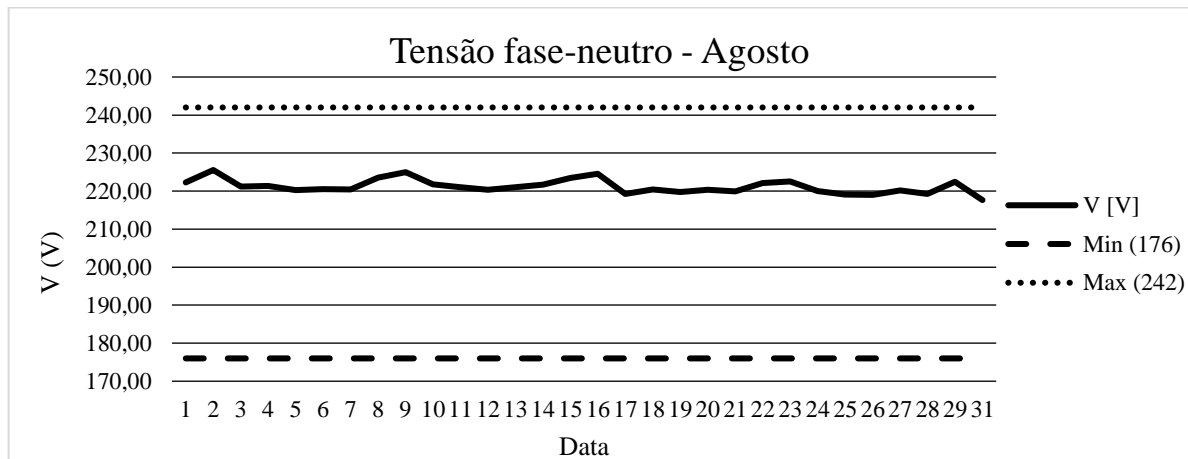


Figura 29 – Tensão fase-neutro para o mês de Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

Ao analisar a Figura 29, percebe-se que a tensão elétrica teve média mensal de 221,21 V e desvio padrão de 1,87 V. Em nenhum dos dias seu valor ultrapassou os limites máximo e mínimo, portanto seu comportamento está dentro dos valores estabelecidos por norma.

4.1.2. Tensão neutro-terra

O valor ideal para a tensão entre neutro e terra é zero, porém alguns fatores podem influenciar para que esse valor seja diferente de zero. Exemplo disso é o desequilíbrio de fases, transformador operando em vazio entre outros. A Figura 30 mostra o comportamento da tensão neutro-terra para o mês de Agosto.

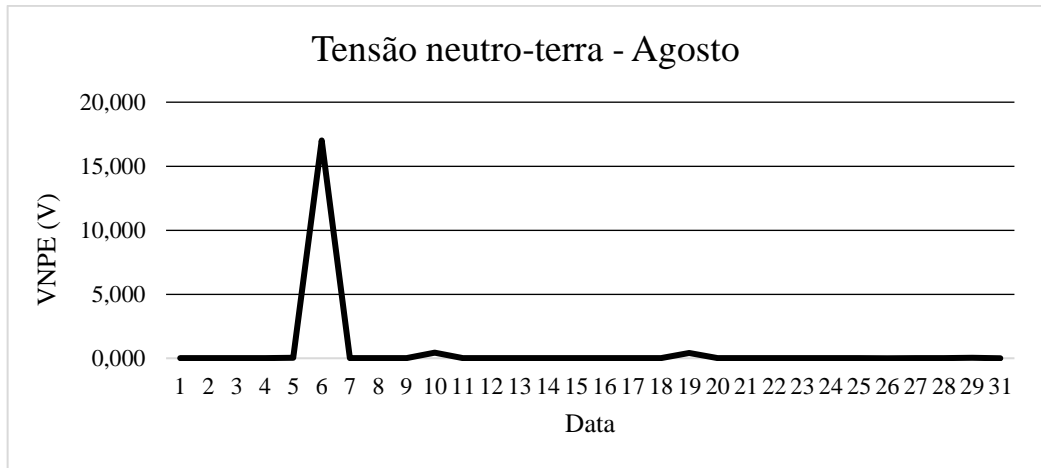


Figura 30 – Tensão neutro-terra para o mês Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

Pose-se observar que no dia 6 constatou-se um valor médio de tensão fase-neutro de 17,0 V. Não se sabe o que poderia ter causado essa alteração, porém pode-se afirmar que não é algo oriundo do SFCR, pois os demais parâmetros estão dentro das faixas de valores normais.

4.1.3. Frequência

A faixa de valores para a frequência estabelecida pela COSERN é de 57,5 Hz e 60,5 Hz de forma que não haja interrupção do fornecimento de energia elétrica do SFCR ou da potência injetada na rede. A Figura 31 apresenta a frequência para o mês de Agosto de 2015.

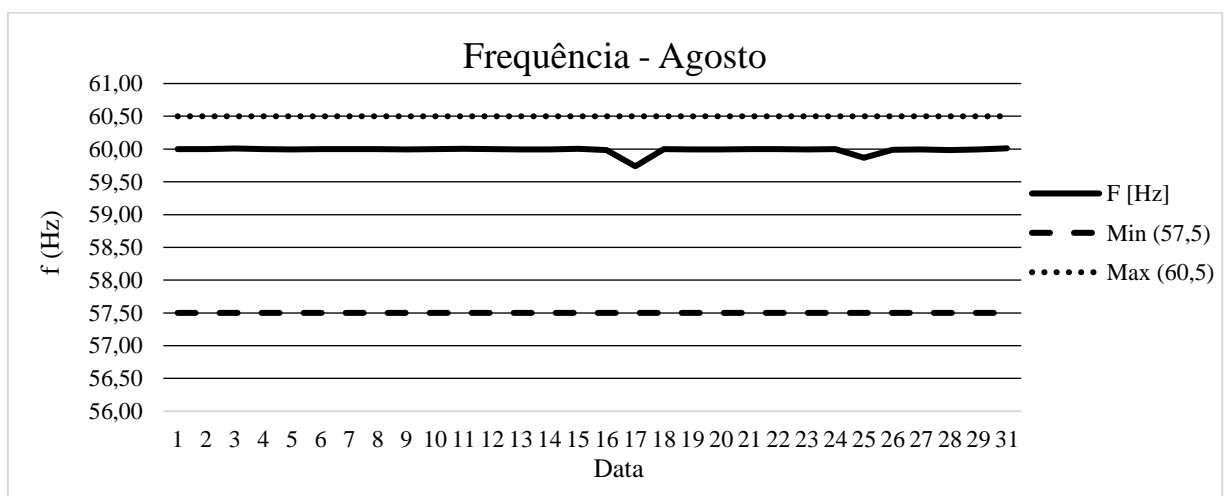


Figura 31 – Frequência para o mês de Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

Percebe-se que a variação da frequência ocorreu de forma ínfima e que não ultrapassou os limites estabelecidos pela norma.

4.1.4. Corrente elétrica, potência ativa e energia ativa

A corrente elétrica, a potência ativa e a energia ativa são parâmetros dependente dos fatores climáticos como radiação solar, temperatura, nebulosidade e sombreamento. Outro fator que afeta na geração é a condição de limpeza dos módulos.

A corrente média diária gerada pelo SFCR no mês de Agosto foi de 6,54 A, já a potência ativa gerado durante este mês foi de 1,49 kW. Devido a tensão ser praticamente constante (220 V), o gráfico de potência se torna quase uma cópia do gráfico da corrente, mudando apenas seus valores. Esse fato pode ser visto nas Figura 32 e Figura 33.

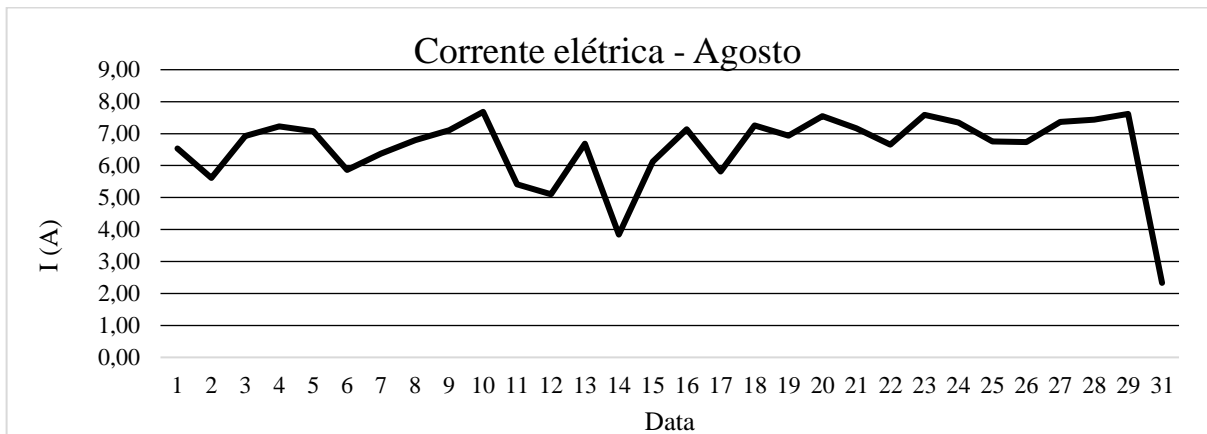


Figura 32 – Corrente para o mês de Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

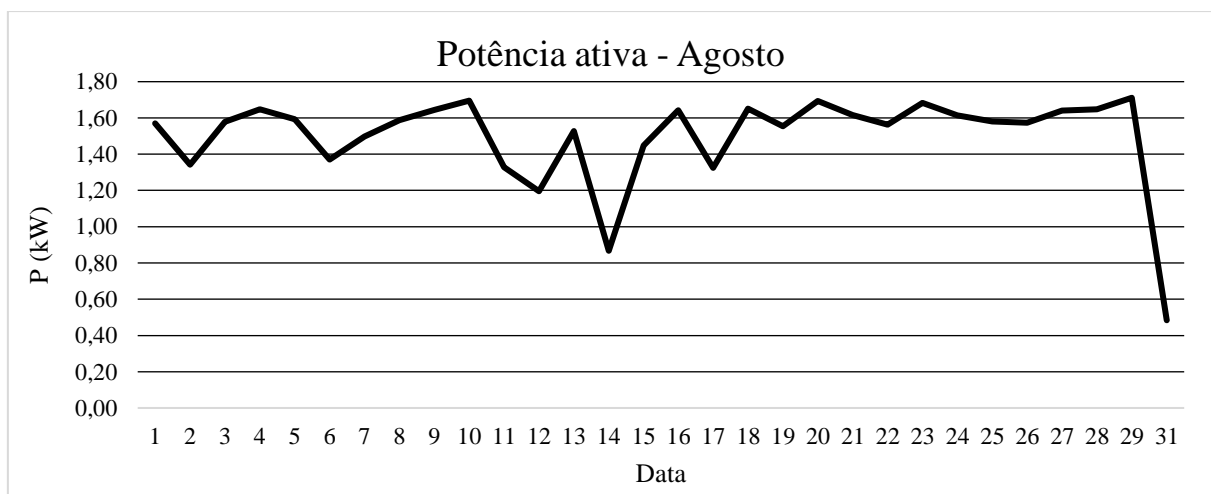


Figura 33 – Potência ativa para o mês de Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

No dia 31 a corrente elétrica teve um valor baixo se comparado aos outros dias do mês, pois, como já mencionado anteriormente, nesse dia houve interrupção da medição.

A energia ativa gerada pelo SFCR para o mês de Agosto foi de 16,55 kWh, como pode ser visto na Figura 34. O dia 31 foi retirado do cálculo da média uma vez que nesse dia não houve medição completa.

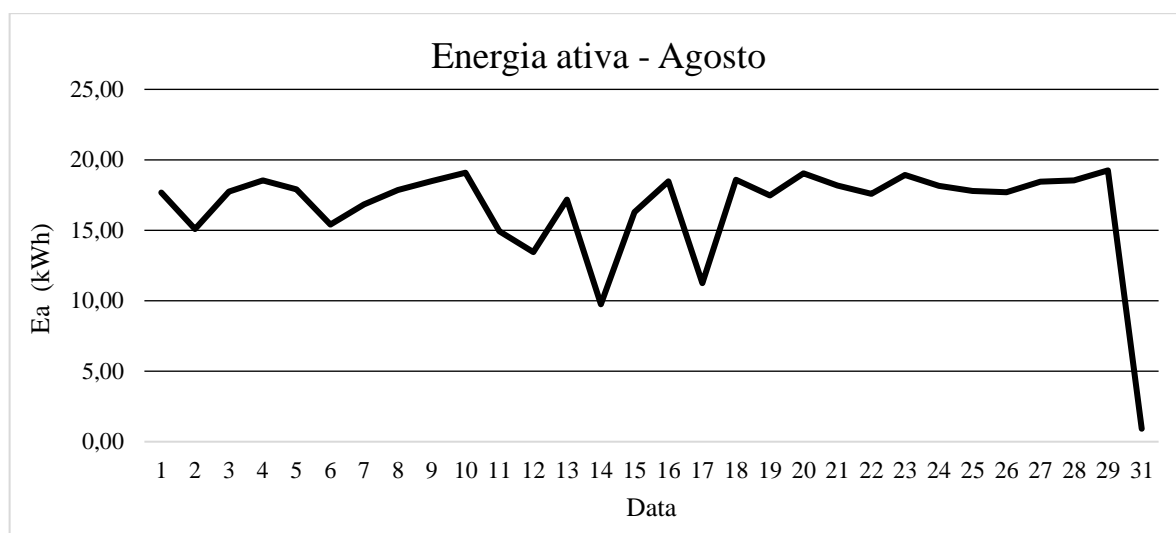


Figura 34 – Energia ativa para o mês de Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

4.1.5. Fator de potência

A COSERN (2013) estabelece que sistemas de microgeração com potência nominal menor ou igual a 3 kW, deve ter um fator de potência dentro da faixa de 0,98 indutivo e 0,98 capacitivo quando a potência injetada na rede for maior que 20% da potência nominal do SFCR.

Dessa forma, a construção do gráfico do fator de potência para o mês de Agosto de 2015 foi feita analisando somente o período de tempo em que o sistema possuía 600 W de potência gerada (20% da potência nominal), como pode ser visto na Figura 35.

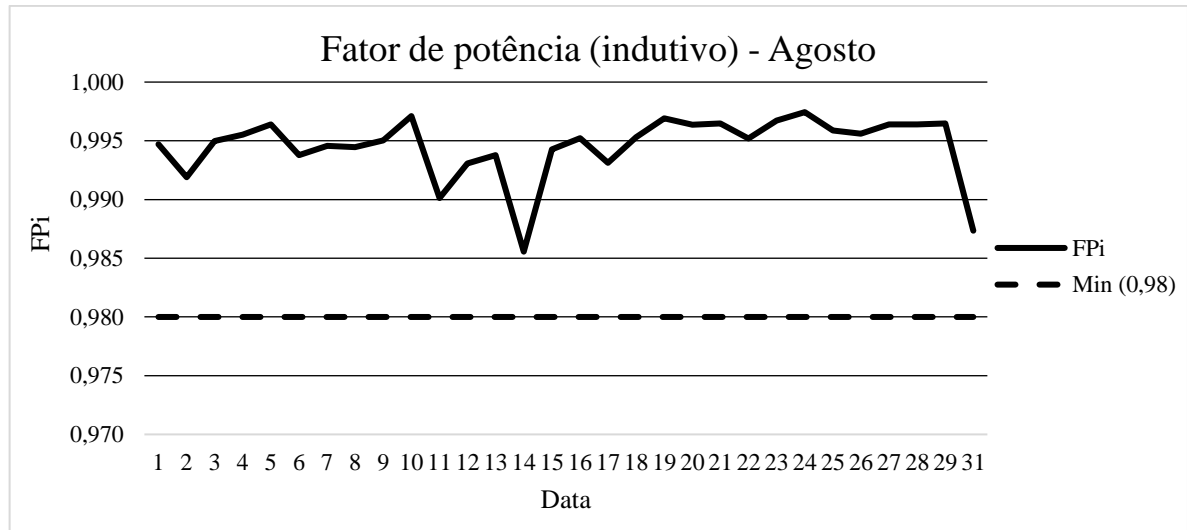


Figura 35 – Fator de potência indutivo ativa para o mês de Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

Pode-se observar que o SFCR possui um fator de potência próximo de 1 (ideal), e sua média foi de 0,9945, de forma que em nenhum momento ultrapassou o limite máximo estabelecido pela norma.

4.1.6. Taxa de distorção harmônica de tensão

Todo SFCR produz harmônicas na rede. Para o sistema em questão não foi diferente. Analisando a Figura 36, pode-se perceber que a taxa de distorção harmônica para tensão foi de cerca de 2% e manteve-se inferior ao limite máximo permitido pelas normas que é de 8%.

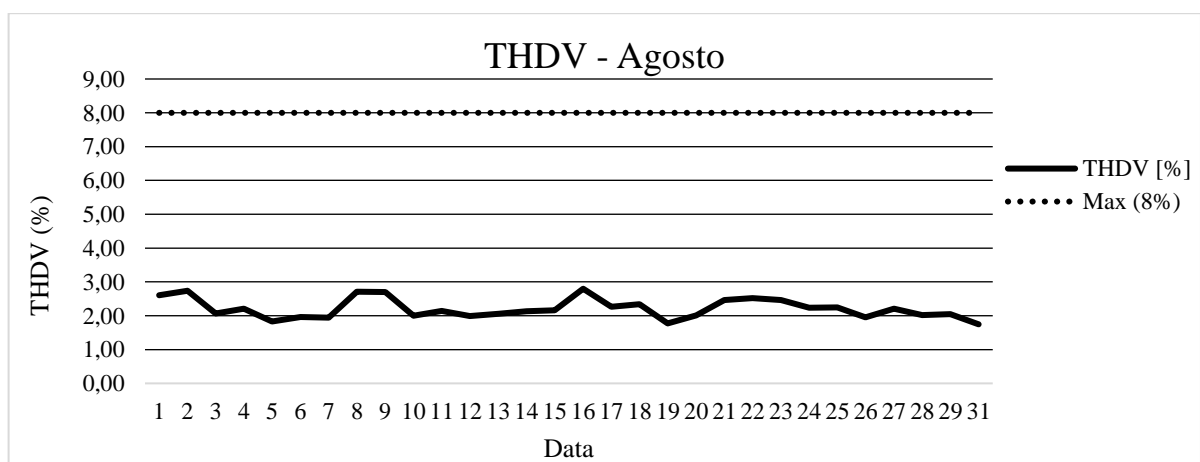


Figura 36 – Taxa de distorção harmônica de tensão para o mês de Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

4.1.7. Taxa de distorção harmônica de corrente

A taxa de distorção harmônica de corrente, segunda a COSERN (2013) deve ter valor inferior a 5% quando o sistema operar na potência nominal. Em nenhum dos dias analisados o SFCR atingiu a potência nominal, dessa forma foram avaliados os pontos onde a potência gerada ultrapassa 90% da potência nominal. A Figura 37 apresenta o comportamento da taxa de distorção harmônica de corrente.

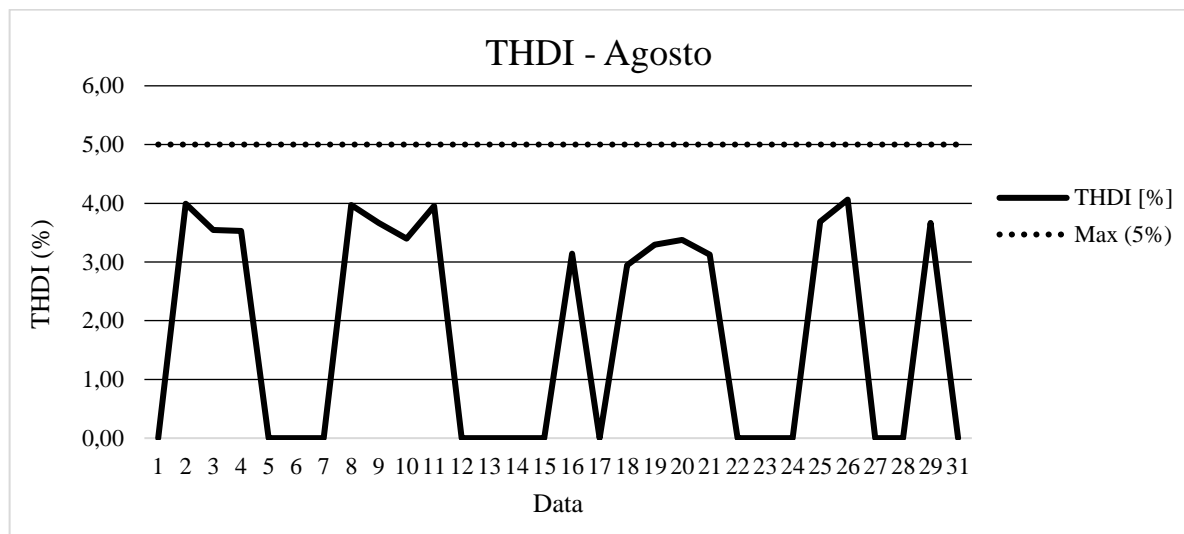


Figura 37 – Taxa de distorção harmônica de corrente para o mês de Agosto de 2015.

Fonte: Santiago (2017).

Pode-se perceber que em alguns dias do mês o SFCR não atinge 90% da potência nominal, isso pode ser devido aos dias com mais nebulosidade ou ainda dias de chuva ou nublados. Apesar desses fatores, a taxa de distorção harmônica de corrente ficou abaixo de 5% (limite máximo).

4.2 ANÁLISE DO IMPACTO DO SFCR SOBRE A REDE ELÉTRICA

Para medir o impacto causado pelo SFCR na rede elétrica, foi instalado o analisador de energia no quadro geral do CITED, e foram realizadas medições nos meses de Março a Maio, onde no mês de Março foram coletados dados com o SFCR desligado e nos dois meses seguintes com o SFCR ligado à rede elétrica. Vale ressaltar que a fase analisada será a fase S, pois o SFCR é monofásico e está ligado a esta fase. De posse desses dados pode-se avaliar os impactos causados pela inserção do SFCR à rede elétrica.

A Tabela 10 e Tabela 11 apresenta a média mensal para os parâmetros analisados e o desvio padrão desses valores, respectivamente.

Tabela 10 – Média mensal dos parâmetros de geração do SFCR de Março a Maio de 2016.

Mês	V [V]	VNPE [V]	F [Hz]	I [A]	P [W]	Ea [kWh]	FPI	THDV [%]	THDI [%]
Março	217,84	0,61	60,00	23,14	4790,96	77,48	0,94	2,08	13,73
Abril	220,84	0,10	59,99	14,83	3007,42	47,39	0,89	2,22	26,62
Maio	220,12	0,72	60,00	18,54	3715,25	70,45	0,89	2,39	21,15

Fonte: Santiago (2017).

Tabela 11 – Desvio padrão dos parâmetros de geração do SFCR de Março a Maio de 2016.

Mês	Parâmetro – Desvio padrão								
	V [V]	VNPE [V]	F [Hz]	I [A]	P [W]	Ea [kWh]	FPI	THDV [%]	THDI [%]
Março	2,98	0,65	0,01	9,96	2095,04	30,90	0,03	0,35	4,91
Abril	1,59	0,11	0,02	6,75	1582,28	23,00	0,08	0,33	10,32
Maio	1,84	0,74	0,00	8,48	2023,82	31,28	0,09	0,45	8,09

Fonte: Santiago (2017).

A Figura 38 a 44 apresentam os parâmetros elétricos da fase S para os meses de Março a Maio. Analisando as figuras, pode-se perceber a influência do SFCR na rede elétrica. A tensão fase-neutro (Figura 38) apresentou um leve acréscimo, isso já era esperado uma vez que um SFCR é um gerador de potência ativa e sua inserção na rede acarreta sempre um aumento na tensão do sistema elétrico. A tensão que antes possuía uma média de 217,84 V passou a ser 220,84 em Abril e 220,12 V em Maio.

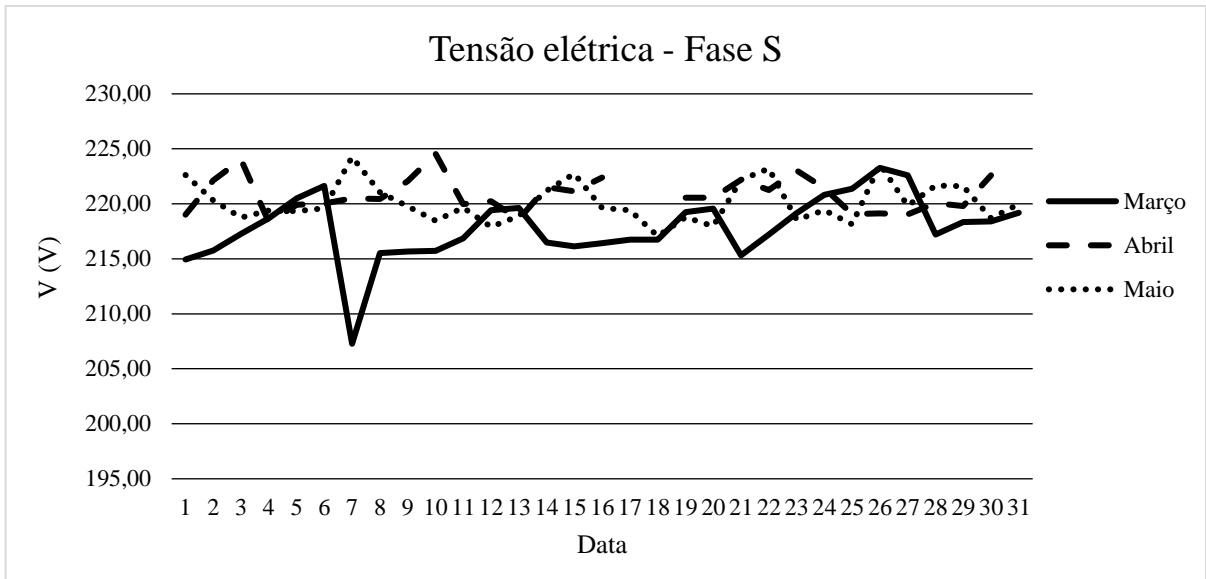


Figura 38 – Valores para a tensão fase-neutro nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

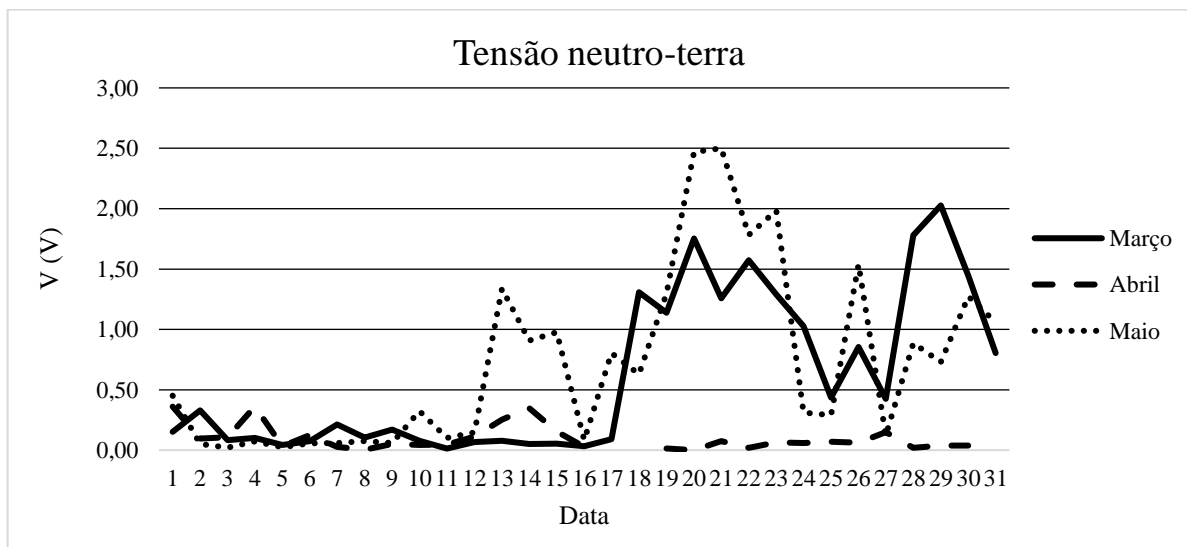


Figura 39 – Valores para a tensão neutro-terra nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

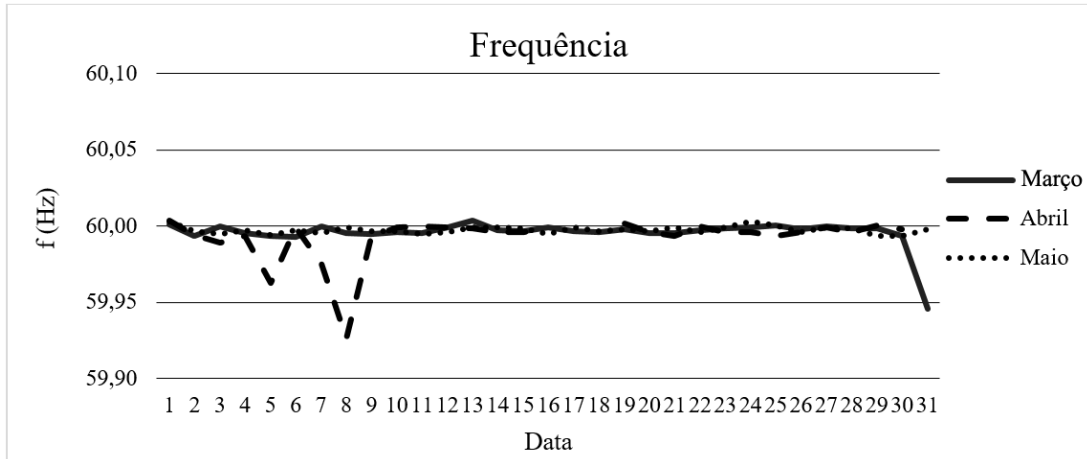


Figura 40 – Valores para a frequência nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

Analisando as Figura 41 a 41, correspondentes a corrente elétrica, potência ativa e energia reativa, respectivamente, pode-se perceber a redução do consumo nos meses de Abril e Maio, nos quais o SFCR estava ligado. Essa redução se dá pelo fato de que parte da energia do prédio vem do SFCR de forma que o consumo de energia oriunda da concessionária é reduzido. No mês de Abril a redução da energia consumida foi de 38,84% e no mês de Maio foi de 9,07%. Os valores para cada mês variam de acordo com o consumo do prédio, há meses em que mais atividades estão sendo realizadas e outros meses com menos atividade. Segundo Santiago (2017), a economia diária deve ser em torno de 21%.

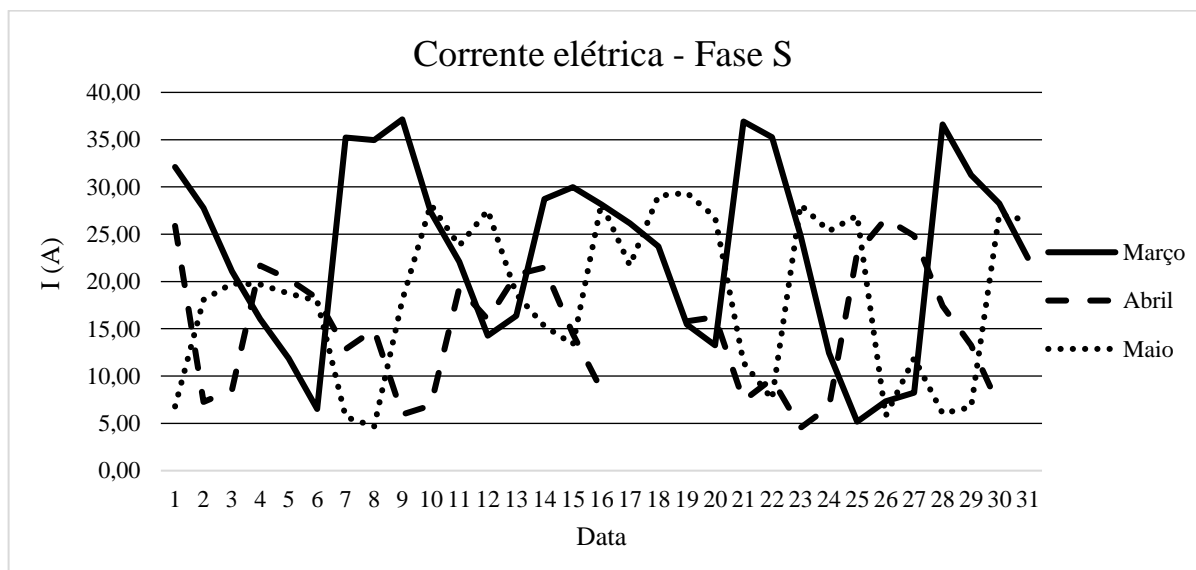


Figura 41 – Valores para corrente elétrica nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

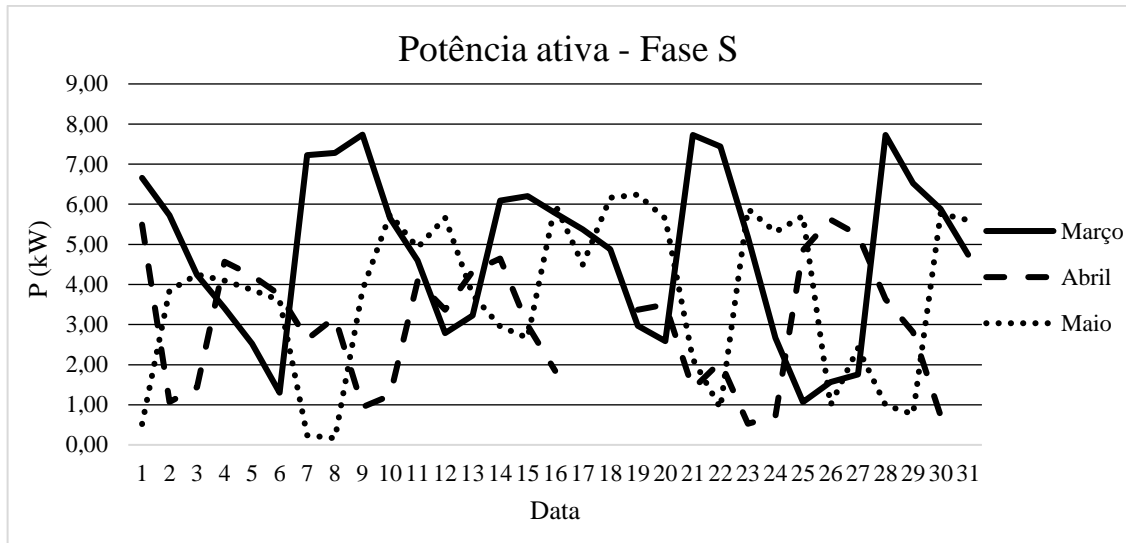


Figura 42 – Valores para potência ativa nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

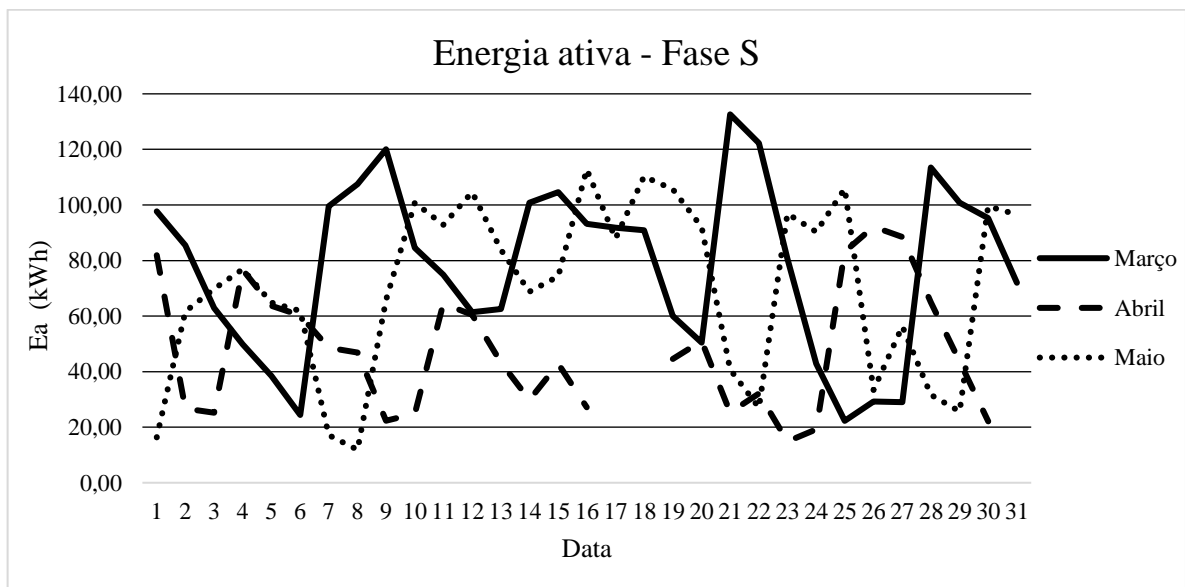


Figura 43 – Valores para energia ativa nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

A Figura 44 apresenta o fator de potência indutivo para os meses de Março a Maio. Percebe-se que o fator de potência caiu de 0,94 em Maio para 0,89 nos meses de Abril e Maio. Vale lembrar que este fator de potência é correspondente a fase S, e apesar desse valor ter caído, o fator de potência trifásico apresentou valores entre 0,92 e 0,95 nos meses de Abril e Maio, e portanto esteve dentro dos valores permitidos pela norma.

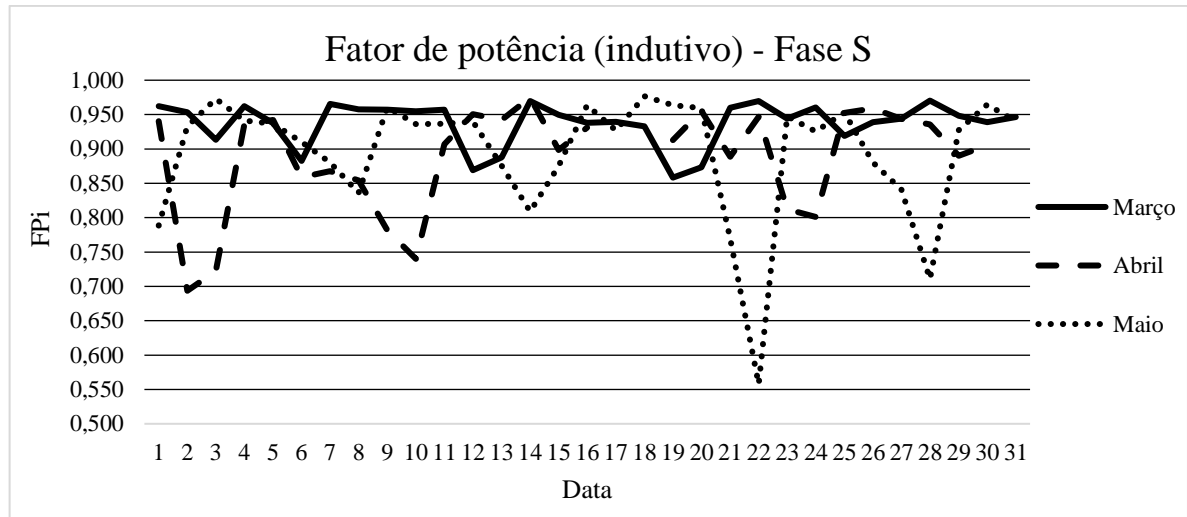


Figura 44 – Valores para o fator de potência indutivo nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

As Figura 45 e Figura 46 apresentam os valores para a taxa de distorção harmônica para tensão e corrente, respectivamente. Percebe-se que as taxas de distorção harmônica aumentaram com a inserção do SFCR à rede. A taxa de distorção Harmônica para tensão, apesar de ter aumentado, manteve-se dentro dos valores exigidos por norma. Porém a taxa de distorção Harmônica de corrente apresentou valores elevados, apresentando aumento de até 94% em relação ao sistema sem o SFCR. O prédio em si já apresenta valores de distorção harmônica de corrente elevados, porém com a inserção do sistema esse valor aumenta, principalmente nos períodos da manhã, onde a irradiação é baixa e o SFCR está funcionando com baixa capacidade.

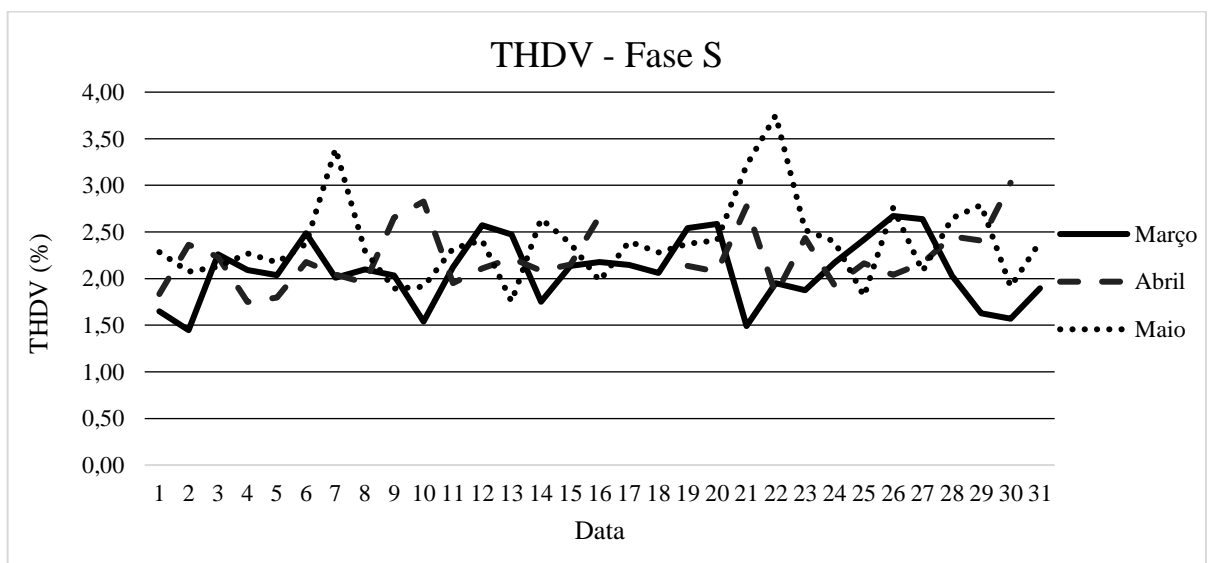


Figura 45 – Valores para a taxa de distorção harmônica de tensão nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

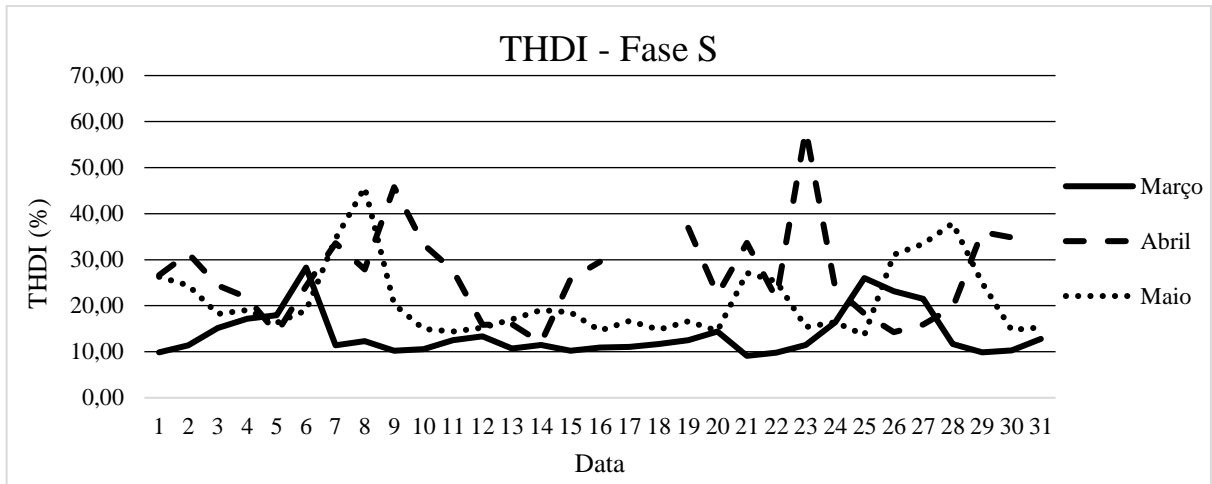


Figura 46 – Valores para a taxa de distorção harmônica de corrente nos meses de Março a Maio.

Fonte: Santiago (2017).

Como a norma estabelece um limite apenas para quando o sistema está trabalhando em sua capacidade nominal, este caso não se classifica como um problema. Os parâmetros de tensão neutro-terra, frequência e taxa de distorção harmônica não apresentam grandes variações nos meses de Março a Maio, e portanto não influenciam negativamente nos parâmetros da qualidade de energia.

Dando continuidade à pesquisa realizada por Santiago (2017), as seções seguintes trazem uma análise mais aprofundada das taxas de distorção harmônica bem como a modelagem de um filtro passa-baixa RC que venha a corrigir os impactos observados.

4.3 ANÁLISE DAS TAXAS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

Apesar da taxa de distorção harmônica de corrente estar dentro das normas vigentes, percebe-se que seus valores ainda não são os ideais, visto que a norma só estabelece limite para quando o SFCR estiver funcionando na capacidade nominal, e que para o SFCR da UFERSA seus valores, quando o mesmo não está trabalhando na potência nominal, atingiu valores que ultrapassaram os 90%. Assim, esta seção tem por objetivo fazer uma análise mais aprofundada e posteriormente implementar um filtro para a redução e/ou amenização das harmônicas geradas pelo SFCR.

4.3.1. Análise da geração diária

Foi tomado o dia 08 de Agosto de 2015 como base para esta análise, devido ser um dia com boa insolação e assim pode-se analisar melhor o funcionamento do sistema fotovoltaico.

Na Figura 47 e Figura 48 estão ilustrados os resultados obtidos para o dia 08 com relação aos parâmetros da rede elétrica.

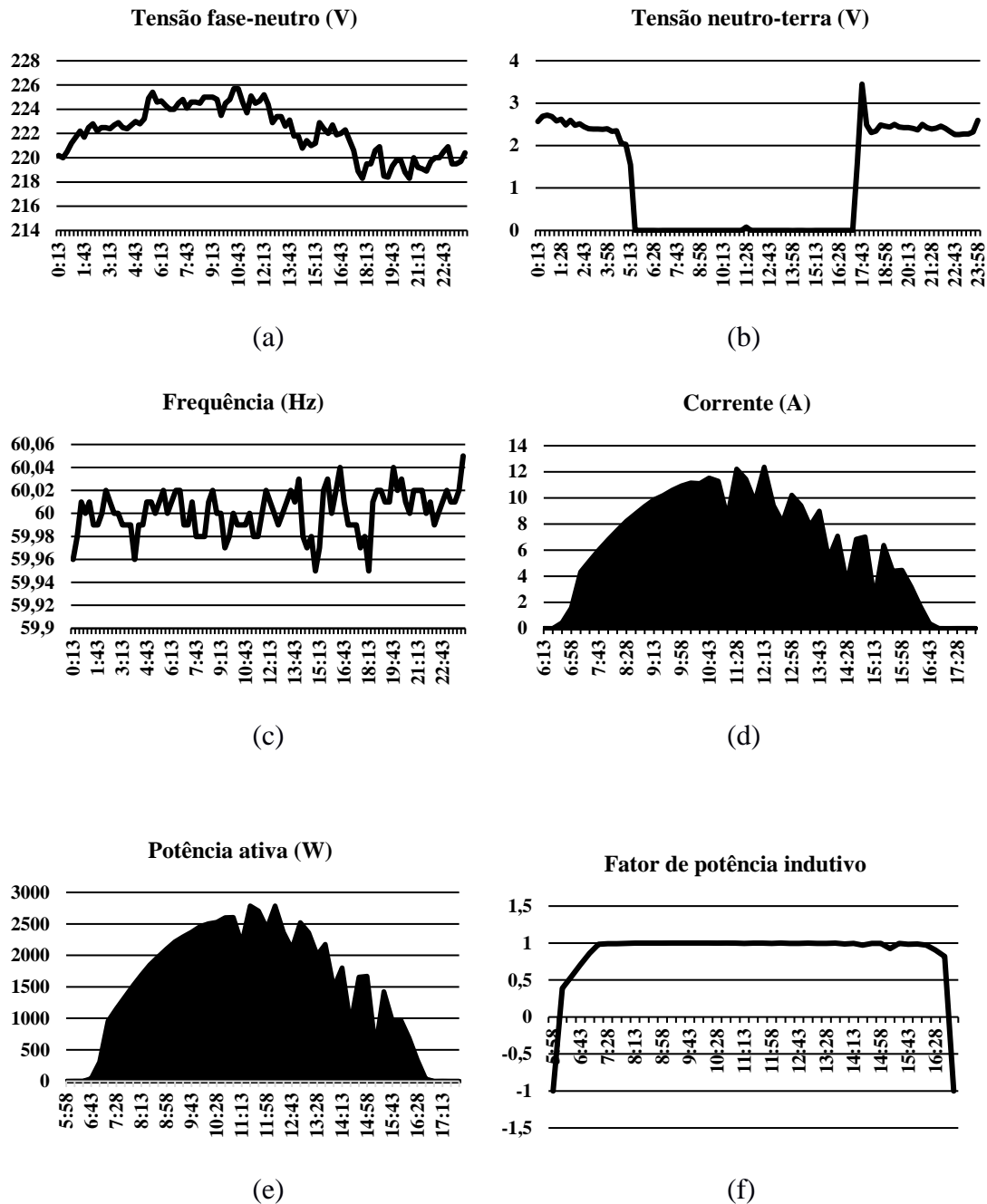


Figura 47 – Valores de tensão fase-neutro (a), tensão neutro-terra (b), frequência (c), corrente (d), potência ativa (e) e fator de potência (f), 08/08/2015.

Fonte: Autoria própria.

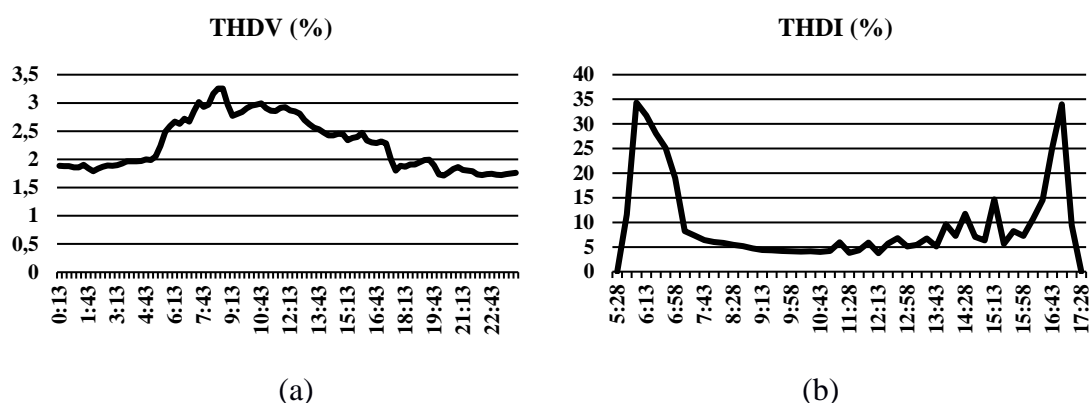


Figura 48 – Taxa de distorção harmônica para tensão (a) e corrente para corrente (b), 08/08/2015.

Fonte: Autoria própria.

A partir da análise dos dados referente à geração de energia elétrica do SFCR, como visto nas Figura 47 e Figura 48, pode-se concluir que o SFCR funciona corretamente e opera em conforme o esperado. No período de medição, o sistema apresentou uma energia ativa média gerada de 17,1 kW. Vale salientar que as quedas presentes na curva de potência durante todo o dia são devido a nebulosidade da região. Embora esse fato ocorra, a curva de potência se assemelha a curva esperada para sistema fotovoltaico.

A Figura 47 (f), correspondente ao fator de potência, que durante o horário de geração o SFCR mantém o fator de potência em 1,00, valor este que é o ideal. Para horários onde não há geração o fator de potência torna-se negativo, isso se dá pelo fato de que nesses horários o inversor passa a consumir potência da rede elétrica e, devido ao fluxo de potência ser inverso, o valor do fator de potência torna-se negativo.

Percebe-se que praticamente todos os parâmetros estão dentro dos limites exigidos pelas entidades regulamentadoras, com exceção da Taxa de Distorção Harmônica de Corrente (THDI), que no início e no fim do dia apresentou valores altos, atingindo 32%, como mostra a Figura 48 (b). O valor máximo permitido pela COSERN é de 5% quando o SFCR opera na sua potência nominal, mas para valores abaixo da potência nominal não há limites definidos por norma.

Os maiores valores de taxa de distorção harmônica de corrente ocorrem no início e fim do dia, esse fato é devido ao SFCR tentar compensar a baixa produção de energia, com isso seu sistema eletrônico gera harmônicas na rede elétrica.

4.4 PROJETO DE UM FILTRO PASSA BAIXA RC

Para corrigir o problema das harmônicas foi elaborado um projeto de filtro passa baixa RC. As harmônicas são múltiplos da frequência fundamental que nesse caso é 60Hz. As harmônicas que mais causam impacto na rede são as ímpares. Para uma frequência de corte de 180 Hz, correspondente a 3ª harmônica, o seu ganho de tensão será $GV=0,707$. Porém será escolhida uma frequência de corte de 160 Hz, fazendo com que seu ganho seja ainda menor $GV=0,66$.

Adotando um Resistor com valor de $1k\Omega$, convertendo 160Hz para rad/s e substituindo os valores na Equação 19, tem-se:

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

$$1005.31 = \frac{1}{1000 * C}$$

$$\mathbf{C = 994.718 \text{ nF}}$$

Com esses valores pode-se traçar a curva da frequência pelo ganho de tensão, como mostra a Figura 49.

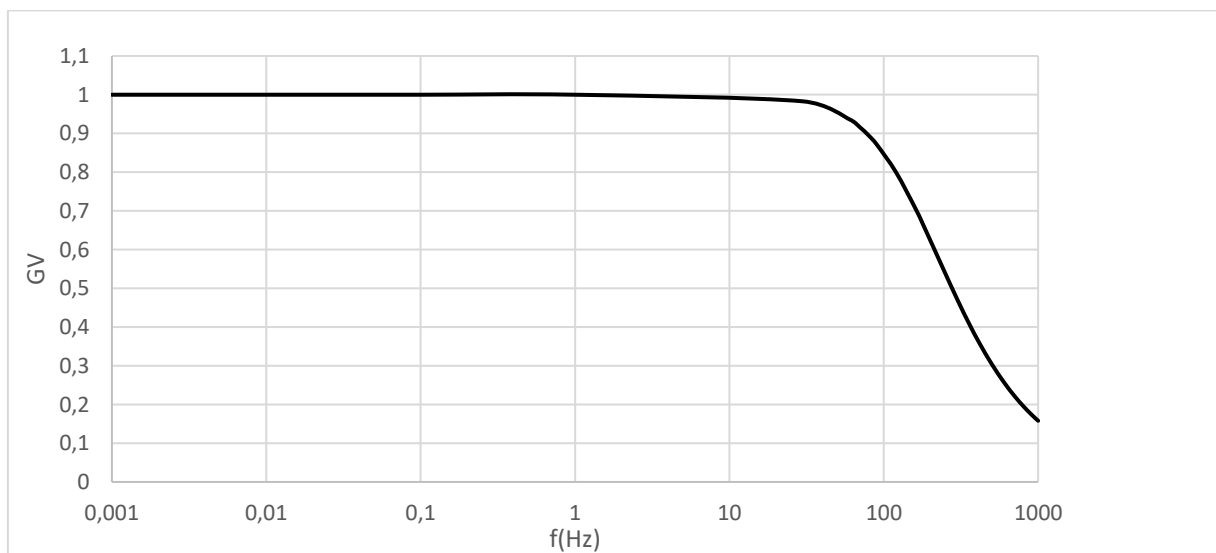


Figura 49 – Curva para o filtro passa-baixa projetado.

Fonte: Autoria própria.

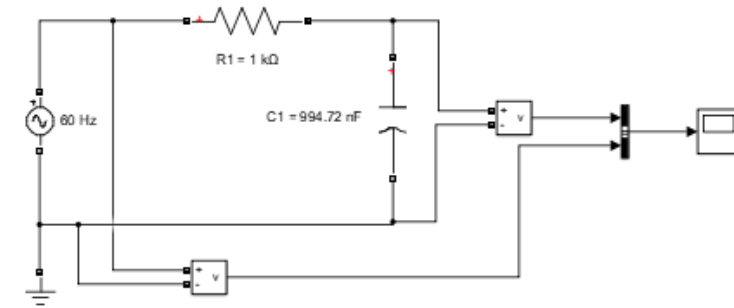
Para avaliar o comportamento do filtro, foram analisados os dados de geração referente às taxas harmônicas para o dia 08 de Agosto de 2015, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Valores médios de tensão para a as harmônicas analisadas

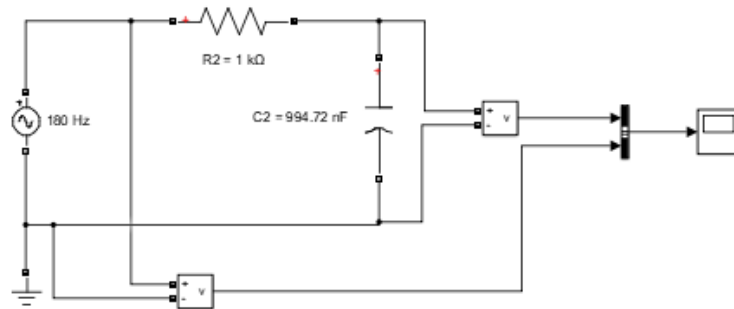
Frequência (Hz)	60	180	300	420
Tensão média (V)	223,58	0,93	5,70	1,70

Fonte: Autoria própria.

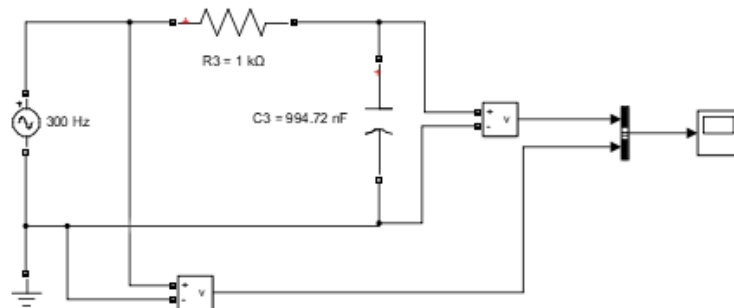
No Simulink® foi elaborado um filtro passivo passa-baixa RC com as características determinadas, como mostra a Figura 50. Logo após simulou-se o filtro para uma frequência de corte de 160Hz e verificado o comportamento quanto a frequência fundamental, 3^a, 5^a e 7^a harmônicas.



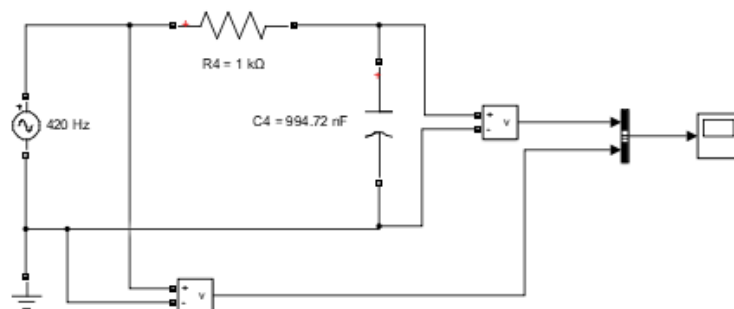
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 50 – Filtro passa-baixa RC com sinal de entrada de 60 Hz (a), 180 Hz (b), 300 Hz (c) e 420 Hz (d).

Fonte: Autoria própria.

Após a simulação foram gerados os gráficos para a frequência fundamental e para as harmônicas. A Figura 51 apresenta os sinais de entrada (V_e) e de saída (V_s). Percebe-se que há uma pequena redução no sinal da onda fundamental na saída e seu valor eficaz (RMS) foi de 209,3 V. Essa queda de tensão já era esperada, uma vez que há as perdas de tensão devido ao filtro, porém a tensão de saída se manteve em um valor satisfatório, uma vez que está dentro dos limites permitida pelas normas.

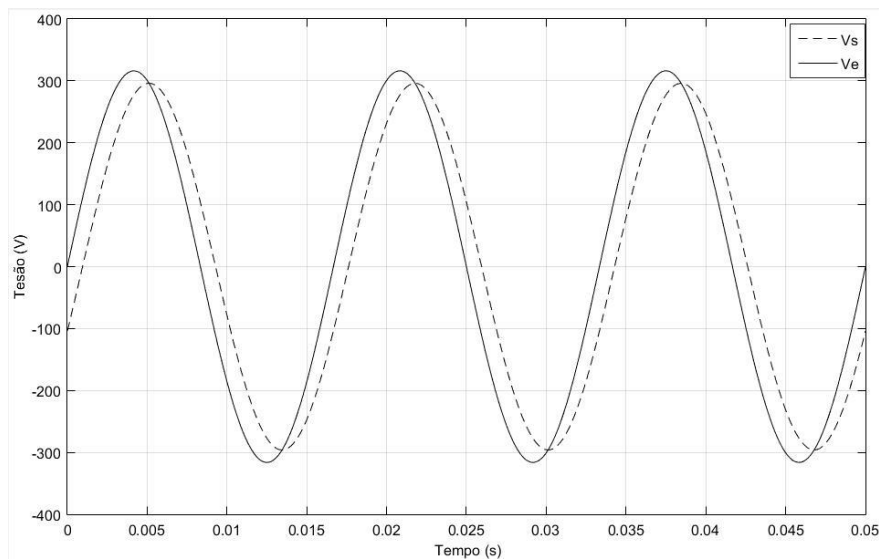


Figura 51 – Sinal de entrada e saída para 60 Hz.

Fonte: Autoria própria.

As Figura 52 a 52 apresentam os sinais de entrada e saída para a 3^a, 5^a e 7^a harmônicas.

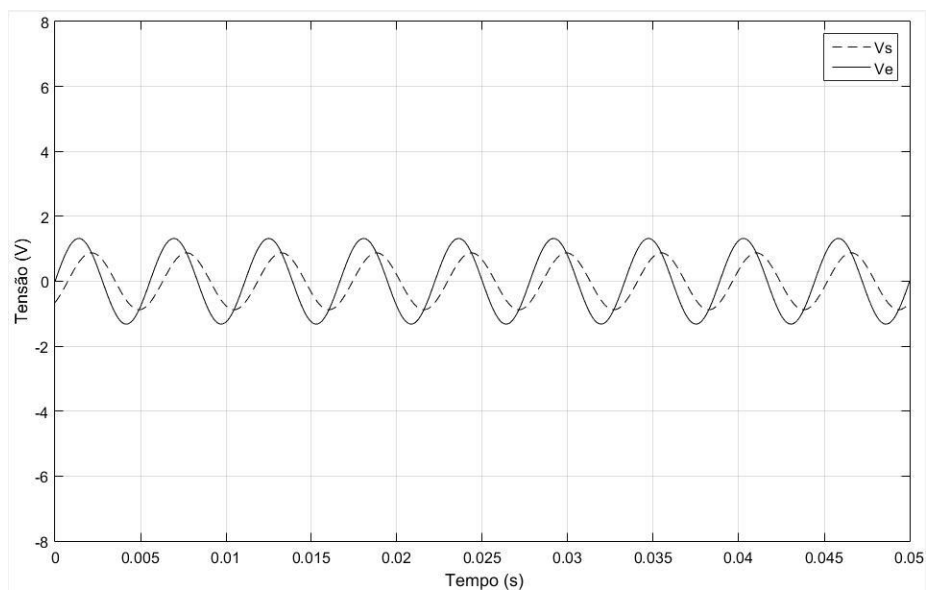


Figura 52 – Sinal de entrada e saída para 180 Hz.

Fonte: Autoria própria.

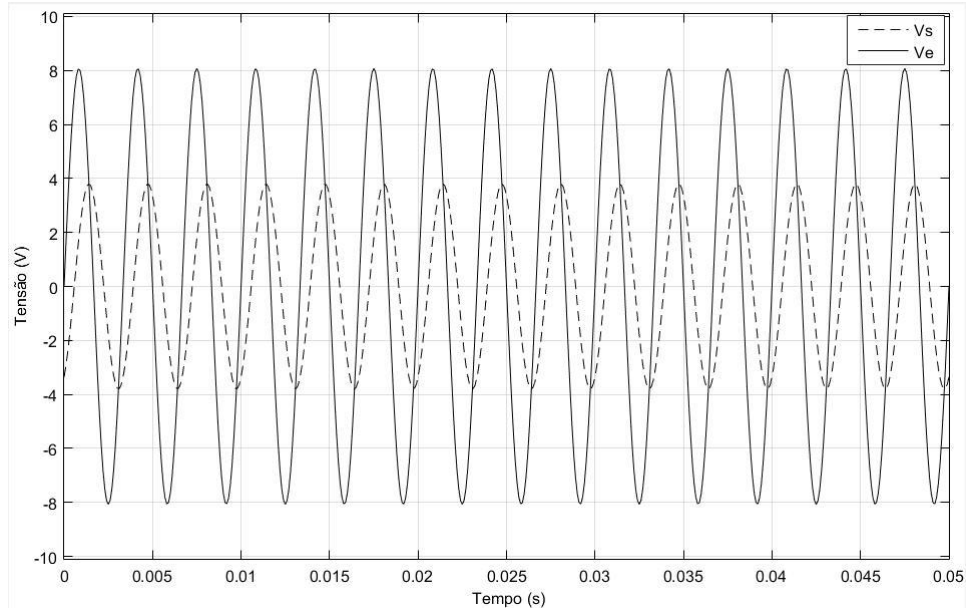


Figura 53 – Sinal de entrada e saída para 300 Hz.

Fonte: Autoria própria.

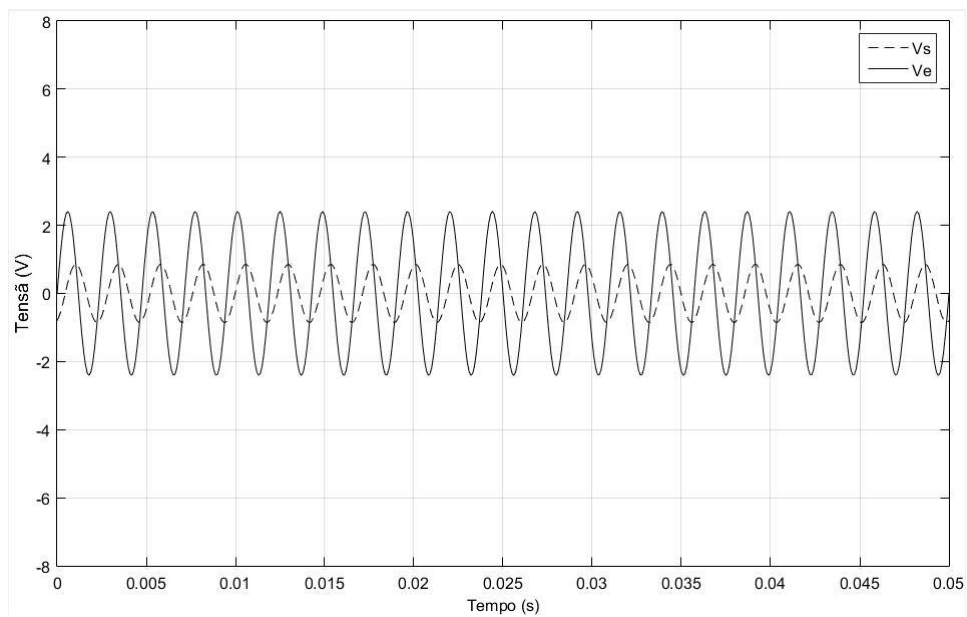


Figura 54 – Sinal de entrada e saída para 420 Hz.

Fonte: Autoria própria.

Avaliando os sinais de entrada e saída das harmônicas, pode-se perceber que as mesmas foram atenuadas em um grau bastante satisfatório. A Tabela 13 apresenta os valores eficazes do sinal de entrada e saída, bem como o nível de atenuação.

Tabela 13 – Dados dos sinais de entrada do filtro e sua respectiva atenuação

Frequência (Hz)	V_{rms} (V)	V_{srms} (V)	Atenuação (%)
60	223,58	209,3	6,39
180	0,93	0,62	33,67
300	5,70	2,69	52,83
420	1,70	0,607	64,30

Fonte: Autoria própria.

Através da Tabela 13, percebe-se mais claramente que de acordo com que a frequência aumenta, maior é a atenuação realizada pelo filtro. A 5^a harmônica, por exemplo, teve seu sinal atenuado em mais de 50%, enquanto para a 7^a harmônica esse valor chegou a 64,30%. Esse comportamento indica que para harmônicas ainda maiores, seus valores tenderão a zero.

A aplicação de um filtro passa baixa melhora a qualidade da energia elétrica, pois como visto na Seção 4.3.1, o sistema gera grandes distorções harmônicas durante o período inicial da manhã e final de tarde, principalmente taxas de distorções harmônicas de corrente. Apesar do filtro trabalhar com valores de tensão, o mesmo se aplica para a corrente, pois o filtro em si trabalha filtrando sinais de frequência, e a corrente mantém a mesma frequência da tensão. Dessa forma, a escolha em trabalhar com o sinal de tensão se deu pela facilidade em construir um sistema onde o sinal é praticamente constante ao longo do dia, caso este que não ocorre com a corrente, pois a mesma varia seu módulo de acordo com a intensidade solar.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O mundo está em um momento onde a energia solar fotovoltaica vem crescendo progressivamente. A China, por exemplo, nos últimos anos investiu bastante no setor solar e hoje ultrapassou a Alemanha, que até então era o país líder em potência solar fotovoltaica instalada. A China além do seu grande potencial de instalação também se destaca por ser a maior fabricante de painéis solares do mundo, tendo grandes empresas nacionais como a Yingli e a Jinko. O Brasil por sua vez, vem crescendo desde o ano de 2011 e conforme mencionado anteriormente possui uma potência instalada de 143,58 MW, e há projetos de expansão para mais 2,86 GW.

Por este ser um setor que cresce cada vez mais, esta presente pesquisa, teve como objetivo a análise da qualidade de energia gerada por um SFCR, assim como realizada por Santiago (2017), porém dando continuidade a seu trabalho, onde foi identificado possíveis impactos que o mesmo possa gerar na rede elétrica e a correção e/ou amenização dos mesmos. Assim, tomou-se como objeto de estudo o SFCR de 3 kWp instalado no prédio do CITED na UFERSA, onde o mesmo foi interligado a rede elétrica do prédio e pode-se coletar os dados dos parâmetros da rede. Em primeira instância, foram analisados os dados de geração do SFCR entre Agosto a Dezembro de 2015, e posteriormente foi analisada a qualidade de energia elétrica com e sem o SFCR inserido na rede.

Ao ligar o SFCR, foram detectados impactos na rede elétrica, em alguns parâmetros o impacto foi mínimo, e se manteve dentro dos valores exigidos pelas normas. Um fato interessante a ser observado é que ao conectar o SFCR, o nível de tensão elétrica se elevou em 1,38 V, esse fato já era esperado e não se caracterizou como um problema. No mês de Março o fator de potência na fase S foi de 0,94, mas nos meses de Abril e Maio ocorreu uma queda e seu valor passou a ser 0,89. Apesar dessa queda ter ocorrido, não se caracteriza um problema relacionado ao SFCR, pois o mesmo tem fator de potência de 0,99 e o fator de potência trifásico do prédio se manteve acima do valor mínimo exigido pela concessionária, que é 0,92.

Outro fato interessante a ser discutido é o fato da energia elétrica consumida pelo prédio ter diminuído durante os meses onde o SFCR estava ligado, pois como o mesmo gera energia para o prédio, o consumo da rede diminuiu. Para os meses de Abril pode-se perceber uma redução

média no consumo de cerca de 40% e 10% para o mês de Maio. Esses valores variam de acordo com a utilização do prédio, que se dá de forma diferente ao longo dos meses.

Analisando a taxa de distorção harmônica de corrente, pode-se perceber que a mesma ultrapassou os 90% durante o período da manhã, porém esse fato se deu quando o SFCR não operava na sua potência nominal. Assim para a norma, que exige um máximo de 5% na potência nominal, este parâmetro está dentro do requerido. Porém esses valores não são interessantes, uma vez que as harmônicas são prejudiciais para diversos equipamentos, desde equipamentos mais sensíveis, até equipamentos de medição que trabalham ligados a rede elétrica. Como o CITED se trata de um centro de pesquisas onde há diversos equipamentos, quanto menor os valores da taxa de distorção harmônica melhor para os usuários do prédio.

Dessa forma, foi analisado a geração do SFCR para um dia, coletando dados mais precisos, e constatou-se que durante o período onde o sistema funciona com baixa insolação (períodos da manhã e tarde) a taxa de distorção harmônica de corrente atinge valores de até 35%. Assim, foi elaborado um filtro passa-baixa RC, com o intuito de atenuar os sinais das harmônicas. Após o cálculo e simulação do filtro, pode-se perceber a atenuação de até 60% nos sinais das harmônicas. O que comprova que um filtro passa-baixa pode ser um grande aliado na melhoria da qualidade de energia do SFCR da UFERSA.

Portanto, o objetivo principal desta pesquisa, que é a realização de uma análise da qualidade de energia e a verificação/correção dos impactos causados pelo SFCR da UFERSA, foi atingido. Contudo seria interessante modelar e validar o sistema em uma plataforma computacional, como o Matlab, e fazer testes com o filtro proposto neste trabalho, para, posteriormente, utilizar um filtro real interligado ao SFCR, visando a melhoria da qualidade de energia. A modelagem e validação do sistema não puderam ser realizadas, pois o laboratório não dispõe dos equipamentos necessários para a coleta dos dados de radiação e temperatura. Desde 2014 tenta-se adquirir junto a UFERSA equipamentos como piranômetro e datalogger para a coleta dos dados, mas até o presente ano não se teve êxito. Tentou-se adquirir esses dados junto a estação meteorológica da UFERSA, apesar de vários contatos realizados, não se obteve resposta.

Para trabalhos futuros fica a sugestão da coleta de dados de temperatura e radiação, modelagem e validação do sistema e a implementação de um filtro passa-baixa para verificar e validar a melhoria na qualidade de energia proposta neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2017). **BIG – Banco de Informações de Geração**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 22 jul 2017.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2010-a). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST. Módulo 8**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_revisao_1_retificacao_1.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2016.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2012). **Resolução Normativa nº 482/2012**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2010-b). **Resolução normativa nº 414/2010**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2016.

BLASQUES, L. C. M; VALE, S. B. **Análise preliminar de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica de 12,6 kWp, instalado em um prédio comercial na cidade de Belém, estado do Pará**. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES. São Paulo, p. 8, set. 2012.

BLUE SOL. **Energia solar: como funciona? – Tipos de células fotovoltaicas**. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-tipos-de-celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 06 de jan. de 2016.

CÁCERES, M, et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados a red: estabilidad en los parámetros de la red y sus efectos en la capacidad de generación**. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, São Paulo, 2012.

CÂNDIDO, M. R. **Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco**. 2008. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, 2008.

CARVALHO, K. J. S. **Sistemas fotovoltaicos distribuídos e integrados à rede elétrica: Condições de operação e seus impactos**. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2015.

CODI - COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de orientação aos consumidores: energia reativa excedente**. Disponível em:

<<http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-bandeirante/informacoes/grandes-clientes/normas-e-manuais/Documents/Manual%20de%20Orienta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Energia%20Reativa%20Excedente.pdf>>. Acesso em: 05 de jan. de 2016.

COSERN. Conexão de minigeradores ao sistema de distribuição da Cosern. Rio Grande do Norte: COSERN, 2013. 21 p.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014.** Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: 02 de dez. de 2015.

EPIA. European Photovoltaic Industry Association. **Global Market Outlook for photovoltaics. 2016-2020.** EPIA, 2016.

FIRST SOLAR. **Topaz Solar Farm. 550MW as compared to coal and nuclear power plant output.** Disponível em: <<http://www.firstsolar.com/en/About-Us/Projects/Topaz-Solar-Farm.aspx>>. Acesso em: 12 de jan. de 2016.

GALDINO, M. A.; VISCONTI, I. F.; OLIVIERI, M. M. A. **Estudos de impactos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no sistema isolado de Parintins-AM.** IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES. São Paulo, p. 8, set. 2012.

GONZALES, P. G, et al. **Grid-Connected PV Plants. Power Quality and Technical Requirements.** In: Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2014. Anais... Rakvere: IEEE, 2014, p. 8.

IEA-PVPS (2015-a). **Annual Report 2014.** Disponível em: <<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=6>>. Acesso em: 07 de out. de 2015.

IEA-PVPS (2015-b). **Overcoming PV grid issues in the urban areas.** Disponível em: <http://www.iea-pvps-task10.org/IMG/pdf/rep10_06.pdf>. Acesso em: 09 de nov. de 2015.

IEA-PVPS (2017). **A Snapshot of Global PV Markets 2016.** Disponível em: <http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2016__1_.pdf>. Acesso em: 21 de jul. de 2017.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 720 p.

MELO, F. C. **Projeto e análise de desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão em conformidade com a resolução normativa 482 da ANEEL.** 2014. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2014.

MPX - Usina Solar Tauá. **Usina Solar Tauá.** Disponível em: <<http://www.crea-rj.org.br/wp-content/uploads/2011/12/MPX-MAUR%C3%8DCIO-MOSZKOWCZ.pdf>>. Acesso em: 12 de jan. de 2016.

MUSSOI, F. L. R. **Resposta em Frequência: Filtros Passivos**. 2. ed. Florianópolis. 2004. 86p.

NASCIMENTO, M. A. P. **Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2013.

NEXTERA ENERGY RESOURCES. **Desert Sunlight Solar Energy Center**. Disponível em: <http://webtest.nexteraenergyresources.com/pdf_redesign/desert_sunlight.pdf>. Acesso em: 12 de jan. de 2016.

PORTAL SOLAR. **Usina Solar**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html>>. Acesso em: 12 de jan. de 2016.

RAMPINELLI, G. A. **Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2010. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

Renewable Energy Sources Act (EEG 2014). Disponível em: <<http://www.bmwi.de/English/Redaktion/Pdf/renewable-energy-sources-act-ee-2014,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=en,rwb=true.pdf>>. Acesso em: 07 de out. de 2015.

RONEY, J. M. World Solar Power Topped 100,000 Megawatts in 2012. Disponível em: <http://www.earthpolicy.org/indicators/C47/solar_power_2013>. Acesso em: 23 mai. 2015.

SANTIAGO, G. L. **Microgeração Solar Fotovoltaica Conectada À Rede: Análise Da Qualidade Da Energia**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2017.

SMART SOLAR. **As top 10 maiores usinas solares do mundo**. Disponível em: <<http://www.smartsolar.com.br/news/top-10-maiores-usinas-solares-do-mundo/>>. Acesso em: 12 de jan. de 2016.

SUNPOWER. **California Valley Solar Ranch**. Disponível em: <<http://us.sunpower.com/sites/sunpower/files/media-library/fact-sheets/fs-california-valley-solar-ranch-factsheet.pdf>>. Acesso em: 12 de jan. de 2016.

TIBA, C, et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Solarimétricos**. Recife: Ed. Universitária da UFP, 2000. 111 p.

TRACTEBEL ENERGIA. **Maior usina solar do Brasil entra em operação comercial**. Disponível em: <http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/imprensa/press-release/conteudos/Release_Operacao_Usina_Solar>. Acesso em: 12 de jan. de 2016.

VERA, L.H. **Programa para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

VIEIRA, R. G. Análise comparativa do desempenho entre um painel solar estático e com rastreamento no município de Mossoró-RN. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2014.