



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

GREGORY LUID SOUZA SANTIAGO

**MICROGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE: ANÁLISE DA  
QUALIDADE DA ENERGIA**

MOSSORÓ

2017

GREGORY LUID SOUZA SANTIAGO

**MICROGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE: ANÁLISE DA  
QUALIDADE DA ENERGIA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Linha de Pesquisa: Controle e Sistemas de Energia

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr. Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra

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

MOSSORÓ

2017

©Todos os direitos estão reservados à 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 tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

S235m Santiago, Gregory Luid Souza.  
Microgeração Solar Fotovoltaica Conectada à Rede: Análise da Qualidade de Energia / Gregory Luid Souza Santiago. - 2017.  
80 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. Geração Distribuída. 2. Energia Solar Fotovoltaica. 3. Sistemas fotovoltaicos. 4. Medição de energia elétrica. I. Guerra, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella, orient. II. Guerra Vale, Marcelo Roberto Bastos, co-orient. III. Título.

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.

GREGORY LUID SOUZA SANTIAGO

**MICROGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE: ANÁLISE DA  
QUALIDADE DA ENERGIA**

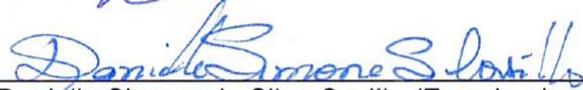
Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Linha de Pesquisa: Controle e Sistemas de Energia

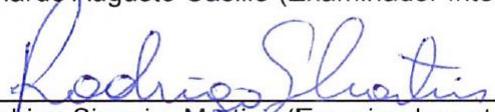
Defendida em: 21 / 02 / 2017.

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale (Presidente e coorientador)

  
Profa. Dra. Daniëlle Simone da Silva Casillo (Examinadora Interna- UFERSA)

  
Prof. Dr. Leonardo Augusto Casillo (Examinador Interno - UFERSA)

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

## AGRADECIMENTOS

Ao meu Criador e Salvador, toda honra e toda glória hoje e eternamente. Te agradeço Jesus pelo pão de cada dia, pelo privilégio de poder respirar, andar, comer e ter uma vida abençoada. Te louvo por mais uma etapa que me conduziste e ajudaste a finalizar. Muito obrigado Senhor. À minha família que sem medir esforços me apoiam e me incentivam a ser todo dia um homem melhor. Em especial, quero agradecer aos meus pais, tudo que conquistei e tudo que sou e serei devo a vocês. Nunca conseguirei pagar por tudo que fizestes por mim. Quero agradecer imensamente a minha esposa Debora Santiago, pelas noites que dormiu só, enquanto eu estava a estudar. Pelos “puxões” de orelha nos momentos que me vi desmotivado e aflito. Pelo constante incentivo e pelas palavras: “vai dar certo, você consegue...” Quero dizer que você é também autora deste trabalho, sem você não conseguiria jamais. Te Amo! Agradeço também a todos amigos, que direta ou indiretamente contribuiu para a concretização deste trabalho, seja em oração, em torcida, estudando juntos... a vocês meus sinceros agradecimentos. Ao meu companheiro de pesquisa Isaú Macêdo, que contribuiu de forma gigantesca no decorrer deste trabalho, foram dois anos trabalhando juntos e sou imensamente grato pelo seu companheirismo e força. Quero também deixar meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores, os Professores Fabiana Varela e Marcelo Guerra, por toda a paciência e apoio para que pudesse desenvolver este trabalho, pelas palavras de incentivo, por todo conhecimento compartilhado durante todo este tempo trabalhando juntos, no caso, de Fabiana Varela, quero reforçar que tem sido uma das bases da minha vida acadêmica, pois tem sido minha orientadora desde o início de minhas pesquisas... caramba já são mais de 5 anos de orientação já... uma vida! Agradeço mais uma vez por todo o tempo dispensado para me ajudar e impulsionar, no sentido do meu crescimento acadêmico. Meu muito obrigado!

## RESUMO

Os sistemas fotovoltaicos distribuídos possuem atualmente um grande potencial de crescimento, devido a diversos fatores que o tornam bastante atraentes, dentre eles: paridade tarifária sendo alcançada nos próximos anos em alguns países, redução dos custos de instalação, incentivos governamentais, regulação do setor, entre outros. Por tratar-se de tipos de sistemas relativamente novos, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no intuito de estudar o comportamento de um sistema de geração fotovoltaica distribuída, conectado à rede elétrica de distribuição. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar o impacto gerado na qualidade de energia pela instalação de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) instalado na UFERSA, localizada em Mossoró/RN. Através da avaliação dos principais parâmetros de qualidade de energia gerados pelo SFCR verificou-se que a instalação de um sistema fotovoltaico distribuído conectado em baixa tensão provoca pequenas alterações em alguns parâmetros, tais como: elevação na tensão de regime permanente, redução do fator de potência da instalação e acréscimo no valor da taxa de distorção harmônica total de corrente. No trabalho em questão, todas as variações constatadas não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas normas vigentes. Constatou-se, ainda, que a instalação do SFCR provocou redução diária de até 38% na energia ativa média consumida, considerando a fase na qual o sistema está interconectado.

**Palavras-chave:** Geração Distribuída. Energia Solar Fotovoltaica. Sistemas fotovoltaicos. Medição de energia elétrica.

## **ABSTRACT**

*Distributed photovoltaic systems currently have a great potential for growth, due to several factors that make it quite attractive, among them: tariff parity reached in the coming years in some countries, reduction of installation costs, government incentives, and sector regulation, among others. Since these are relatively new types of systems, many researches have been carried out to study the behavior of a distributed photovoltaic generation system connected to the distribution grid. In this sense, the main objective of this work is to analyze the impact generated in energy quality by the installation of a Grid-Connected Photovoltaic System (GCPV) installed in UFERSA, located in Mossoró/RN. Through the evaluation of the main parameters of energy quality generated by the GCPV, it was verified that the installation of a distributed photovoltaic system connected at low voltage causes small changes in some parameters, such as elevation in the steady state voltage, reduction of the power factor of the installation and increase in the value of the total harmonic distortion rate of current. In the work in question, all variations found did not exceed the limits established by the current regulations. It was also verified that the installation of the GCPV caused a daily reduction of up to 38% in the average active energy consumed, considering the phase in which the system is interconnected.*

**Keywords:** *Distributed generation. Photovoltaic Solar Energy. Photovoltaic systems. Measurement of electrical energy.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada mundial acumulada em sistemas fotovoltaicos, de 2000 a 2015. Fonte: Adaptada de EPIA, 2016. ....	15
Figura 2 - Componentes da radiação solar no plano inclinado. Fonte: Wanderley, 2013. ....	20
Figura 3 - Aproveitamento da energia solar. Fonte: Adaptada de Vera, 2004 e Wanderley, 2013. ....	20
Figura 4 - Módulo fotovoltaico 260Wp, 60 células, marca <i>Canadian Solar</i> , modelo CS6P-260P. Fonte: <i>Canadian Solar</i> (2016).....	23
Figura 5 - Caixa de conexões elétricas de um módulo fotovoltaico, com destaque para um dos diodos de <i>by-pass</i> . Fonte: Oliveira, 2015. ....	24
Figura 6 – Dez maiores países em capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos até 2015. Fonte: adaptada de EPIA, 2016. ....	25
Figura 7 - Evolução da capacidade de sistemas fotovoltaicos instalados anualmente no mundo, de 2000 a 2015. Adaptada de EPIA, 2016. ....	25
Figura 8 - Paridade tarifária para o segmento residencial em números relativos para todas as regiões do mundo, nos anos 2010 a 2020. Fonte: Adaptada de Breyer e Gerlach, 2013. ....	26
Figura 9 - Paridade tarifária para o segmento industrial em números relativos para todas as regiões do mundo, nos anos 2010 a 2020. Fonte: Adaptada de Breyer e Gerlach, 2013. ....	27
Figura 10 - Cenário global de capacidade instalada anual até 2020. Fonte: Adaptada de EPIA, 2016. ....	27
Figura 11 – Cenário dos 20 maiores países em capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos em 2020. Fonte: Adaptada de EPIA, 2016. ....	28
Figura 12 - Capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos cadastrados no leilão de energia reserva de 2014, em MW. Fonte: EPE, 2014.....	29
Figura 13 - Empreendimentos fotovoltaicos habilitados e vendedores (potência agrupada por município). Fonte: Adaptada de EPE, 2014. ....	29
Figura 14 - Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos distribuídos e dos custos dos sistemas. Fonte: Adaptada de EPE, 2014. ....	30
Figura 15 - Potencial técnico de geração solar fotovoltaica em telhados residenciais por estado, em GWh/dia. Fonte: EPE, 2014. ....	31
Figura 16 - Potencial técnico fotovoltaico versus consumo residencial (ano base 2013) por estado. Fonte: EPE, 2014.....	32
Figura 17 - Sistema de micro ou minigeração fotovoltaico conectado à rede, com sistema de	

medição bidirecional (a) e unidirecional (b). Fonte: Autoria própria, 2016.....	34
Figura 18 - Módulos fotovoltaicos YL245P - 29b, <i>Yingli Solar</i> . Fonte: Autoria própria, 2015 .....	38
Figura 19 - Inversor e disjuntor de proteção do SFCR. Fonte: Autoria própria, 2015.....	39
Figura 20 – Quadros QDT (a) e QGBT (b) do CITED.....	39
Figura 21 - Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico conectado à rede.....	40
Figura 22 – Modelo elétrico equivalente de cinco parâmetros de uma célula fotovoltaica. Fonte: Firman, 2011.....	41
Figura 23 – Analisador de energia ET-5061C. Fonte: MINIPA, 2015. ....	43
Figura 24 - Modelagem no SIMULINK para o SFCR de 3kW da UFERSA. Fonte: Adaptado de MATLAB, 2016. ....	45
Figura 25 – Medição dos parâmetros elétricos de geração do SFCR na saída do inversor. Fonte: Autoria própria, 2015. ....	46
Figura 26 – Tensão elétrica fase-neutro, Agosto/2015. ....	49
Figura 27 – Tensão elétrica fase-neutro, Setembro/2015. ....	49
Figura 28 – Tensão elétrica fase-neutro, Outubro/2015. ....	49
Figura 29 – Tensão elétrica fase-neutro, Novembro/2015.....	50
Figura 30 – Tensão elétrica fase-neutro, Dezembro/2015.....	50
Figura 31 - Tensão elétrica neutro-terra, Agosto/2015. ....	51
Figura 32 – Tensão elétrica neutro-terra, Setembro/2015. ....	52
Figura 33 – Tensão elétrica neutro-terra, Outubro/2015. ....	52
Figura 34 – Tensão elétrica neutro-terra, Novembro/2015.....	52
Figura 35 – Tensão elétrica neutro-terra, Dezembro/2015.....	53
Figura 36 – Frequência elétrica da rede, Agosto/2015. ....	53
Figura 37 – Frequência elétrica da rede, Setembro/2015.....	54
Figura 38 – Frequência elétrica da rede, Outubro/2015. ....	54
Figura 39 – Frequência elétrica da rede, Novembro/2015. ....	54
Figura 40 – Frequência elétrica da rede, Dezembro/2015.....	55
Figura 41 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Agosto/2015. ....	56
Figura 42 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Setembro/2015. ....	56
Figura 43 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Outubro/2015. ....	57
Figura 44 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Novembro/2015. ....	57
Figura 45 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Dezembro/2015.....	57
Figura 46 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Agosto/2015. ....	58

Figura 47 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Setembro/2015. ....	58
Figura 48 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Outubro/2015. ....	59
Figura 49 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Novembro/2015.....	59
Figura 50 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Dezembro/2015. ....	59
Figura 51 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Agosto/2015. ....	60
Figura 52 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Setembro/2015. ....	60
Figura 53 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Outubro/2015. ....	61
Figura 54 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Novembro/2015. ....	61
Figura 55 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Dezembro/2015.....	61
Figura 56 – Fator de potência indutivo, Agosto/2015. ....	62
Figura 57 – Fator de potência indutivo, Setembro/2015. ....	62
Figura 58 – Fator de potência indutivo, Outubro/2015. ....	63
Figura 59 – Fator de potência indutivo, Novembro/2015. ....	63
Figura 60 – Fator de potência indutivo, Dezembro/2015.....	63
Figura 61 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Agosto/2015. ....	64
Figura 62 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Setembro/2015. ....	64
Figura 63 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Outubro/2015. ....	65
Figura 64 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Novembro/2015. ....	65
Figura 65 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Dezembro/2015.....	65
Figura 66 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Agosto/2015. ....	66
Figura 67 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Setembro/2015. ....	66
Figura 68 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Outubro/2015. ....	67
Figura 69 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Novembro/2015.....	67
Figura 70 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Dezembro/2015. ....	67
Figura 71 - Medição de parâmetros elétricos trifásicos da rede elétrica do CITED. Fonte: Autoria própria, 2016. ....	68
Figura 72 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da tensão elétrica – fase S.....	70
Figura 73 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da tensão elétrica neutro- terra.....	71
Figura 74 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da frequência elétrica da rede – fase S.....	71
Figura 75 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da corrente elétrica consumida – fase S.....	71

Figura 76 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da potência ativa consumida – fase S. ....	72
Figura 77 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da energia ativa consumida – fase S. ....	72
Figura 78 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado do fator de potência da rede – fase S. ....	73
Figura 79 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da taxa de distorção harmônica de tensão (THDV) – fase S. ....	73
Figura 80 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da taxa de distorção harmônica de corrente (THDI) – fase S. ....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resposta às condições anormais de tensão. Fonte: COSERN (2016). .....	35
Tabela 2 – Limites para o fator de potência em sistemas de microgeração. Fonte: COSERN (2016). .....	36
Tabela 3 - Dias sem medição dos dados analisados por problemas técnicos. ....	47
Tabela 4 – Média dos valores médios diários dos parâmetros elétricos medidos no ponto de conexão do SFCR, exceto a energia ativa. ....	47
Tabela 5 – Desvios padrão dos valores médios diários dos parâmetros elétricos medidos no ponto de conexão do SFCR. ....	48
Tabela 6 - Anomalia na tensão neutro-terra verificada em 06/08/2015.....	51
Tabela 7 – Média dos valores médios diários dos parâmetros elétricos medidos no QGBT para a fase S, exceto a energia ativa. ....	69
Tabela 8 – Desvios padrão dos valores médios diários dos parâmetros elétricos medidos no QGBT para a fase S. ....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APAC – Ásia-Pacífico, exceto China

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CITED – Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido

COSERN – Companhia Energética do Rio Grande do Norte

Ea – Energia ativa

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPIA – *European Photovoltaic Industry Association*

F – Frequência

FPI – Fator de potência indutivo

I – Corrente elétrica

IEA – *International Energy Agency*

LER – Leilões de energia reserva

Max - Máximo

MEA – Oriente Médio e África

Min - Mínimo

MPPT – *Maximum Power Point Tracking* (Seguimento do ponto de máxima potência)

P – Potência ativa

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

QDT – Quadro de distribuição térreo

QGBT – Quadro geral de baixa tensão

REN – Resolução Normativa

RoW – Resto do Mundo

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

THDV – Taxa de distorção harmônica total de tensão

THDI – Taxa de distorção harmônica total de corrente

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

V – Tensão elétrica

VNPE – Tensão neutro-terra

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1. Justificativa</b> .....	16
<b>1.2. Objetivos</b> .....	17
1.2.1. Objetivo Geral .....	17
1.2.2. Objetivos Específicos .....	17
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
<b>2.1. Energia solar fotovoltaica</b> .....	19
<b>2.2. Sistemas fotovoltaicos</b> .....	21
<b>2.3. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (sfcf)</b> .....	22
2.3.1. Componentes de um SFCR.....	22
2.3.2. Panorama dos SFCR's .....	25
<b>2.4. Geração distribuída (micro e minigeração) e sistema de compensação de energia</b> .....	32
<b>2.5. Aspectos de qualidade de energia para conexão de um SFCR à rede</b> .....	35
2.5.1. Tensão em regime permanente .....	35
2.5.2. Frequência .....	35
2.5.3. Fator de potência .....	36
2.5.4. Harmônicos.....	36
<b>2.6. Trabalhos desenvolvidos</b> .....	36
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	38
<b>3.1. Descrição do SFCR instalado na UFERSA – Mossoró/RN</b> .....	38
<b>3.2. Modelo do sistema fotovoltaico conectado à rede</b> .....	41
<b>3.3. Procedimento de medição dos dados de geração do SFCR em operação</b> .....	42
<b>3.4. Procedimento de medição dos dados da rede elétrica</b> .....	43
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	44
<b>4.1. Modelagem e simulação do modelo do SFCR</b> .....	44
<b>4.2. Análise da qualidade de energia gerada pelo SFCR</b> .....	46
4.2.1. Tensão fase-neutro .....	48
4.2.2. Tensão neutro-terra .....	50
4.2.3. Frequência elétrica.....	53
4.2.4. Corrente elétrica, potência ativa e Energia ativa .....	55
4.2.5. Fator de potência .....	62
4.2.6. Taxa de distorção harmônica total de tensão – THDV (%) .....	64
4.2.7. Taxa de distorção harmônica total de corrente – THDI (%).....	66
<b>4.3. Análise do impacto da inserção do SFCR na rede elétrica</b> .....	68

<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>
<b>5.1. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de energia solar vem crescendo de forma substancial no mundo inteiro. Parte disso deve-se ao fato do recurso solar ser uma fonte renovável de energia e possuir um grande potencial de aproveitamento em quase todas as regiões do planeta. Dentre as possibilidades de utilização desta forma de energia abundante, a que vem ganhando destaque mundial é a energia solar fotovoltaica. Segundo (EPIA, 2016) a capacidade instalada mundial de sistemas fotovoltaicos alcançou 229,3GW<sub>p</sub> no ano de 2015, sendo que mais de 95% destes sistemas são Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica – SFCR. O grande crescimento observado deve-se em parte aos programas de incentivo à fonte solar fotovoltaica, desenvolvidos em países como Alemanha, Espanha, Japão, Estados Unidos, entre outros. A Figura 1 mostra a evolução da capacidade instalada mundial acumulada de sistemas fotovoltaicos, nos anos de 2000 a 2015.

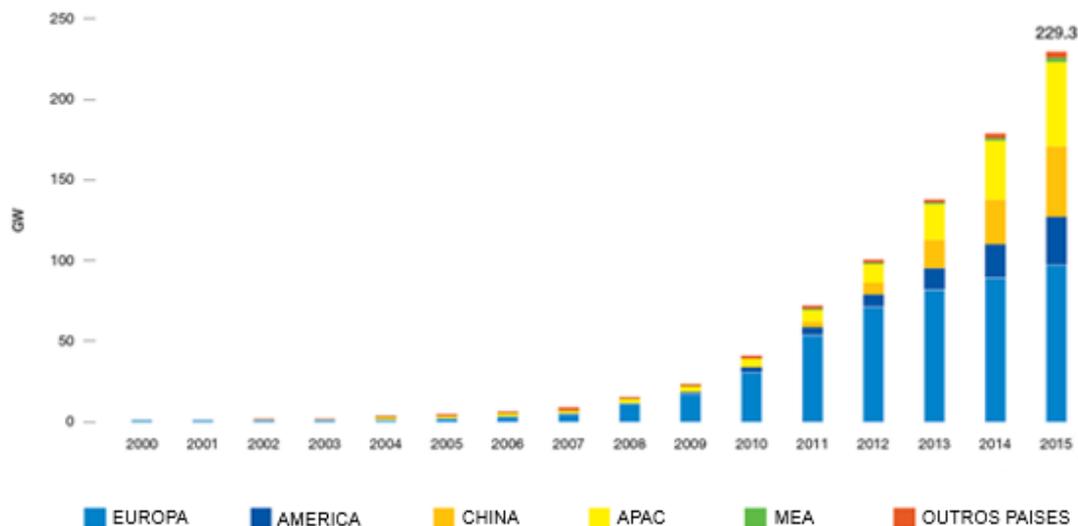


Figura 1 - Evolução da capacidade instalada mundial acumulada em sistemas fotovoltaicos, de 2000 a 2015. Fonte: Adaptada de EPIA, 2016.<sup>1</sup>

Internacionalmente, verifica-se o benefício alcançado pela adoção de políticas públicas na promoção das energias renováveis, constatado pelo expressivo crescimento da energia solar fotovoltaica. Na China, por exemplo, no ano de 2013 houve um crescimento de 340% em relação a 2012, saltando de 3,5 para 11,8GW, tornando-se o país com maior potência instalada em sistemas fotovoltaicos, e, no ano de 2015, alcançou a marca de 43,5GW, correspondente a 19% de toda a capacidade instalada em energia solar fotovoltaica no mundo (EPIA, 2016).

1

APAC: Ásia-Pacífico, exceto China; MEA: Oriente Médio e África.

O Brasil, por sua vez, possui um valor muito baixo de potência instalada em sistemas fotovoltaicos, quando comparado com os países do topo do *ranking*, como, por exemplo, China, Alemanha, Estados Unidos, etc. No entanto, estima-se que o maior crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil nos próximos anos seja através da geração distribuída, possibilitado pela regulação de micro e minigeradores conectados à rede. Isto deve-se ao fato da implementação da Resolução Normativa (REN) N° 482/2012 da ANEEL, recentemente alterada para a REN N° 687/2015, que estabelece as condições para que sistemas de geração distribuídos de até 5MW tenham acesso ao sistema de distribuição, injetando na rede a energia elétrica excedente gerada, através do sistema de compensação de energia (ANEEL, 2015).

Outro aspecto importante a ser analisado no crescimento de uma tecnologia relativamente nova no Brasil é com relação aos requerimentos técnicos de funcionamento do SFCR, no que tange à qualidade de energia, segurança e proteção. Diversos trabalhos desenvolvidos no Brasil e no mundo mostram dificuldades técnicas encontradas com relação ao funcionamento de SFCR, principalmente com relação à adequação do sistema à rede elétrica conectada.

Sendo assim, este trabalho busca realizar um estudo de qualidade de energia para um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição, verificando os principais problemas de conexão e funcionamento de um SFCR na região semiárida do Rio Grande do Norte, mais especificamente, na Cidade de Mossoró.

### **1.1. Justificativa**

Embora seja constatada uma crescente demanda mundial e nacional por sistemas fotovoltaicos conectados à rede, principalmente através dos sistemas de micro e minigeradores, algumas questões técnicas relativas à qualidade da energia injetada à rede ainda estão sendo estudadas, sobretudo formas de corrigir problemas de incompatibilidade entre o SFCR e a rede elétrica de distribuição.

Desta forma, pode-se citar como motivação deste trabalho, a possibilidade de constatação e correção de algum problema relacionado à qualidade da energia injetada na rede pelos SFCR.

## **1.2. Objetivos**

O presente item exhibe o objetivo geral do trabalho e também os objetivos específicos que permitiram lograr êxito no objetivo geral proposto.

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Promover um estudo de qualidade de energia e funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede de 3kW, instalado no prédio do CITED (Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido), localizado no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar coleta de dados da radiação solar direta incidente sobre o módulo e temperatura da célula;
- Modelar o sistema fotovoltaico conectado à rede em estudo para análise da potência injetada na rede pelo SFCR;
- Medir os parâmetros da rede elétrica do prédio do CITED antes da instalação do SFCR, utilizando um analisador de energia elétrica;
- Instalar o analisador de energia elétrica para medição dos parâmetros da rede elétrica nos terminais de saída do inversor do SFCR;
- Analisar a qualidade de energia gerada pelo SFCR através do inversor de corrente;
- Avaliar a potência injetada na rede pelo sistema, comparando com a potência gerada pelos módulos.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, onde é apresentada a revisão da literatura necessária para desenvolvimento deste trabalho, a metodologia utilizada para alcançar o objetivo geral e os principais resultados encontrados, além da introdução do trabalho constante no presente capítulo.

O Capítulo 2 mostra o referencial teórico necessário para embasamento no desenvolvimento deste trabalho, descrevendo brevemente o funcionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o panorama histórico desta tecnologia e os conceitos e aspectos principais de requisitos de qualidade de energia normatizados para sistemas de microgeração de energia elétrica.

No Capítulo 3 apresentam-se a metodologia de desenvolvimento do modelo matemático do SFCCR estudado e métodos de medição dos parâmetros elétricos para análise da qualidade de energia e impacto do SFCCR na rede elétrica da UFERSA.

O Capítulo 4, por sua vez, traz os principais resultados obtidos na análise de qualidade de energia do SFCCR e do impacto causado pela inserção do sistema na rede elétrica. Apresenta também os resultados da elaboração do modelo matemático para o sistema fotovoltaico e as simulações realizadas.

Por fim, no Capítulo 5 são expostas as conclusões obtidas e sugestões para realizações de trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

O presente capítulo apresenta a conceituação sobre energia solar, mais especificamente energia solar fotovoltaica, seus componentes e o panorama atual dos SFCR's no mundo e no Brasil. Também são elencados os principais conceitos relacionados à qualidade de energia para sistemas de microgeração fotovoltaica. Além disso, discute-se trabalhos semelhantes já desenvolvidos, contextualizando a pesquisa proposta neste trabalho.

### 2.1. Energia solar fotovoltaica

O Sol é considerada a principal fonte de energia do planeta Terra, sendo responsável pela formação de diversas outras formas de energia advindas desta tão importante fonte, além de ser um dos grandes responsáveis pela manutenção da vida na Terra. Calcula-se que a potência total disponibilizada pelo Sol à projeção do globo terrestre, no topo da atmosfera, é cerca de 174 mil TW/h. Na superfície terrestre, devido a atenuações e interações da radiação solar com a atmosfera terrestre (formada por gases, água e partículas suspensas), a potência solar incidente sobre a superfície terrestre diminui para 94 mil TW/h (Torres, 2015). Ainda assim, essa quantidade de energia disponibilizada seria suficiente para fornecer toda a demanda mundial de energia primária em 2015 em menos de duas horas, que foi de 152 mil TWh, conforme o *BP Energy Outlook 2035* (BP, 2016).

Devido às interações entre radiação solar emitida pelo Sol e a atmosfera terrestre pode-se decompor a radiação solar incidente em radiação direta e radiação difusa. A radiação solar direta é aquela que incide diretamente sobre o ponto observado, sem sofrer alterações, mudança de direção ou refração atmosférica. Já a componente difusa é a parcela da radiação que incide no ponto após sofrer reflexões e espalhamentos na atmosfera terrestre. À soma destes dois componentes dá-se o nome de radiação solar global (Wanderley, 2013). Quando o ponto de observação da radiação solar estiver inclinado em relação ao eixo horizontal, surge uma terceira componente da radiação global, denominado albedo. Este componente representa a radiação solar refletida pelo ambiente de entorno, tais como árvores, solo, rochas (Torres, 2015). Assim, conclui-se que a radiação solar global pode ser calculada conforme a Equação 1. A Figura 2 ilustra a composição da radiação solar incidente em um plano inclinado.

$$G_{global} = G_{direta} + G_{difusa} + G_{albedo} \quad (1)$$

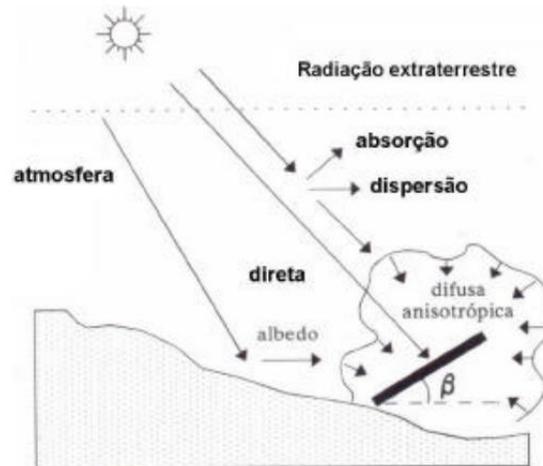


Figura 2 - Componentes da radiação solar no plano inclinado. Fonte: Wanderley, 2013.

Existem diversas formas de aproveitamento da energia solar para geração de energia, que podem ser subdivididas conforme o processo de conversão da energia solar e a forma de energia convertida final (energia elétrica ou térmica). A Figura 3 traz os principais processos de utilização da energia solar para geração de energia.

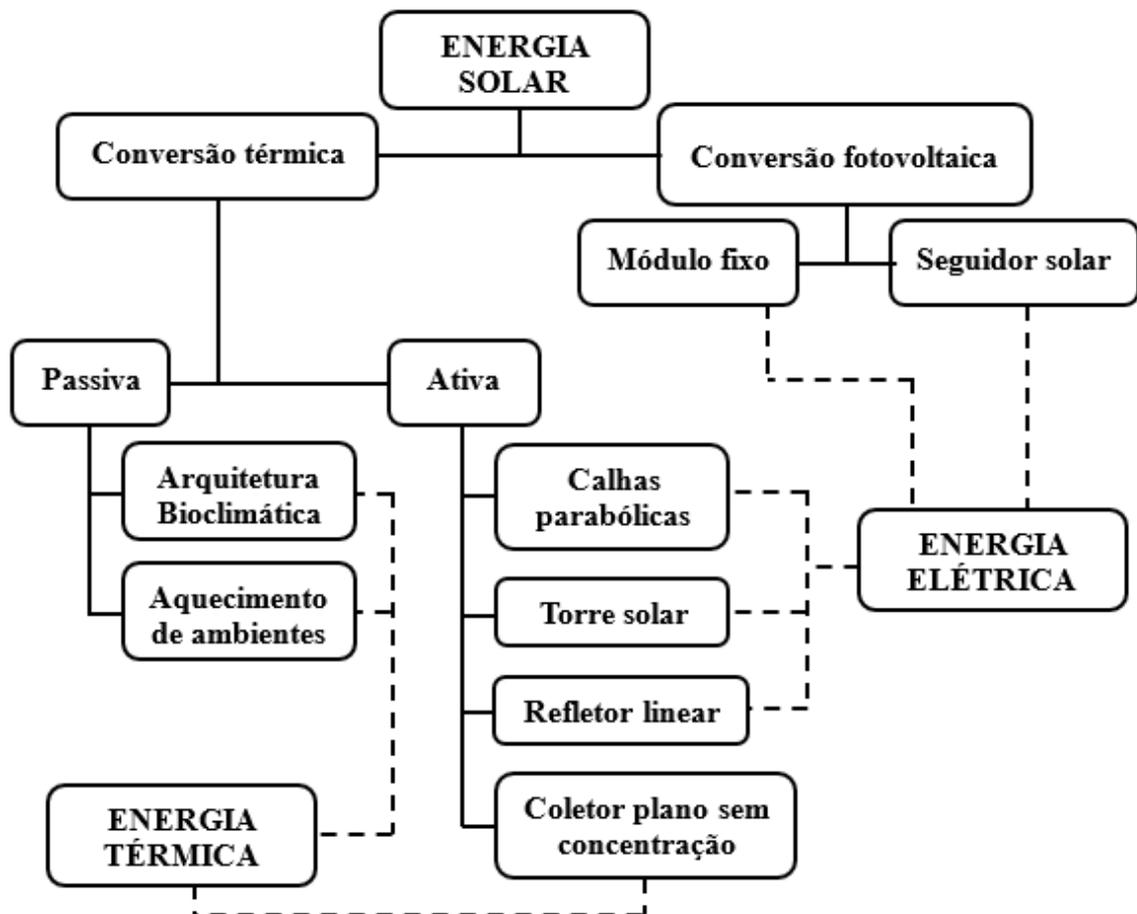


Figura 3 - Aproveitamento da energia solar. Fonte: Adaptada de Vera, 2004 e Wanderley, 2013.

A conversão térmica da energia solar que pode ser destacada é o sistema de coletor plano sem concentração, que transforma a radiação solar em energia térmica para aquecimento de água, bastante utilizado em sistemas residenciais e comerciais, em substituição do chuveiro elétrico e/ou aquecedores à gás, por exemplo.

Como possibilidade de conversão em energia elétrica, os sistemas fotovoltaicos surgem como um dos processos que podem ser considerados mais promissores, devido à sua modularidade, confiabilidade, capacidade de instalação descentralizada (microgeração e minigeração), baixa manutenção, entre outros (Vera, 2004). Os sistemas fotovoltaicos utilizam como princípio de funcionamento o efeito fotovoltaico para conversão direta da energia solar em energia elétrica.

Este fenômeno físico, denominado efeito fotovoltaico, foi descoberto no ano de 1839 por Edmund Bequerel, sendo utilizado e difundido apenas na década de 50, nos Estados Unidos, com maior aplicação nas aplicações espaciais (Vera, 2004). O efeito ocorre em materiais semicondutores, denominadas células fotovoltaicas, principalmente o silício e o germânio.

As células fotovoltaicas são constituídas da junção de dois materiais semicondutores, devidamente dopados, de modo que um material possua excesso de elétrons em suas ligações (material tipo N) e o outro possua um acúmulo de lacunas, ou seja, falta de elétrons (material tipo P). Entre os dois materiais é formada uma zona de depleção, região onde se forma um campo elétrico que inibe a difusão de cargas entre os materiais P e N. Na incidência da radiação solar sobre a célula, os elétrons passam para o lado N e as lacunas para o lado P. Assim, ocorre o surgimento de diferença de potencial em uma célula fotovoltaica, produzindo eletricidade (Oliveira, 2015). Os sistemas fotovoltaicos possuem como componente principal os módulos fotovoltaicos, que são formados por diversas células fotovoltaicas interligadas em série e/ou paralelo.

## **2.2. Sistemas fotovoltaicos**

Os sistemas solares fotovoltaicos são os conjuntos de equipamentos, devidamente projetados e instalados, com o objetivo de converter energia solar diretamente em eletricidade, utilizando-se do efeito fotovoltaico, como explanado no item 2.1. Tais sistemas são constituídos de três elementos básicos: o componente gerador de energia elétrica, os equipamentos de condicionamento de potência e proteção e o sistema de armazenamento de energia elétrica (Vera, 2004). Este último componente pode ou não ser necessário, conforme topologia do sistema e seu objetivo.

De acordo com a utilização do sistema fotovoltaico, que está diretamente ligada ao seu objetivo, estes sistemas podem ser classificados em sistemas isolados (autônomos) ou sistemas conectados à rede (Rampinelli, 2010).

Os sistemas isolados são aqueles que não possuem conexão com o sistema de distribuição de energia elétrica convencional e são utilizados normalmente para atender unidades que não têm acesso à rede elétrica das concessionárias de energia elétrica (Wanderley, 2013). Podem ainda serem construídos na intenção de alimentar equipamentos ou cargas em que não se deseja a dependência da rede elétrica convencional, como por exemplo, sistemas de iluminação pública solar, sistemas de medição de dados, irrigação, entre outras diversas aplicações. Os sistemas autônomos normalmente utilizam equipamentos de armazenamento de energia, compostos por baterias e controladores de carga, para utilização em períodos noturnos ou dia chuvosos e nublados.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede, conhecidos pela sigla SFCR, são capazes de inserir na rede elétrica convencional a energia elétrica gerada pelo SFCR, através da conexão elétrica entre este sistema de geração e a rede, através dos equipamentos denominados inversores (Rampinelli, 2010). Pelo fato de possuírem interligação com a rede elétrica, os SFCR's comumente não utilizam sistemas de armazenamento de energia, já que nos períodos em que a potência gerada pela planta fotovoltaica não for suficiente para suprir a demanda da unidade, esta energia é fornecida pela rede elétrica. No item que segue, será discutido sobre os principais componentes de um SFCR, o panorama mundial e nacional, entre outros aspectos dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

### **2.3. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (sfcr)**

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são conjuntos de equipamentos e instalações capazes de gerar energia elétrica a partir da radiação advinda do sol, utilizando-se do processo de conversão fotovoltaica. Além disso, o SFCR tem a característica de possuir uma conexão elétrica com a rede elétrica convencional, de forma que é possível haver exportação da energia elétrica gerada por estes sistemas.

#### **2.3.1. Componentes de um SFCR**

Um sistema fotovoltaico conectado à rede possui como componentes essenciais para seu funcionamento o módulo fotovoltaico e o inversor. O módulo fotovoltaico é responsável por transformar energia solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico, como explicado

no item 2.1. No entanto, a energia elétrica gerada pelos módulos é em corrente contínua (CC), sendo necessária a utilização do inversor, que converte a energia elétrica de corrente contínua para corrente alternada (CA) e conectam-se à rede elétrica (Rampinelli, 2010).

#### 2.3.1.1. Módulo fotovoltaico

O equipamento básico de um sistema fotovoltaico é o módulo fotovoltaico. É constituído por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas entre si (série e/ou paralelo, dependendo da necessidade de tensão e corrente elétrica necessárias) por meio de tiras de metal soldadas nas células. Estas células são encapsuladas, com uma cobertura de vidro temperado, plástico ou resina de silicone, com objetivo de dar rigidez e proteger as células contra a intempéries. Além disso, são utilizadas outras camadas de material para dar proteção mecânica ao módulo e facilitar a montagem (Vera, 2004). A Figura 4 mostra um módulo fotovoltaico de 260Wp da marca *Canadian Solar*.



Figura 4 - Módulo fotovoltaico 260Wp, 60 células, marca *Canadian Solar*, modelo CS6P-260P. Fonte: *Canadian Solar* (2016).

Devido a interligação em série das células fotovoltaicas e possibilidade de sombreamento em uma ou mais células, podendo transformar a célula sombreada em uma carga para as demais células, o que pode acarretar danos à célula sombreada<sup>2</sup>, são conectados os chamados diodos de *by-pass*, conectados em antiparalelo com uma célula ou um grupo destas. Assim, no caso de sombreamento de uma célula, o diodo de *by-pass* é polarizado diretamente, fazendo com que a corrente circule por ele e não pela célula (Hecktheuer, 2001). A Figura 5 mostra a caixa de conexões de um módulo fotovoltaico, em que é possível visualizar os diodos de *by-pass*.

---

<sup>2</sup> Fenômeno conhecido como *hot-spot* (ponto quente).

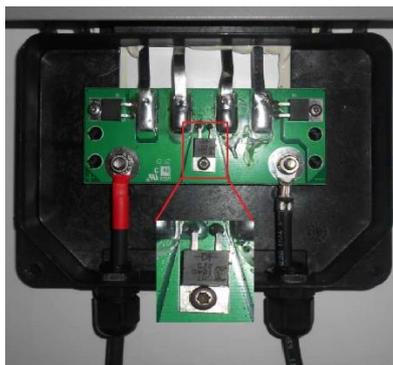


Figura 5 - Caixa de conexões elétricas de um módulo fotovoltaico, com destaque para um dos diodos de *by-pass*. Fonte: Oliveira, 2015.

No caso da interligação de módulos fotovoltaicos em paralelo, é possível a proteção contra correntes reversas entre os módulos em paralelo com a instalação de um diodo de bloqueio em série com cada módulo ou conjunto de módulos que estão em paralelo. A corrente reversa pode ocorrer devido a diferença de tensão gerada por cada ramo em paralelo, transformando o ramo com menor tensão em uma carga para os demais (Hecktheuer, 2001). A diferença da tensão gerada por cada ramo em paralelo pode ser ocasionada, dentre outros motivos, por condições climáticas.

### 2.3.1.2. Inversor

O inversor é o componente de um SFCR responsável por converter a potência em CC gerada pelos módulos fotovoltaicos em potência CA e injetar na rede elétrica, caso as condições exigidas de qualidade forem aceitáveis<sup>3</sup>. Para isso, o inversor tem seu funcionamento baseado em semicondutores (mais especificamente os tiristores ou transistores), que efetuam a comutação do sinal CC advindo dos módulos através de comutação (corte ou desligado e saturação ou ligado). Assim, o sinal alternado obtido é quadrado e passa por filtros de potência para aproximar o sinal de saída ao máximo de uma onda senoidal perfeita (Rampinelli, 2010). Estes equipamentos são circuitos estáticos, ou seja, não possuem partes móveis, que implica na atenuação no regime e complexidade de manutenção quando comparado aos sistemas que utilizam geradores rotativos, tais como usinas eólicas, hídricas, entre outras.

Outras importantes funções do inversor são a sincronização com a tensão e frequência da rede elétrica no ponto de conexão, desconexão e conexão do inversor em função destas condições de tensão, frequência e radiação incidente nos módulos e o seguimento do ponto de máxima potência (MPPT) do sistema gerador fotovoltaico (Zilles et. all., 2012).

<sup>3</sup> O item 2.5 tratará sobre os aspectos de qualidade de energia elétrica aceitáveis para a conexão de um SFCR com a rede elétrica e injeção de potência nela.

### 2.3.2. Panorama dos SFCR's

Como foi explanado no item 1.1, os SFCR's correspondem a mais de 95% da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos, que ultrapassou 229GW no ano de 2015. A China lidera este mercado em capacidade instalada, detendo 19% de todos os sistemas instalados, conforme mostrado na Figura 6.

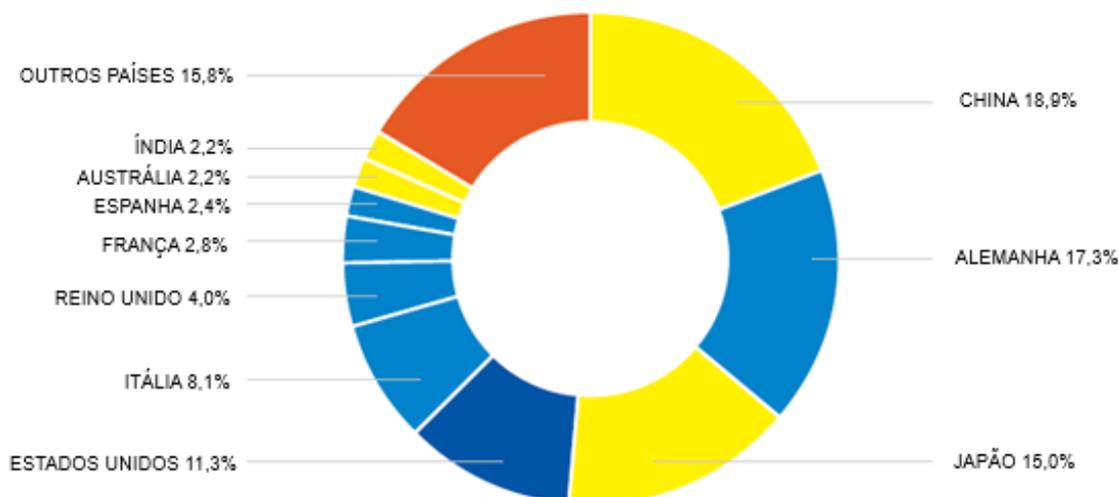


Figura 6 – Dez maiores países em capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos até 2015.  
Fonte: adaptada de EPIA, 2016.

A perspectiva é que os sistemas fotovoltaicos continuem em constante crescimento nos próximos anos, o que pode ser evidenciado pela potência de sistemas fotovoltaicos instalados no ano de 2015 no mundo, que alcançou a marca inédita de 50GW, como mostra a Figura 7.

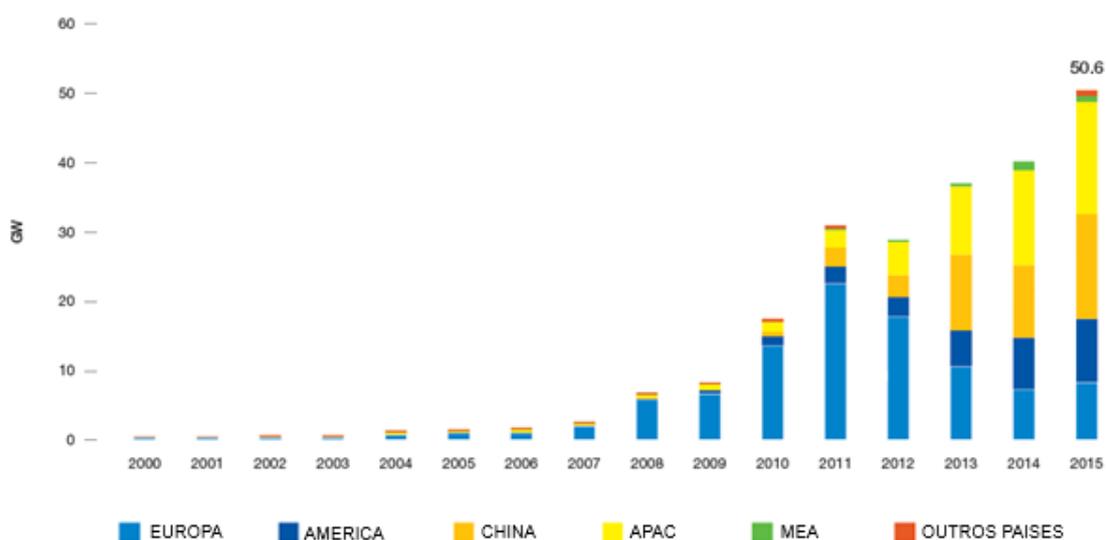


Figura 7 - Evolução da capacidade de sistemas fotovoltaicos instalados anualmente no mundo, de 2000 a 2015. Adaptada de EPIA, 2016.

Do ponto de vista econômico, o desenvolvimento do setor no mundo pode ser representado pela paridade tarifária, momento em que o custo da geração fotovoltaica é igual a tarifa final de energia elétrica aplicada. Breyer e Gerlach (2013) mostram a paridade tarifária para os segmentos de mercado residencial e industrial no mundo, incluindo no estudo residencial 154 países, onde está 98% da população mundial, 99,7% do PIB do planeta e 99,5% do consumo de energia elétrica e no estudo industrial 151 países, que concentram 97,7% da população mundial, 99,3% do PIB do planeta e 99,6% do consumo de energia elétrica.

No setor residencial, até o final desta década, a paridade tarifária para sistemas fotovoltaicos será atingida para mais de 80% dos mercados na Europa, Américas e Ásia-Pacífico. Na África do Sul e Egito, subsídios nas tarifas de energia impedem a paridade no continente africano, pois estes dois países representam 60% da geração de eletricidade da África (*vide* Figura 8). No setor industrial, o comportamento assemelha-se com o setor residencial, em que 75% dos mercados na Europa, Américas e Ásia-Pacífico alcançarão a paridade tarifária ainda nesta década, com exceção para a África, pelo mesmo motivo citado para o setor residencial, como pode ser percebido na Figura 9. Outra exceção são os países produtores de petróleo, que usam este combustível para subsidiar substancialmente seus mercados de energia, como Rússia, Arábia Saudita, Líbia, Venezuela, Irã, Iraque, Kuwait, Qatar, Omã e Angola (Breyer e Gerlach, 2013).

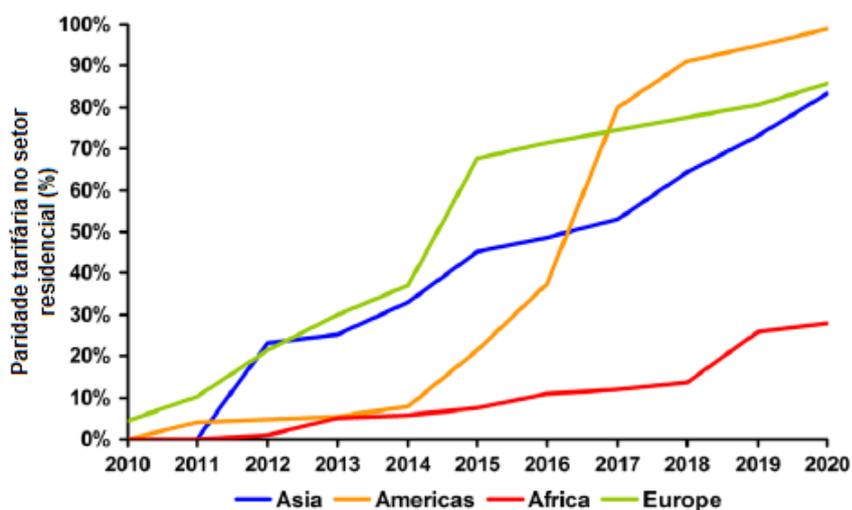


Figura 8 - Paridade tarifária para o segmento residencial em números relativos para todas as regiões do mundo, nos anos 2010 a 2020. Fonte: Adaptada de Breyer e Gerlach, 2013.

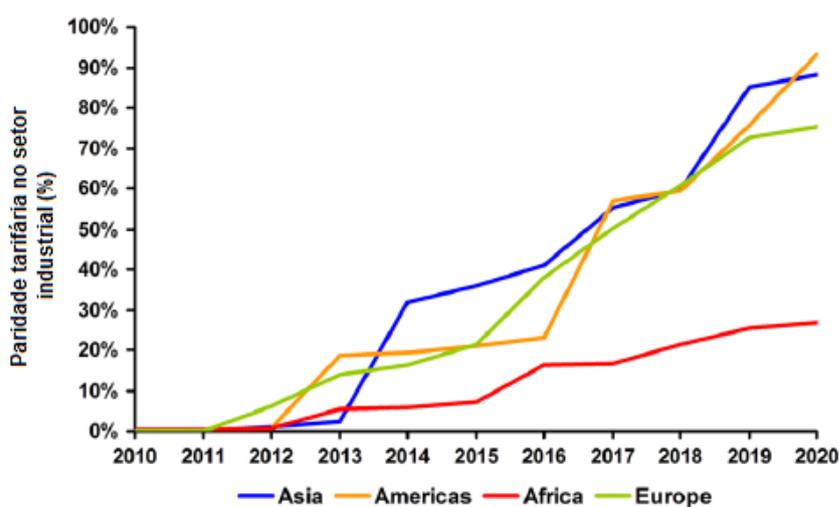


Figura 9 - Paridade tarifária para o segmento industrial em números relativos para todas as regiões do mundo, nos anos 2010 a 2020. Fonte: Adaptada de Breyer e Gerlach, 2013.

Além disso, EPIA 2016 construiu um cenário de crescimento da capacidade instalada anual até 2020, considerando três cenários diferentes: forte (*high scenario*), fraco (*low scenario*) e médio (*medium scenario*). O primeiro considera condições e ambiente de mercado favoráveis, acompanhado de fortes incentivos políticos. Já o cenário fraco assume um comportamento pessimista, sem melhorias nas condições de investimentos na maioria dos mercados de energia solar fotovoltaica. Por fim, o cenário considerado com médio é indicado como o cenário de crescimento deste mercado mais provável. A Figura 10 ilustra os três cenários de crescimento deste mercado em ascensão no mundo e a Figura 11 traz este crescimento direcionando para os vinte (20) países que são esperados os maiores crescimentos de sistemas fotovoltaicos.

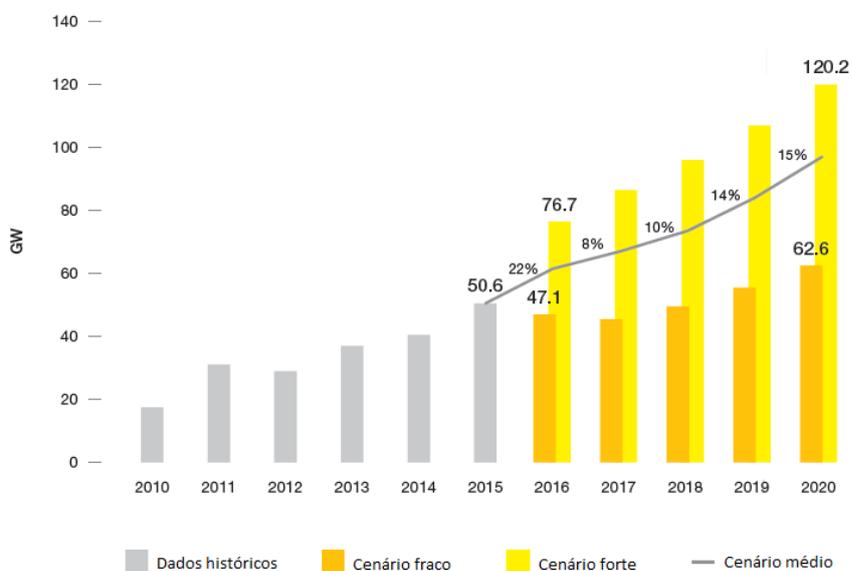


Figura 10 - Cenário global de capacidade instalada anual até 2020. Fonte: Adaptada de EPIA, 2016.

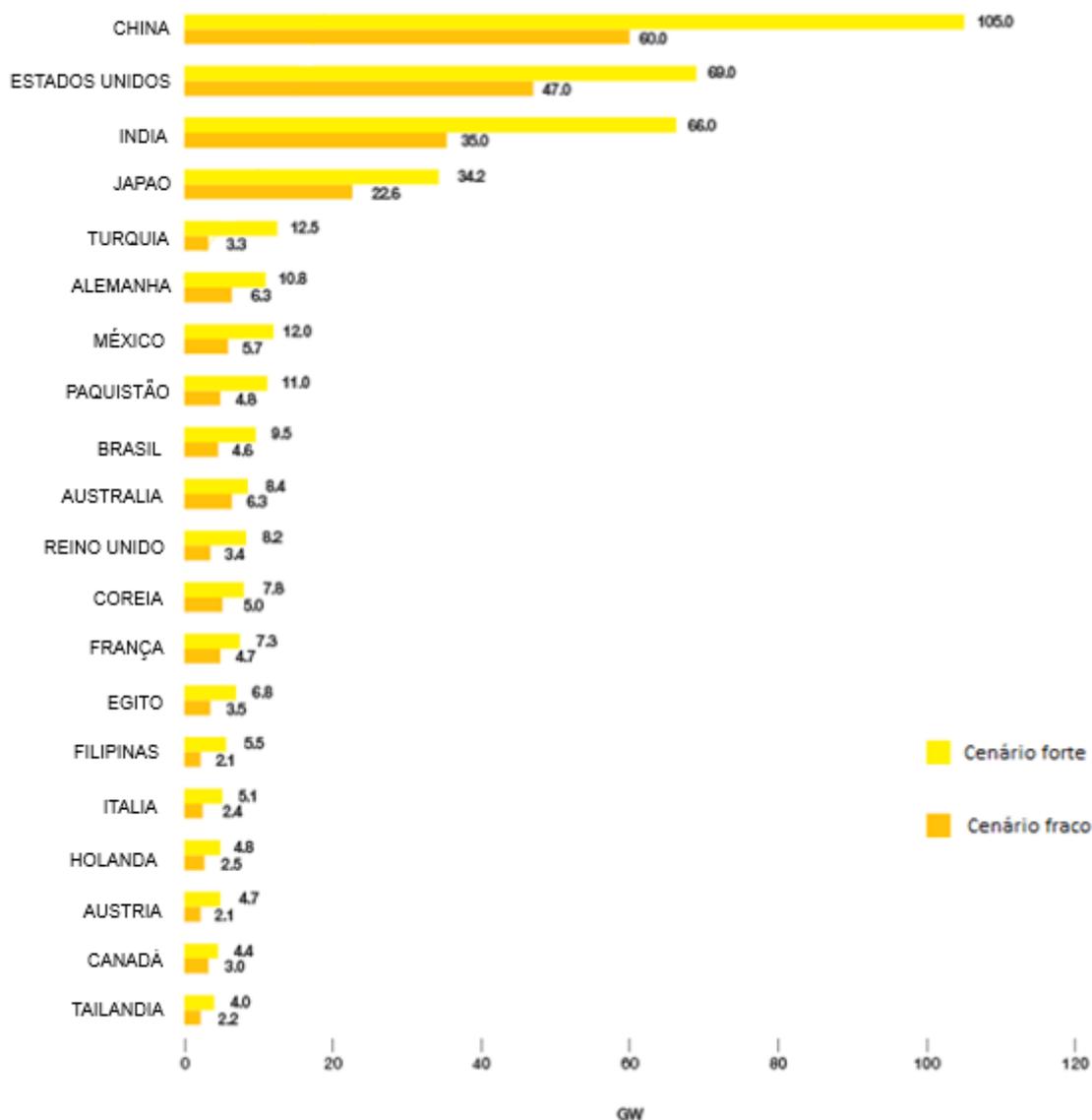


Figura 11 – Cenário dos 20 maiores países em capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos em 2020. Fonte: Adaptada de EPIA, 2016.

Conforme mostrado na Figura 11, espera-se que o Brasil esteja entre os dez (10) maiores países em capacidade instalada solar fotovoltaica no ano de 2020, mais precisamente na 9ª posição, com 6,5 GW de potência instalada, considerando um cenário médio de crescimento. Atualmente, o Brasil possui 69 MW de capacidade instalada em sistemas fotovoltaicos. Este crescimento representa uma taxa de evolução anual de cerca de 150% (EPIA, 2016).

Um dos avanços obtidos para o desenvolvimento do setor no Brasil é sua inclusão nos leilões de energia reserva (LER), realizados pelo Ministério de Minas e Energia. No leilão realizado em 31 de Outubro de 2014, 400 projetos foram cadastrados, com capacidade de mais de 10 GW, distribuídos em vários estados, com destaque para a região Nordeste (vide Figura 12).

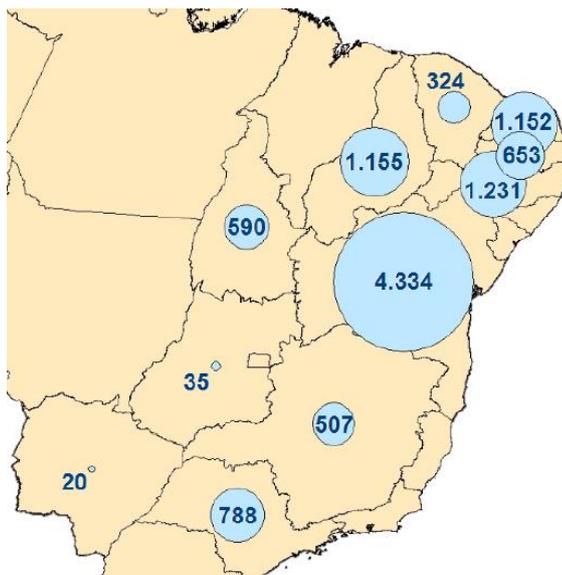
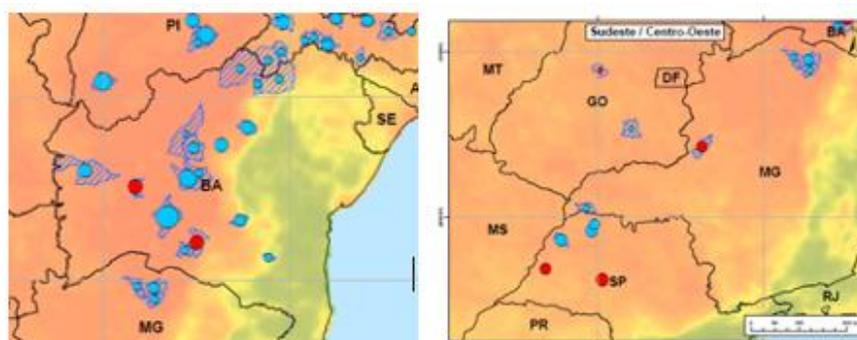


Figura 12 - Capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos cadastrados no leilão de energia reserva de 2014, em MW. Fonte: EPE, 2014.

Deste leilão, foram contratados 202,1 MW médios por 20 anos, com potência habilitada de 889,7 MW, advindos de 31 empreendimentos fotovoltaicos. A Figura 13 mostra os empreendimentos habilitados e os vendedores no LER 2014.



Resumo dos vendedores			
UF	Pot. CC (MW)	Pot. CA (MW)	Pot. Habilitada (MW)
BA	480,0	399,7	399,7
SP	307,8	270,0	270,0
MG	102,6	90,0	90,0
CE	72,4	60,0	60,0
PB	36,8	30,0	30,0
RN	38,2	30,0	30,0
GO	10,4	10,0	10,0
<b>Total</b>	<b>1.048,2</b>	<b>889,7</b>	<b>889,7</b>

Figura 13 - Empreendimentos fotovoltaicos habilitados e vendedores (potência agrupada por município). Fonte: Adaptada de EPE, 2014.

Destacam-se neste leilão os estados da Bahia e São Paulo, responsáveis juntos por mais de 75% da potência habilitada. Dos 10 GW cadastrados, 69 empreendimentos foram

inabilitados a participar do processo, sendo que 73% destes foram impedidos por problemas nas licenças ambientais (EPE, 2014).

No que diz respeito aos avanços econômicos, o forte crescimento no uso desta fonte de energia, especialmente na Europa e China, contribui positivamente para a constante redução de custos para instalação de sistemas fotovoltaicos. IEA (2012) estima que entre 2010 e 2020 será observado uma queda nestes custos de mais de 40%. Tomando como base este estudo, EPE (2014) desenvolveu um cenário de redução dos custos de sistemas fotovoltaicos distribuídos no Brasil, considerando o desenvolvimento da indústria nacional de equipamentos fotovoltaicos, com implantação de políticas de incentivos para a formação de um parque industrial. A Figura 14 mostra a perspectiva de redução de custos em comparação com a evolução da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos para os setores residencial e comercial.

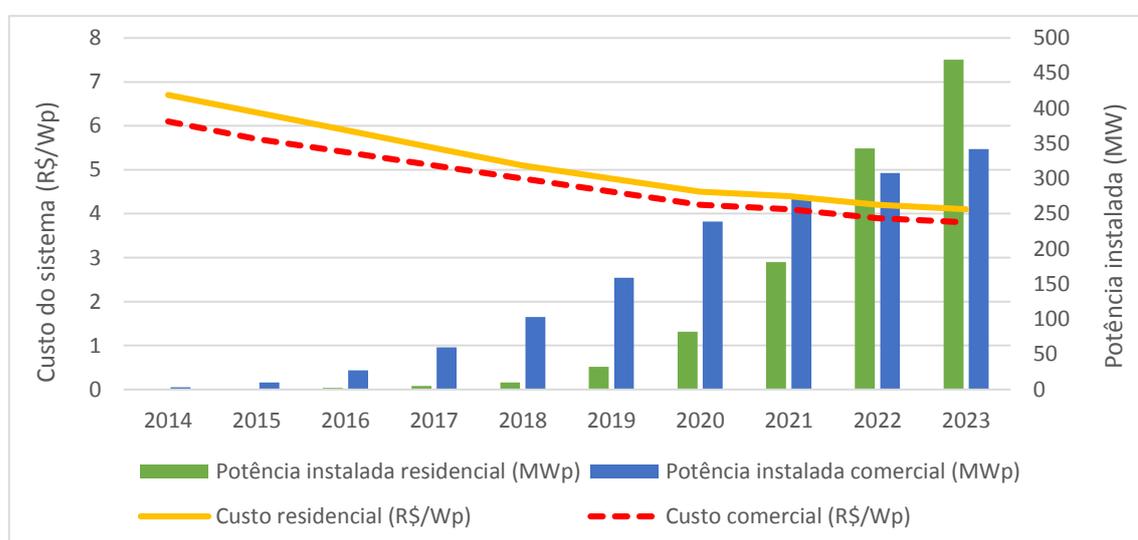


Figura 14 - Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos distribuídos e dos custos dos sistemas. Fonte: Adaptada de EPE, 2014.

Analisando-se a Figura 14, percebe-se que a previsão de crescimento no setor comercial é mais acelerada nos próximos anos, enquanto que após 2020 o setor residencial irá ultrapassá-lo. Também é importante verificar que a redução de custos ao longo dos anos é um mais favorável para o setor residencial, motivo provável para a futura ultrapassagem na potência instalada por este setor.

Outro condicionante que revela a capacidade de crescimento de sistemas fotovoltaicos no país é um estudo do potencial técnico de geração fotovoltaica distribuída no Brasil realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no documento Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos (EPE, 2014). Neste estudo, leva-se em consideração três fatores principais: o levantamento do recurso solar, o mapeamento das áreas

de telhado disponíveis para instalação dos sistemas<sup>4</sup> e a eficiência de conversão da radiação solar em energia elétrica pelo sistema fotovoltaico.

Conforme mostram as Figuras 15 e 16, percebe-se que o país possui potencial técnico para desenvolvimento do setor e que a área disponível não é um fator limitante para a inserção dos sistemas fotovoltaicos distribuídos. A Figura 15 exhibe o potencial técnico de geração solar por estado, em GWh/dia. Percebe-se que, mesmo em regiões mais povoadas do país (sudeste, por exemplo), onde ocorre menores índices de radiação, o potencial de geração é maior. Isso se deve à maior área de telhados disponíveis para instalação. Já na Figura 16, é apresentada a relação entre o potencial de geração e o consumo de energia elétrica residencial, revelando uma superioridade do potencial que varia de 1,4 a 4 vezes o consumo de energia (EPE, 2014).

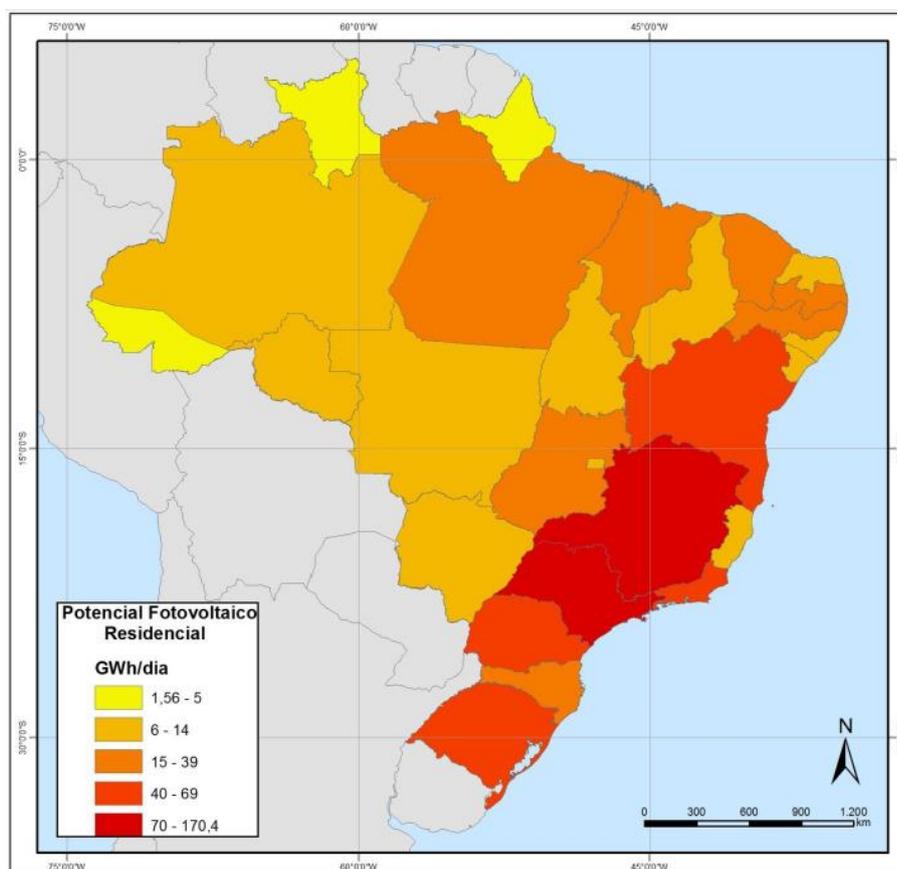


Figura 15 - Potencial técnico de geração solar fotovoltaica em telhados residenciais por estado, em GWh/dia. Fonte: EPE, 2014.

<sup>4</sup> Utilizou-se a área de telhados residenciais, por se tratar de um grande potencial de utilização em sistemas distribuídos.

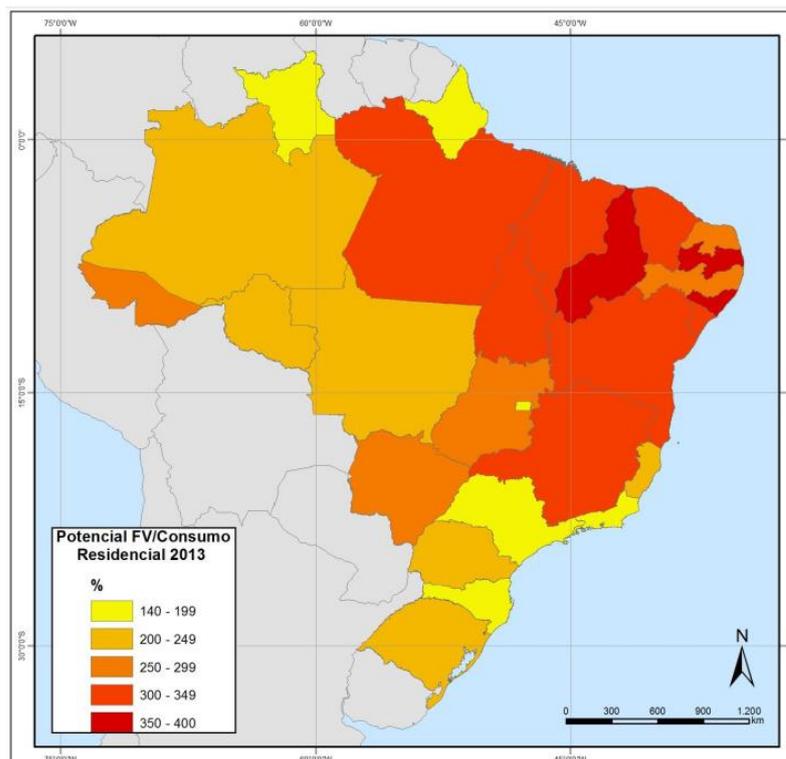


Figura 16 - Potencial técnico fotovoltaico *versus* consumo residencial (ano base 2013) por estado. Fonte: EPE, 2014.

É perceptível que os sistemas fotovoltaicos distribuídos possuem um grande potencial para crescimento no Brasil, por tratar-se de sistemas de fácil instalação e manutenção, de custo de instalação cada vez mais acessível e por possuir a flexibilidade de ser instalado também em telhados, por exemplo. Por estes fatores e também pelo fato de ser o tipo de sistema tratado neste trabalho, o item seguinte trará algumas definições relacionadas aos sistemas distribuídos.

#### 2.4. Geração distribuída (micro e minigeração) e sistema de compensação de energia

Sistemas de geração distribuída podem ser definidos como o uso, de modo integrado ou isolado, de fontes de energia elétrica de pequeno porte por concessionárias, consumidores e/ou terceiros, gerando eletricidade para o sistema elétrico ou unidades consumidoras específicas. Se diferencia do que é conhecido como geração centralizada (tipo de sistemas de geração mais utilizado no mundo), em que centrais de geração de grande porte, em geral distantes dos centros de consumo, transferem eletricidade através de longas estruturas de transmissão e distribuição de energia para os consumidores (Torres, 2015).

A geração distribuída gera diminuição de perdas no sistema elétrico, mais perceptível no transporte de energia elétrica e em investimentos com ampliação do sistema elétrico centralizado, já que a unidade de geração está próxima ao consumidor. Além disso, permite a

utilização de diversas tecnologias empregadas para produção de energia, podendo ser utilizada a que mais se adequa à necessidade das cargas ou a que possui disponibilidade e viabilidade no local (Rodríguez, 2002). Dessa forma, tecnologias de geração antes não difundidas ou que não apresentam grandes vantagens para uso centralizado podem se desenvolver no mercado de geração distribuída e diversificar a matriz energética para geração de eletricidade.

As principais tecnologias utilizadas nos sistemas de geração distribuída são os motores à combustão interna, turbinas a gás, células a combustível, pequenas centrais hidrelétricas (PCH), aerogeradores e sistemas fotovoltaicos (Rodríguez, 2002). Normalmente, estes sistemas são interconectados à rede elétrica de distribuição (em baixa, média ou alta tensão, dependendo da capacidade do sistema) e injetam energia elétrica nesta rede, assim como, caso haja consumo em períodos que não há geração, a rede elétrica disponibilizará esta demanda.

No intuito de fomentar o uso de fontes alternativas de energia em sistemas distribuídos e desenvolver este mercado no Brasil, a ANEEL criou a Resolução Normativa (REN) Nº 482/2012, que foi alterada para Resolução Normativa Nº 687/2015, que dentre os objetivos está o de estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2014). Daí, surgem dois termos, que são eles: microgeração e minigeração distribuída.

Conforme a REN 687/2015 (ANEEL, 2015):

“Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75kW e menor ou igual a 3MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.”

A partir da conexão de um sistema de geração distribuída à rede, este pode passar a participar do sistema de compensação de energia. Segundo ANEEL (2015), “sistema de compensação de energia elétrica é um sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.”

Para contabilização da energia elétrica consumida e/ou injetada na rede elétrica de distribuição deve ser utilizado um sistema de medição que registre de forma separada o consumo e a injeção de eletricidade na rede. Para isso, podem ser utilizados dois medidores

unidirecionais (um para a energia gerada e outro para a consumida) ou um medidor bidirecional, conforme mostra a Figura 17.

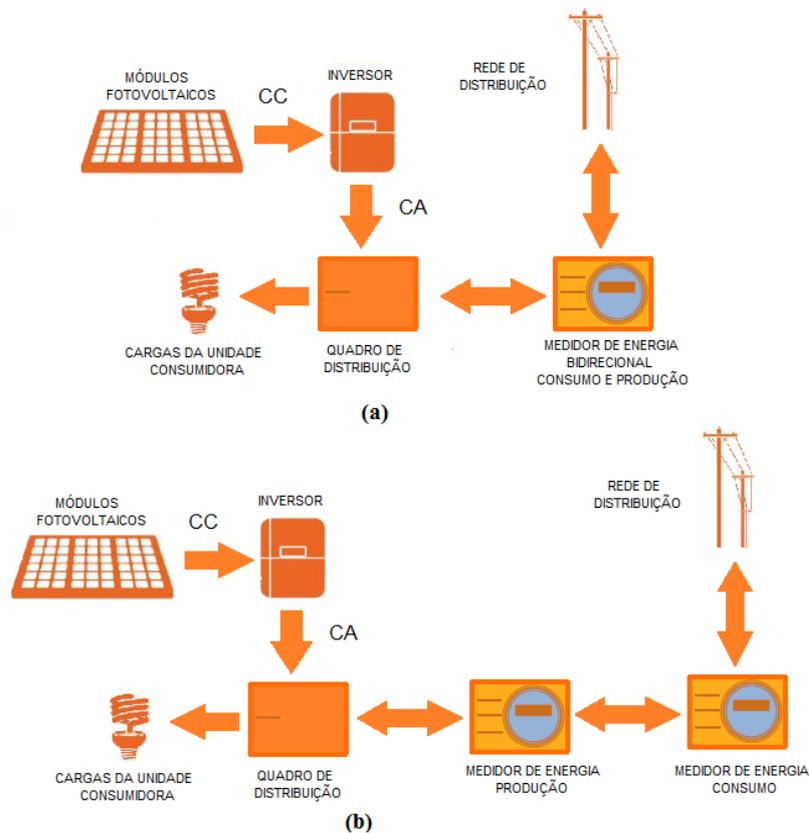


Figura 17 - Sistema de micro ou minigeração fotovoltaico conectado à rede, com sistema de medição bidirecional (a) e unidirecional (b). Fonte: Autoria própria, 2016.

Assim, ao final de cada ciclo de faturamento, a concessionária realiza o balanço entre a energia consumida e a injetada, sendo faturado para a unidade consumidora a diferença, respeitando-se o valor mínimo referente ao custo de disponibilidade. Nos casos em que a energia exportada à rede de distribuição for superior à consumida no final de um ciclo de faturamento, o excedente de energia será contabilizado como crédito em energia ativa, que pode ser utilizado para compensar o consumo em ciclos posteriores, num prazo máximo de 60 meses (ANEEL, 2015).

Neste sentido, sistemas de energia solar fotovoltaico desta natureza devem seguir a padronização e requisitos criados por esta resolução para que possam ser conectados à rede elétrica de distribuição da concessionária local. É necessária a elaboração da solicitação de acesso, que trata-se de um requerimento composto pelo projeto do SFCR e sua conexão à rede elétrica, além de uma lista de documentos e informações solicitadas pela concessionária. Dentre estes requisitos exigidos, estão os padrões de qualidade de energia que o sistema deve obedecer para que sua conexão à rede de distribuição seja efetivada e mantida.

## 2.5. Aspectos de qualidade de energia para conexão de um SFCR à rede

Todo sistema de micro ou minigeração conectado à rede deve obedecer alguns critérios de qualidade de energia, que são regidos pelo Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição) da ANEEL. As concessionárias de energia elétrica, por sua vez, são responsáveis por analisar se os sistemas a serem conectados em seus sistemas de distribuição estão seguindo os critérios exigidos.

No caso deste trabalho, analisou-se a Norma VR01.01-00.12 – Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição em Baixa Tensão da COSERN – Companhia Energética do Rio Grande do Norte, pois o SFCR estudado encontra-se conectado à rede de distribuição desta concessionária. Sendo assim, serão listados a seguir os requisitos exigidos necessários para conexão de um sistema de microgeração, conforme COSERN (2016).

### 2.5.1. Tensão em regime permanente

A tensão elétrica da rede de distribuição deve operar dentro dos limites de operação dispostos na Tabela 1. O sistema de geração distribuída deve ser capaz de perceber as condições anormais da tensão elétrica e desligar o sistema, cessando o fornecimento de energia enquanto durar a anormalidade.

<b>Tensão no ponto de conexão (% em relação à tensão nominal)</b>	<b>Tempo máximo de desligamento</b>
$V < 80\%$	0,4s
$80\% \leq V \leq 110\%$	Regime normal de operação
$110\% < V$	0,2s

Tabela 1 - Resposta às condições anormais de tensão. Fonte: COSERN (2016).

### 2.5.2. Frequência

Os níveis aceitáveis de frequência dependem do tipo de conexão do sistema à rede no que diz respeito à existência ou não de inversores. No trabalho em questão, o sistema analisado possui conexão à rede através de um inversor de 3kW. Dessa forma, os limites aqui descritos serão para esses tipos de sistemas de geração distribuída.

Para que não haja desconexão ou perda de potência gerada pelo sistema de geração distribuída, a frequência da rede elétrica deve operar entre os limites de 57,5 a 60,5Hz.

### 2.5.3. Fator de potência

As faixas de valores de fator de potência que um sistema de geração distribuída deve ser capaz de operar depende de sua potência instalada. Vale salientar que esse critério vale somente quando a potência injetada na rede é superior a 20% da potência nominal. A Tabela 2 mostra os limites estabelecidos para sistemas de microgeração, (até 75kW de potência nominal) pois é o tipo de sistema analisado no presente trabalho.

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

Tabela 2 – Limites para o fator de potência em sistemas de microgeração. Fonte: COSERN (2016).

### 2.5.4. Harmônicos

Com relação à distorção harmônica na forma de onda da tensão e da corrente elétrica, analisou-se dois parâmetros importantes na qualidade de energia, que são eles: Taxa de distorção harmônica total de tensão (*Total Harmonic Distortion Voltage* – THDV) e a Taxa de distorção harmônica total de corrente (*Total Harmonic Distortion Current* – THDI). Para estes parâmetros, os limites estabelecidos são 8% e 5%, respectivamente. É importante frisar que o limite de 5% para o THDI deve ser avaliado quando o sistema está operando na potência nominal.

## 2.6. Trabalhos desenvolvidos

Conforme relatado no item 2.3, sistemas de micro e minigeração fotovoltaica conectados à rede tem apresentado um bom desenvolvimento nos últimos anos. No caso especial do Brasil, o crescimento do setor tem sido evidenciado nos últimos 3 anos após sua regulamentação. Além disso, estudos mostrados nesse item revelam que o país tem grande potencial para o desenvolvimento de sistemas de geração solar fotovoltaica distribuída.

Neste sentido, pesquisas e estudos são desenvolvidos no intuito de criar regulamentação para o setor de micro e minigeração. Dentre diversos critérios a serem analisados, a qualidade

de energia gerada aparece como um dos importantes critérios a serem avaliados e definidos.

O trabalho realizado por Silva (2015) estudou o impacto na qualidade de energia após a instalação de um sistema de geração solar fotovoltaico em uma residência na zona rural de Montenegro, Rio Grande do Sul. Com relação aos parâmetros de qualidade de energia o estudo mostra que ocorre uma pequena diminuição na THDV após instalação do SFCR, que sai de 2,1% para 1,85%; verifica-se queda do valor do fator de potência médio, de 0,83 para 0,74; percebe-se que ocorre um acréscimo na tensão fase-neutro na fase em que o sistema foi instalado. A pesquisa chegou à conclusão que a instalação do SFCR não melhora a qualidade de energia consumida pela residência.

Cáceres (2012) estudou a comparação entre um sistema fotovoltaico real e um modelo matemático de um SFCR. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de um sistema em que é permitido simular, avaliar e prever a variação da capacidade de geração de um SFCR com a variação dos parâmetros da rede elétrica (tensão e frequência) e as condições ambientais (radiação e temperatura). Segundo este estudo o sistema fotovoltaico pode perder 20% de sua capacidade de geração na interação com a rede quando a temperatura está elevada. Com relação a validação do modelo, verificou-se uma variação entre os valores de energia gerada simulado e medido que não superou 2%.

Após a apresentação e discussão de conceitos imprescindíveis para a realização desta dissertação, o Capítulo 3 traz a metodologia necessária adotada para a execução do trabalho em questão.

### 3. METODOLOGIA

O presente Capítulo caracteriza a pesquisa realizada, mostrando o local de instalação do sistema fotovoltaico estudado, detalhando a metodologia empregada, e ainda traz os materiais e meios utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

#### 3.1. Descrição do SFCR instalado na UFERSA – Mossoró/RN

O sistema tratado no presente trabalho trata-se de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) monofásico, que possui 3kW de potência nominal. A planta fotovoltaica possui como principais equipamentos quatorze (14) módulos fotovoltaicos, um inversor, quadro de comando e proteção e o sistema de medição bidirecional. Vale salientar que é importante a descrição exata dos modelos dos equipamentos pertencentes ao SFCR devido ao fato de que cada equipamento possui características técnicas de operação singulares.

Os módulos utilizados no sistema fotovoltaico são da *Yingli Solar*, modelo YL245P - 29b, de 245W, interligados em série, com objetivo de obter tensão nominal de 525V, conforme ilustrado na Figura 18.



Figura 18 - Módulos fotovoltaicos YL245P - 29b, *Yingli Solar*. Fonte: Autoria própria, 2015

Com o objetivo de converter a energia elétrica gerada pelo painel fotovoltaico em corrente contínua para corrente alternada, de forma a sincronizar com a rede elétrica convencional e a grande maioria dos equipamentos eletroeletrônicos, é utilizado o inversor *Sunny Boy 3000HFUS*, da SMA. Em seguida, a saída do inversor é conectada a um disjuntor de 25A para realizar a proteção e comando do sistema fotovoltaico (vide Figura 19). A conexão do SFCR com a rede de distribuição de energia elétrica da concessionária é realizada no QDT (Quadro de Distribuição Térreo) no pavimento térreo do CITED, sendo interligado na fase S do

disjuntor geral de 80A deste quadro, que, por sua vez, é conectado ao QGBT (quadro geral de baixa tensão) do prédio CITED, conforme mostra a Figura 20.



Figura 19 - Inversor e disjuntor de proteção do SFCR. Fonte: Autoria própria, 2015.



(a)



(b)

Figura 20 – Quadros QDT (a) e QGBT (b) do CITED.

Logo em seguida, tem-se um transformador de distribuição aéreo para alimentação elétrica do prédio, localizado próximo à entrada do CITED. Por fim, este transformador está conectado ao sistema de distribuição de energia da UFERSA. Na subestação de energia elétrica do campus leste da UFERSA, está instalado, pela concessionária de energia local, no caso, a Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN), um medidor de energia elétrica

bidirecional, com objetivo de realizar a compensação de energia elétrica. A Figura 21 mostra o diagrama unifilar do sistema fotovoltaico completo.

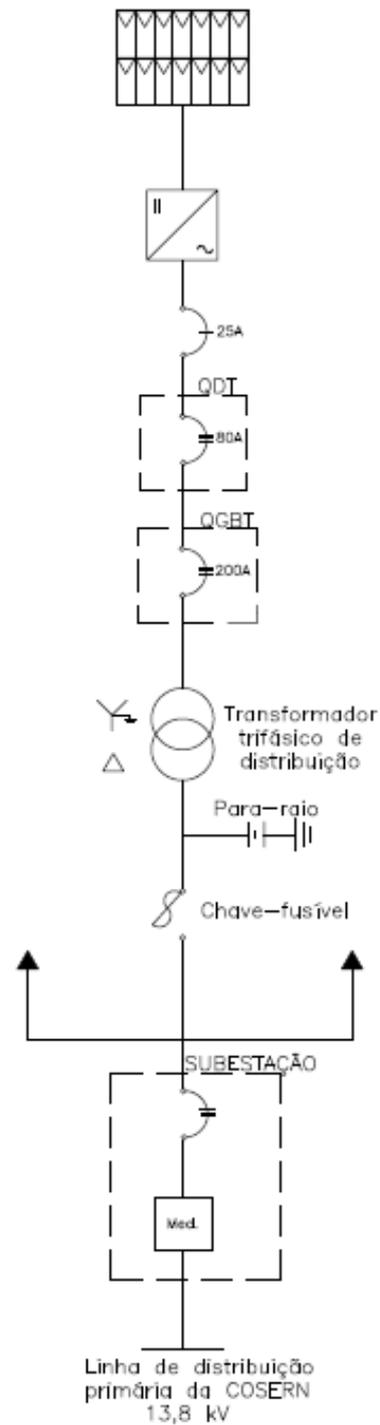


Figura 21 - Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico conectado à rede.

### 3.2. Modelo do sistema fotovoltaico conectado à rede

Objetivando validar o funcionamento do SFCR analisado neste trabalho, no tocante à potência gerada em diferentes condições de radiação e temperatura, foi realizada a modelagem deste sistema. Para isso, foi utilizado um modelo proposto pela ferramenta SIMULINK do MATLAB® 2015a, realizando todas as alterações no modelo básico para adequar-se ao sistema em estudo.

A modelagem matemática das células fotovoltaicas foi baseada no modelo elétrico equivalente de cinco parâmetros, em que a célula fotovoltaica comporta-se como um diodo com perdas internas devido às fugas de corrente proporcionais à tensão, representadas por duas resistências elétricas (uma série e outra paralela). A resistência série  $R_s$  é devido à resistência do semicondutor dopado, da grade e dos contatos do semicondutor. Já a resistência paralela  $R_p$  é dada pelas imperfeições na junção P-N ou nas bordas da junção, responsável pela fuga de corrente. O diodo, ao ser exposto à radiação solar, gera uma corrente elétrica  $I$ , que analisando o circuito equivalente da Figura 22, é dada pela Equação 2 (Vera, 2004).

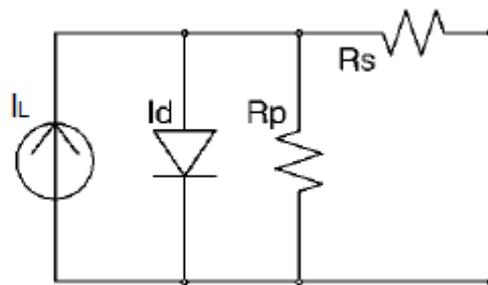


Figura 22 – Modelo elétrico equivalente de cinco parâmetros de uma célula fotovoltaica.  
Fonte: Firman, 2011.

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \frac{e(V+IR_s)}{mkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2)$$

onde,

$I_L$  – corrente fotogerada;

$I_0$  – 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 da junção da célula, dada pela Equação 3 (Vera, 2004).

$$T = T_a + \frac{G(NOCT - 20)}{800} \quad (3)$$

onde,

$T_a$  – temperatura ambiente;

$G$  – radiação solar, W/m<sup>2</sup>;

NOCT – temperatura nominal de operação da célula.

A modelagem do inversor consiste em calcular a potência de saída do inversor, de acordo com a potência de entrada, associando os parâmetros com as perdas de potência que ocorrem no inversor. Existem diversos modelos para descrever o comportamento de um inversor. No presente trabalho utilizou-se o modelo polinomial, representado por uma equação de 2º grau, que calcula a eficiência da conversão de um inversor, mostrada na Equação 3 (Cáceres, 2012).

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + (K_0 + K_1 P_o + K_2 P_o^2)} \quad (3)$$

onde,

$P_o$  – potência de saída;

$K_0$  – autoconsumo do inversor;

$K_1$  – quedas de tensão;

$K_2$  – perdas ôhmicas.

Realizando as devidas alterações e de posse do modelo de um SFCR de 3kW, foram realizadas simulações para obter dados de potência gerada pelo sistema a partir de dados de radiação e temperatura. Dessa forma, possibilitou-se comparar e validar o sistema fotovoltaico simulado com o sistema real.

### 3.3. Procedimento de medição dos dados de geração do SFCR em operação

Com o intuito de dispor de dados para realização da análise da energia elétrica gerada pelo SFCR instalado, foram realizadas medições no ponto de conexão do sistema fotovoltaico conectado à rede monofásico com a rede elétrica, com o objetivo de quantificar os parâmetros de geração do SFCR. Para isso, empregou-se um analisador de energia elétrica trifásico, modelo ET-5061C, da marca Minipa, mostrado na Figura 23.



Figura 23 – Analisador de energia ET-5061C. Fonte: MINIPA, 2015.

Foram medidos os seguintes parâmetros:

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

### 3.4. Procedimento de medição dos dados da rede elétrica

Após medição dos parâmetros de geração do sistema fotovoltaico, realizou-se a medição dos parâmetros da rede elétrica de baixa tensão do prédio CITED, onde está instalado o sistema fotovoltaico. Vale salientar que foram obtidas medições com o SFCR desligado, objetivando verificar o comportamento da rede elétrica sem influência do sistema, e com o SFCR ligado, com o intuito de avaliar o impacto da inserção da microgeração na rede elétrica. O analisador foi instalado no barramento de alimentação principal do prédio, localizado no *hall* de entrada. Os parâmetros medidos foram praticamente os mesmos medidos no ponto de conexão, acrescentando a medição da tensão fase-fase, pois a rede elétrica do prédio é trifásica.

Finalizados os procedimentos de modelagem, simulação e medição dos parâmetros elétricos foram realizadas análises dos dados coletados e resultados alcançados, discutidos no Capítulo 4.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este Capítulo discute os principais resultados obtidos com a construção do modelo computacional para o SFCR estudado. Analisa também os parâmetros de qualidade de energia gerados pelo sistema fotovoltaico, comparando com os limites estabelecidos nas normas vigentes. Ainda apresenta o impacto da inserção do SFCR na rede elétrica do prédio, com relação aos parâmetros de qualidade de energia e injeção de energia ativa.

### **4.1. Modelagem e simulação do modelo do SFCR**

A partir do modelo proposto pelo MATLAB® para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, foi construído o SFCR de 3kW analisado neste trabalho, levando-se em consideração todas as informações técnicas dos módulos fotovoltaicos e inversor. Para dimensionamento da potência das cargas interligadas ao SFCR, foram utilizadas as medições realizadas na rede elétrica do prédio para a fase S, já que o sistema fotovoltaico foi conectado nesta fase. Além disso, foram considerados os cabos elétricos de interligação entre o inversor e o QDT para cálculo do modelo dos condutores. Desta forma, a Figura 24 traz o modelo do SFCR de 3kW da UFERSA.

Após adaptação para construção do modelo visto acima, foram realizadas medições de temperatura e radiação para simulação da potência gerada pelo sistema, objetivando comparar com as medições realizadas com o analisador de energia. Para isso, coletou-se dados de temperatura e radiação num intervalo de 15 minutos durante um dia de geração, por se tratar do mesmo intervalo de medição do analisador. No entanto, percebeu-se que o analisador de energia realiza diversas leituras durante cada intervalo, e ao final do intervalo grava o valor médio das leituras. Desta forma, tornou-se inviável a análise da potência gerada a partir dos dados disponíveis. É importante frisar que os instrumentos de medida de temperatura e radiação são manuais e de leitura instantânea, não sendo possível realizar medições automáticas, por consequência não é possível gravar dados de medição.

Assim, não foi possível realizar a validação do sistema fotovoltaico, pois não dispôs-se de dados confiáveis e compatíveis para realizar a comparação. Através do modelo do sistema, teve-se clara ciência do funcionamento do sistema de monitoramento dos parâmetros da rede elétrica que influenciam diretamente na potência gerada pelo SFCR (tensão e frequência elétrica), sendo parâmetros fundamentais para o controle de injeção de potência pelo inversor na rede.

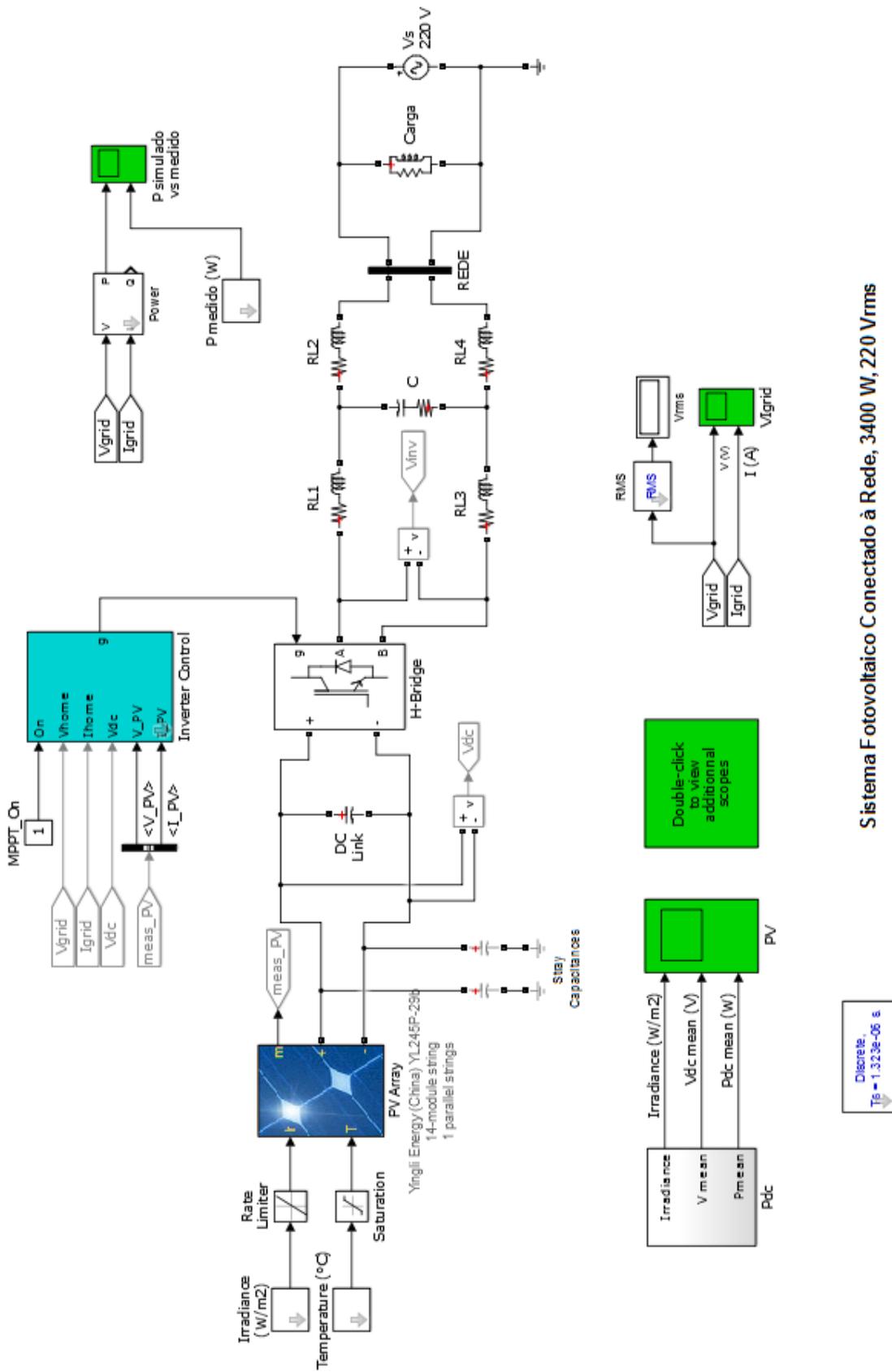


Figura 24 - Modelagem no SIMULINK para o SFCR de 3kW da UFERSA. Fonte: Adaptado de MATLAB, 2016.

## 4.2. Análise da qualidade de energia gerada pelo SFCR

Nos meses compreendidos entre Agosto e Dezembro de 2015, foram realizadas medições dos parâmetros de geração de energia elétrica no ponto de conexão entre o inversor e a rede elétrica do prédio CITED (mostrado na Figura 25), local onde o SFCR está instalado. Para isso, foi utilizado o analisador de energia elétrica ET-5061C, da Minipa, conforme já explanado no item 3.3. É importante frisar que, devido à alguns problemas técnicos, o analisador não realizou a gravação dos dados medidos em alguns dias, como pode ser consultado na Tabela 3. Podem-se destacar como problemas identificados algumas interrupções de energia elétrica por parte da concessionária, manutenções preventivas e/ou corretivas realizadas no sistema de distribuição de energia da UFERSA, em que foi necessário desligamento do fornecimento de energia elétrica na Universidade, e também problemas de mau contato entre a tomada elétrica e o plugue do analisador, trazendo como consequência a suspensão da gravação dos dados medidos pelo analisador (bateria interna com autonomia de aproximadamente 6 horas<sup>5</sup>). Após a verificação do mau contato da tomada, modificou-se a conexão do equipamento analisador.



Figura 25 – Medição dos parâmetros elétricos de geração do SFCR na saída do inversor.

Fonte: Autoria própria, 2015.

---

<sup>5</sup> Autonomia prevista pelo fabricante para bateria nova. Ressalta-se que o equipamento tem mais de dois anos de utilização com a mesma bateria, concluindo-se que possivelmente a bateria não apresente mais a mesma autonomia.

Mês	Dias de medições interrompidas	
	Parcial	Total
Agosto	17, 31	30
Setembro	04, 08	05, 06, 07
Outubro	30	11, 12, 31
Novembro	10	01 a 09
Dezembro	04, 08, 14	05, 06, 07, 13, 20 a 31

Tabela 3 - Dias sem medição dos dados analisados por problemas técnicos.

As tabelas 4 e 5 mostram, respectivamente, a média dos valores médios diários<sup>6</sup> e os seus desvios padrão dos parâmetros analisados para os referidos meses. As siglas dos parâmetros significam:

- V – tensão fase-neutro;
- VNPE – tensão neutro-terra;
- F – frequência;
- I – corrente elétrica gerada pelo SFCR;
- P – potência ativa gerada pelo SFCR;
- Ea – energia ativa gerada pelo SFCR;
- FPi – fator de potência do SFCR;
- THDV – taxa de distorção harmônica total de tensão;
- THDI – taxa de distorção harmônica total de corrente.

Mês	Parâmetro – Média dos valores médios diários								
	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

Tabela 4 – Média dos valores médios diários dos parâmetros elétricos medidos no ponto de conexão do SFCR, exceto a energia ativa.

<sup>6</sup> Exceto para a Energia ativa gerada, em kWh, que representa o valor acumulado gerado em um dia.

Mês	Parâmetro – Desvio padrão								
	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

Tabela 5 – Desvios padrão dos valores médios diários dos parâmetros elétricos medidos no ponto de conexão do SFCR.

Nos subitens que seguem serão analisados estes parâmetros elétricos medidos, através de gráficos mensais para cada parâmetro, comparando com os valores estabelecidos nas normas vigentes, conforme já explanado.

#### 4.2.1. Tensão fase-neutro

As Figuras 26 a 30 mostram os gráficos contendo o comportamento da tensão elétrica fase-neutro medidos no ponto de conexão entre o SFCR e o prédio da UFERSA, cujo valor nominal é 220V. Inseriu-se também os limites mínimo e máximo estabelecidos para a tensão elétrica em operação normal, que são, respectivamente, 176V e 242V, que correspondem a 20% da tensão nominal para o limite inferior e 10% para o limite superior (COSERN, 2016).

Analisando os gráficos, percebe-se que a tensão elétrica fase-neutro apresentou comportamento satisfatório em relação aos limites especificados pela legislação, com valores bem próximos da tensão nominal. O maior desvio padrão para este parâmetro foi de 1,87 V, ocorrido no mês de Agosto, que apresentou o valor médio que mais se distancia da tensão nominal, 221,21V.

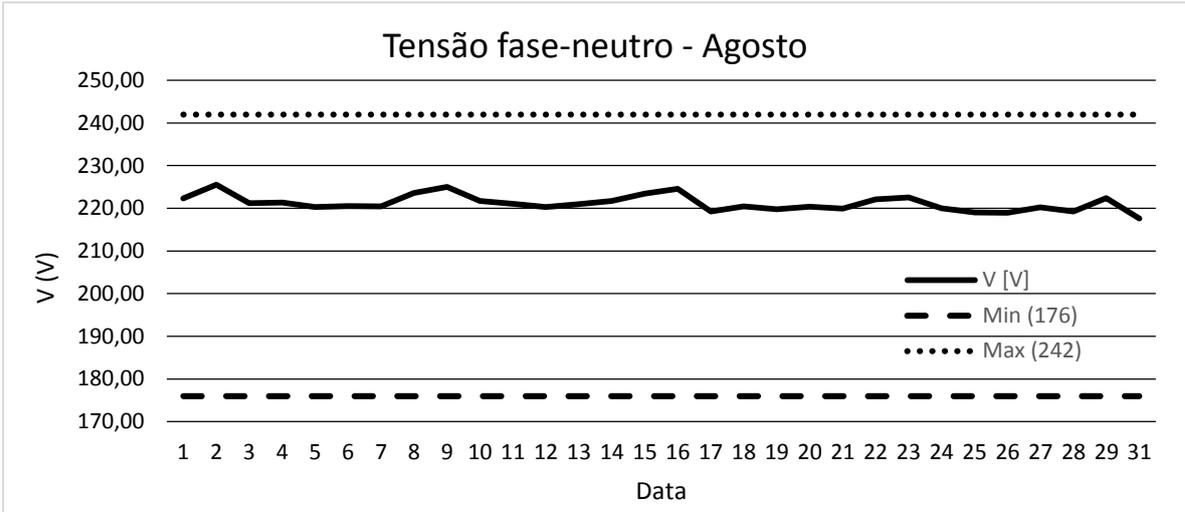


Figura 26 – Tensão elétrica fase-neutro, Agosto/2015.

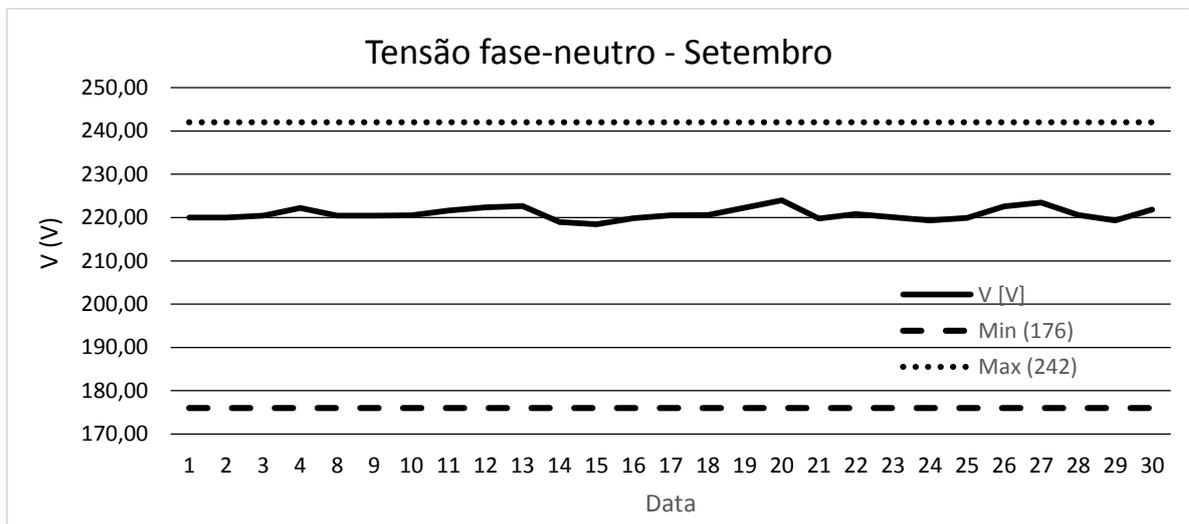


Figura 27 – Tensão elétrica fase-neutro, Setembro/2015.

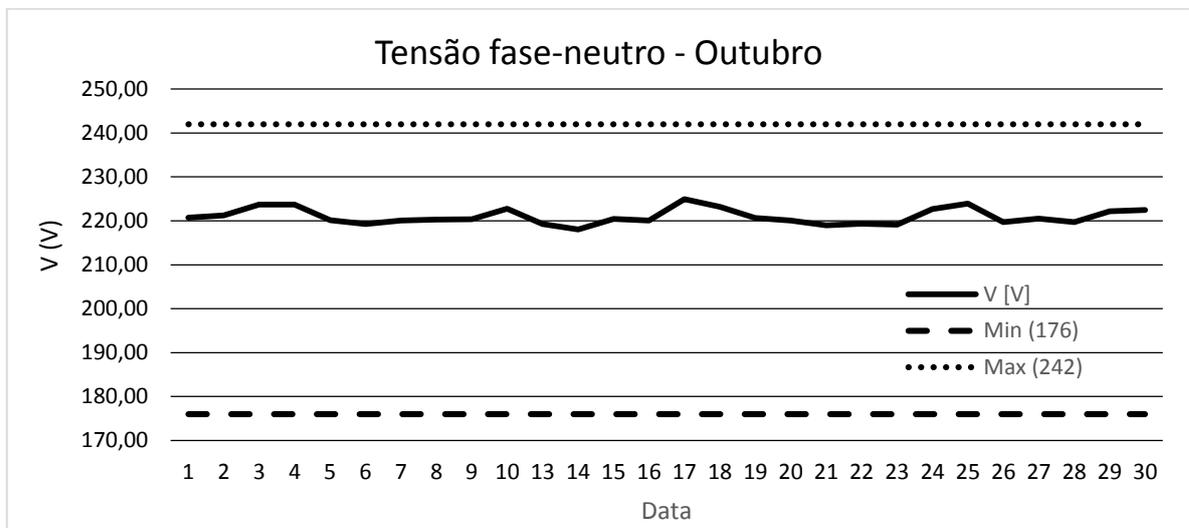


Figura 28 – Tensão elétrica fase-neutro, Outubro/2015.

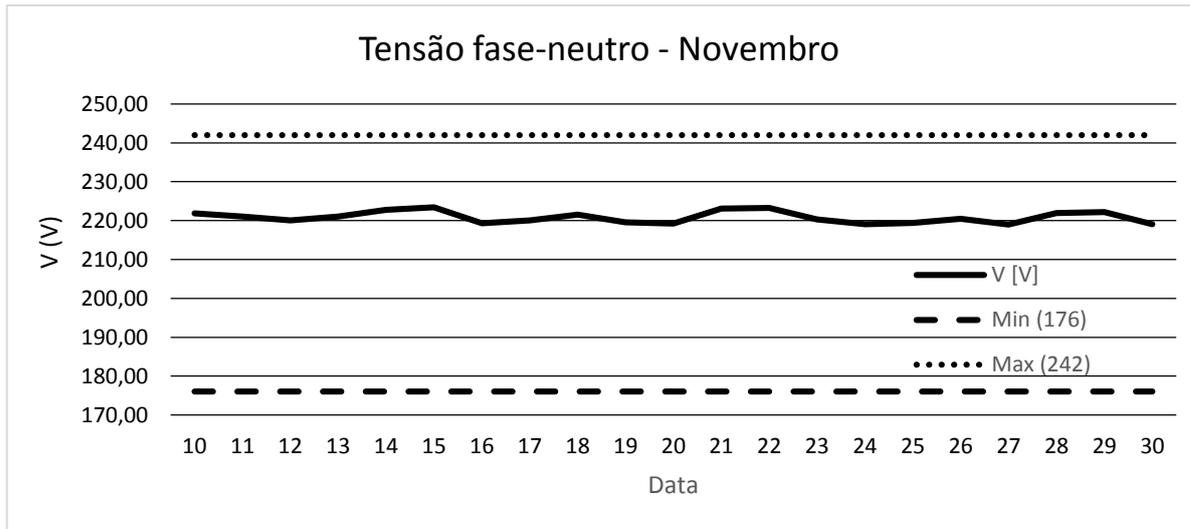


Figura 29 – Tensão elétrica fase-neutro, Novembro/2015.

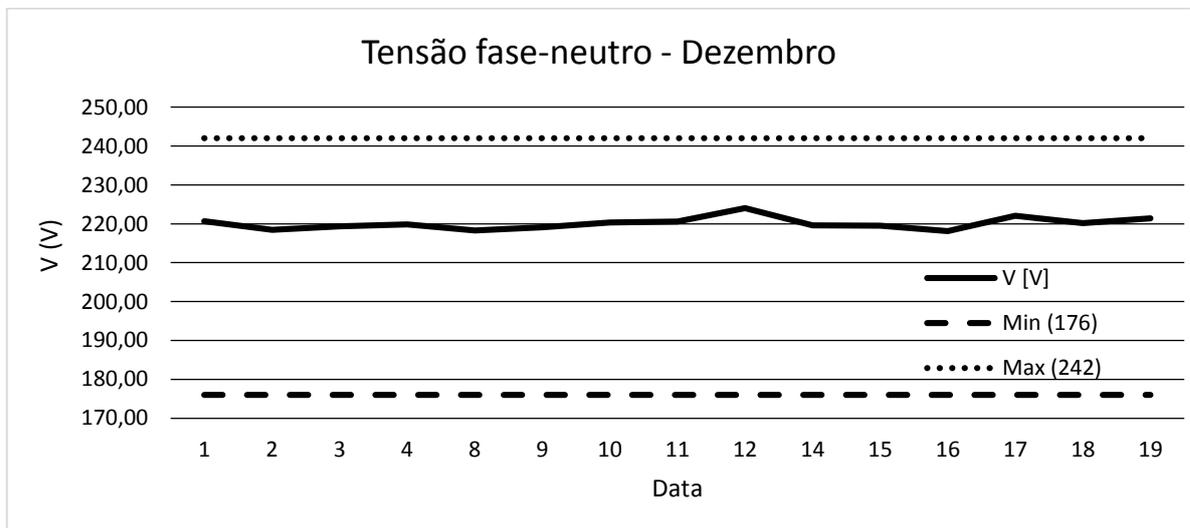


Figura 30 – Tensão elétrica fase-neutro, Dezembro/2015.

#### 4.2.2. Tensão neutro-terra

Este parâmetro é muito importante na análise da qualidade de energia, pois a presença de valores de tensão diferentes de zero pode indicar diversas anomalias no sistema elétrico, dentre eles: desequilíbrio de fases, transformador operando em vazio (ou próximo), presença de harmônicos, entre outros. Idealmente, o valor de tensão que deve-se existir entre neutro e terra é zero. As Figuras 31 a 35 mostram as medições desta grandeza.

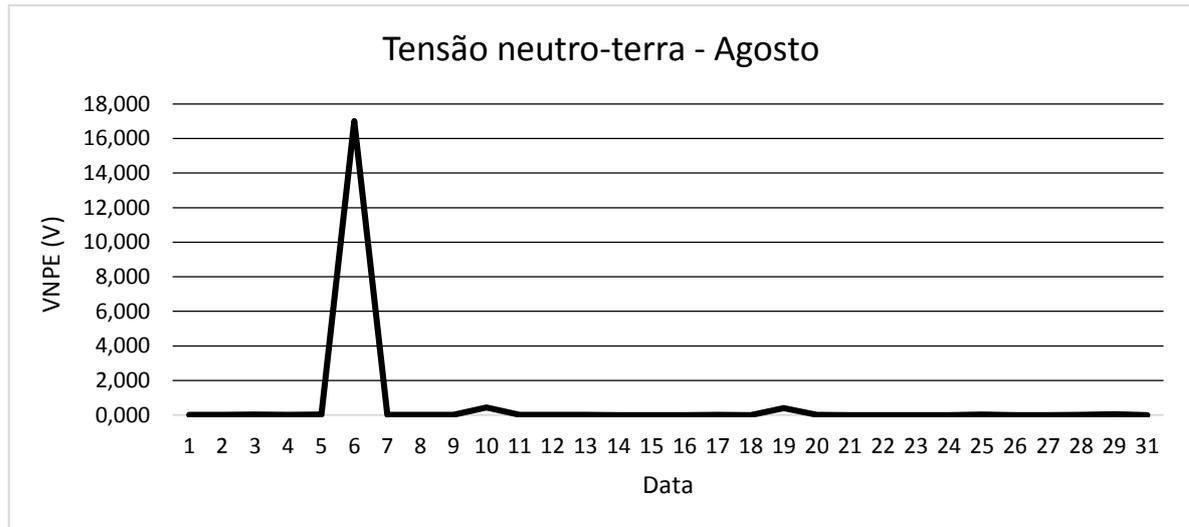


Figura 31 - Tensão elétrica neutro-terra, Agosto/2015.

No dia 06, como observado na Figura 31, constatou-se um valor médio de 17,0V de tensão neutro-terra. Analisando-se os valores medidos no referido dia, verificou-se que no fim da tarde (após as 16 horas), houve uma variação súbita desta grandeza, como mostrado na Tabela 6. Não foi possível precisar o motivo de tal anomalia na rede, mas percebe-se que provavelmente não foi gerado pelo SFCR, pois os demais parâmetros não apresentaram variação anormal.

<b>Hora</b>	<b>VNPE (V)</b>
16:13:00	68,25
16:28:00	183,8
16:43:00	180,9
16:58:00	203,6
17:13:00	128,5

Tabela 6 - Anomalia na tensão neutro-terra verificada em 06/08/2015.

Nos meses seguintes, como mostrado nas Figuras 32 a 35 a tensão neutro-terra apresentou valores bem próximos a zero, com valor médio máximo de 0,14V, registrado no dia 02/10/2015.

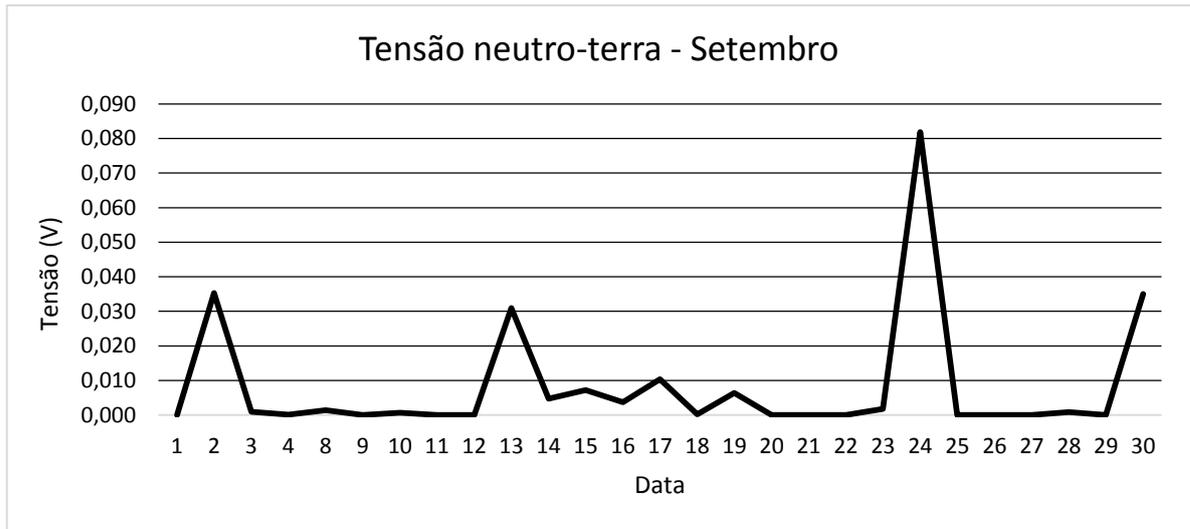


Figura 32 – Tensão elétrica neutro-terra, Setembro/2015.

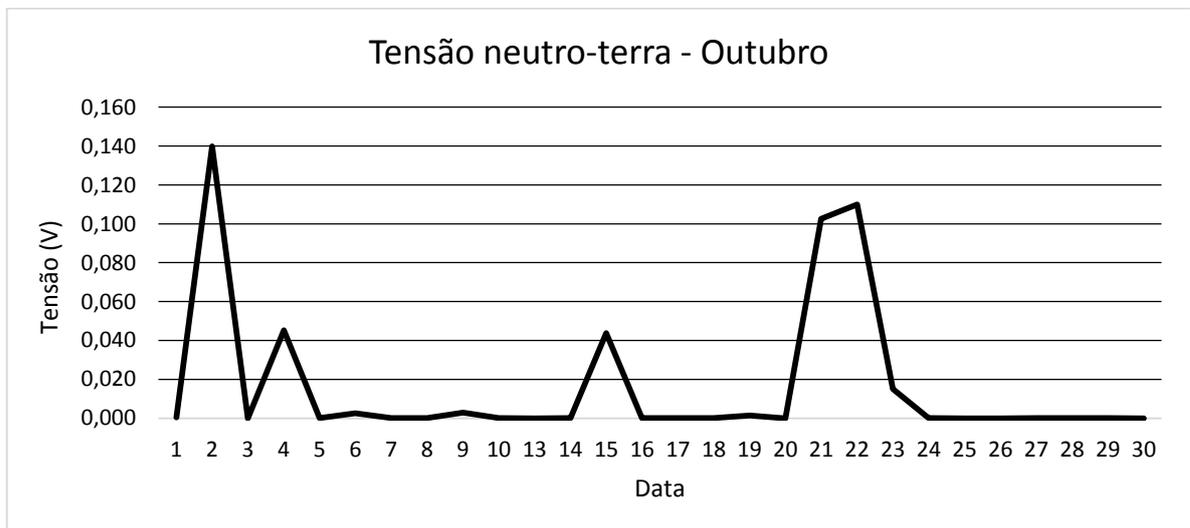


Figura 33 – Tensão elétrica neutro-terra, Outubro/2015.

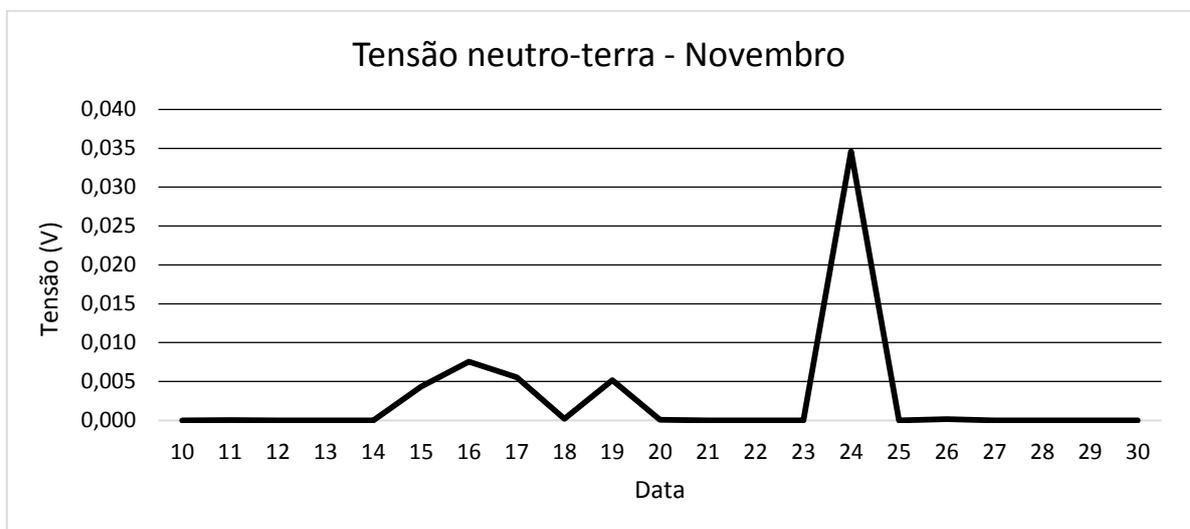


Figura 34 – Tensão elétrica neutro-terra, Novembro/2015.

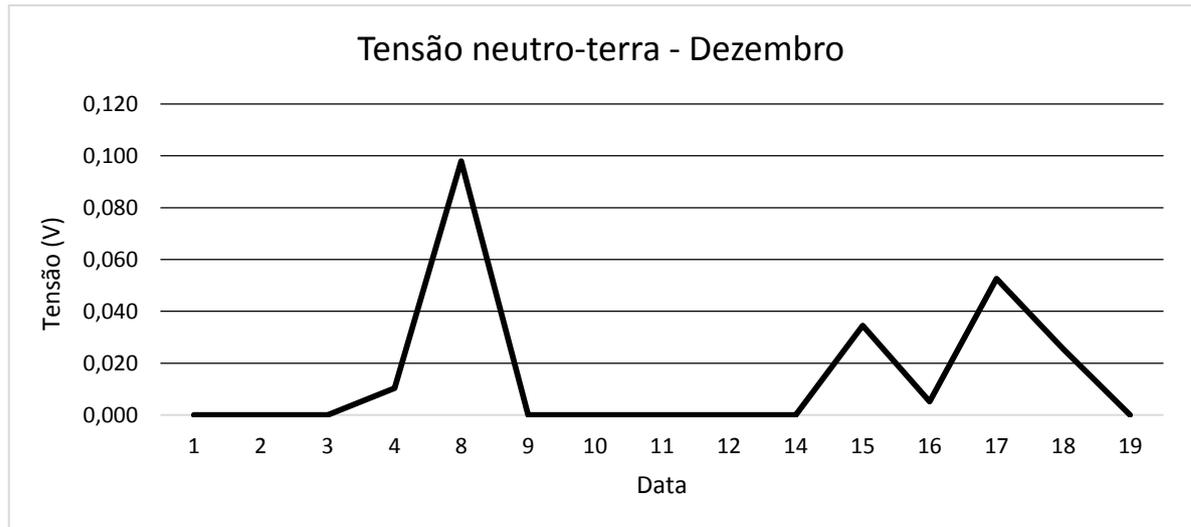


Figura 35 – Tensão elétrica neutro-terra, Dezembro/2015.

#### 4.2.3. Frequência elétrica

Segundo COSERN (2016), os sistemas de microgeração que se conectam através de inversores deve operar entre 57,5Hz e 60,5Hz, sem que haja interrupção do fornecimento de energia do sistema de microgeração ou redução da potência injetada. Analisando os dados medidos, verificou-se que não houveram variações de frequência da rede além dos valores permitidos, como pode ser observado nas Figuras 36 a 40.

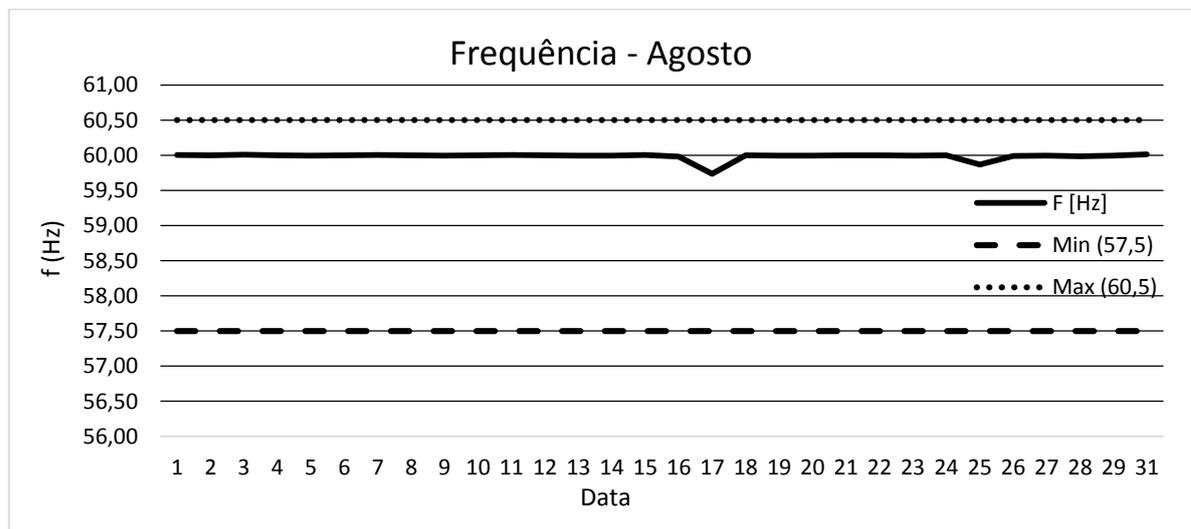


Figura 36 – Frequência elétrica da rede, Agosto/2015.

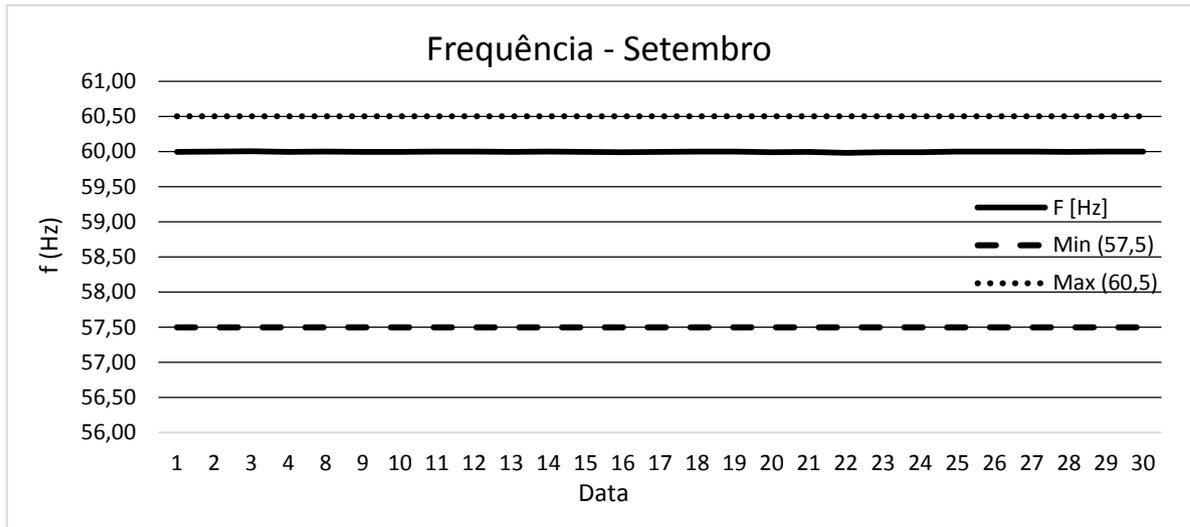


Figura 37 – Frequência elétrica da rede, Setembro/2015.

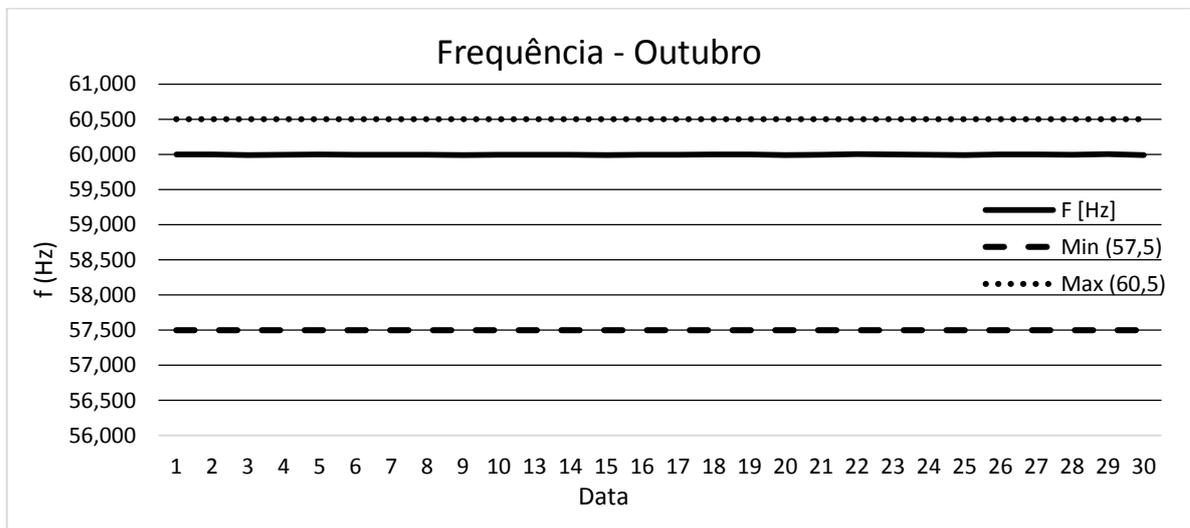


Figura 38 – Frequência elétrica da rede, Outubro/2015.

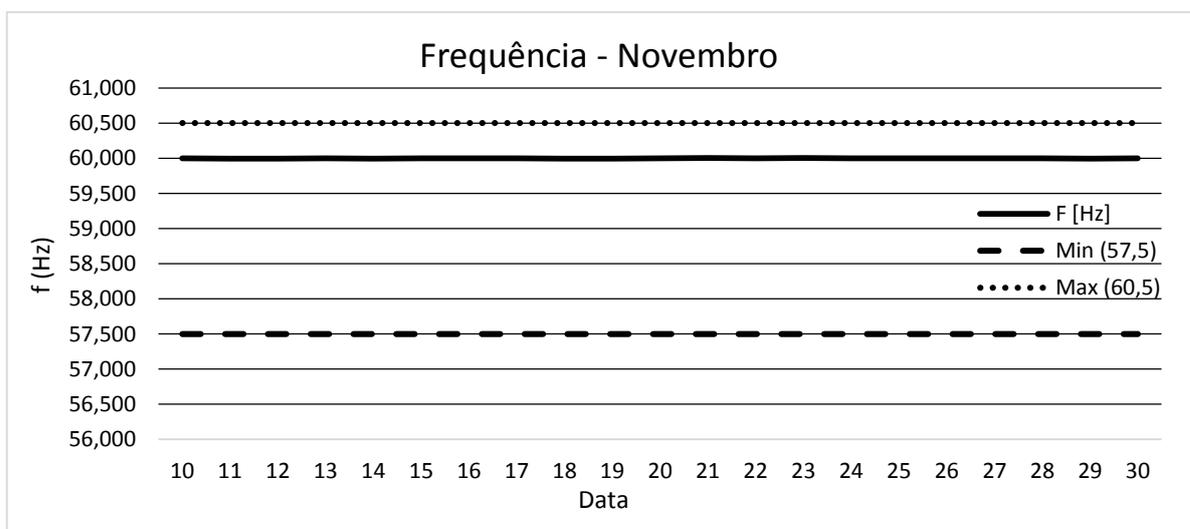


Figura 39 – Frequência elétrica da rede, Novembro/2015.

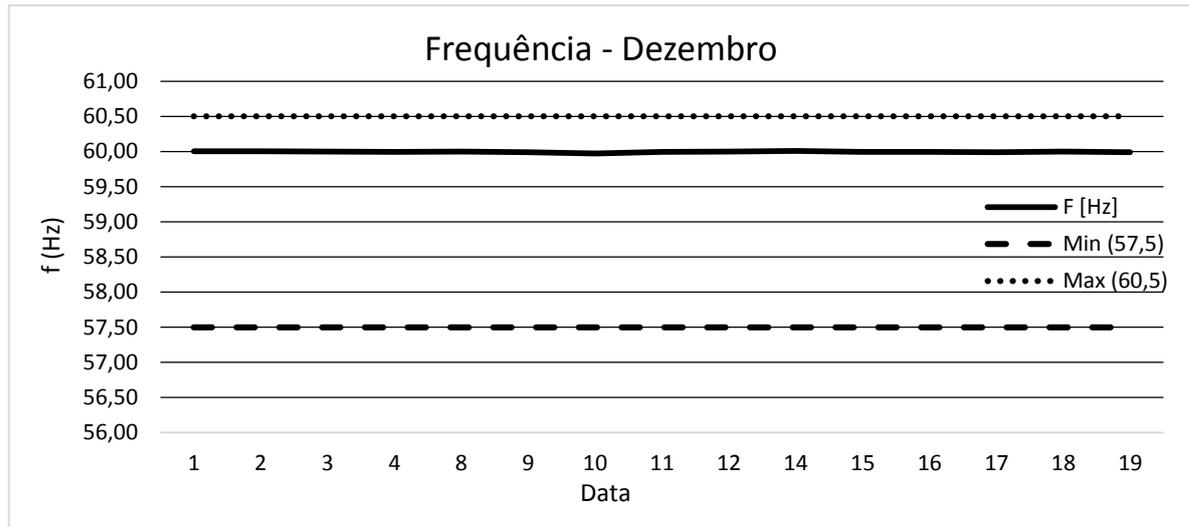


Figura 40 – Frequência elétrica da rede, Dezembro/2015.

#### 4.2.4. Corrente elétrica, potência ativa e Energia ativa

Os comportamentos da corrente elétrica, assim como da potência e energia ativa, demonstram a variação da capacidade de geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico conforme alterações das variáveis ambientais do sistema. Dentre as diversas variáveis ambientais, pode-se destacar as mais importantes: radiação solar, temperatura, nebulosidade e condição de limpeza dos módulos fotovoltaicos. Além das ambientais, outras variáveis podem influenciar na energia e potência gerada pelo SFCR, em que se destacam o nível de tensão e frequência da rede elétrica, parâmetros que podem atuar diretamente no funcionamento do sistema, desligando-o, caso seus valores estejam além dos limites estabelecidos em norma. Como o valor de tensão de fase é praticamente constante, percebe-se nas Figuras 41 a 55 que estes três parâmetros apresentam comportamentos similares, devido à potência e energia ativa dependerem em grande parte da corrente elétrica e da tensão. A corrente média diária gerada pelo SFCR apresentou valores entre 5,0A e 8,0A (vide Figuras 41 a 45), enquanto a corrente máxima de pico do sistema é 13A.

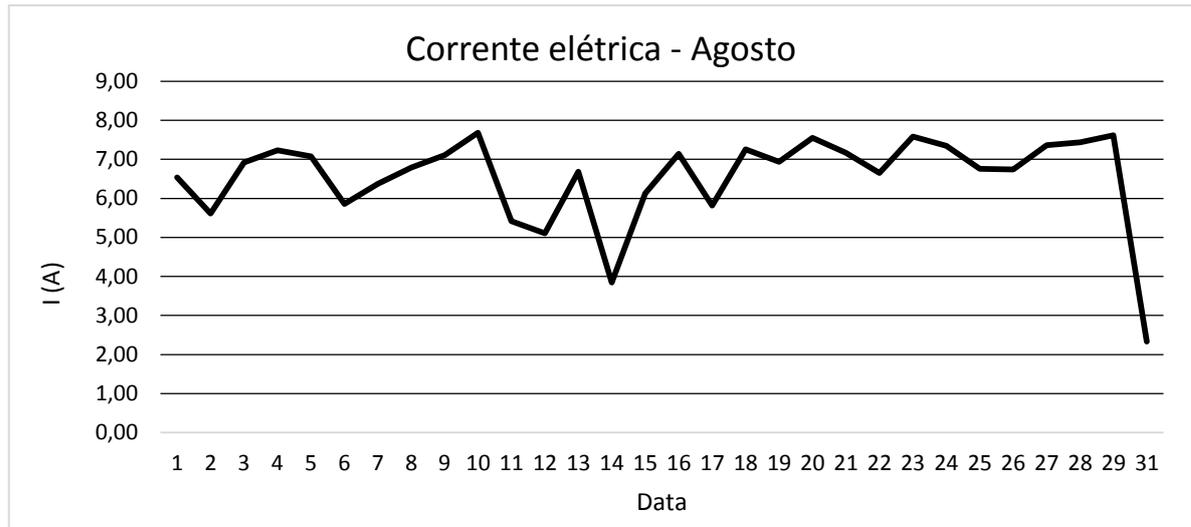


Figura 41 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Agosto/2015.

É perceptível que no dia 31 a corrente elétrica apresentou valor médio muito baixo, quando comparados com o restante do mês. Isso se deve exclusivamente o fato de que, neste dia, o analisador de energia iniciou a gravação dos dados às 15:18 horas (pelos motivos já relatados no item 4.2), período do dia que a radiação solar já está bem atenuada. Este mesmo fato será verificado nas Figuras 46 e 51 nos gráficos da potência e da energia ativa, respectivamente.

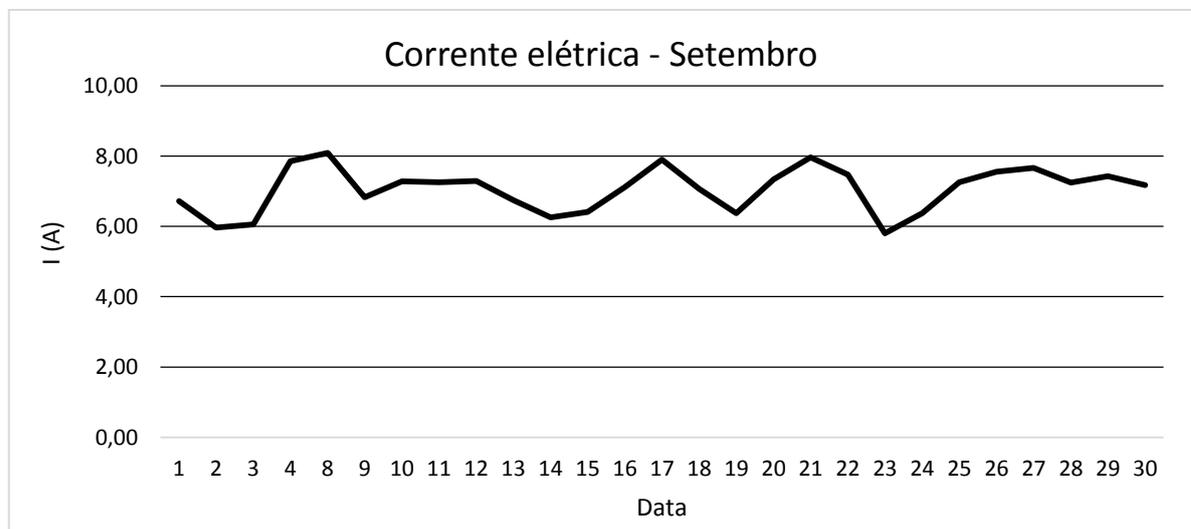


Figura 42 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Setembro/2015.

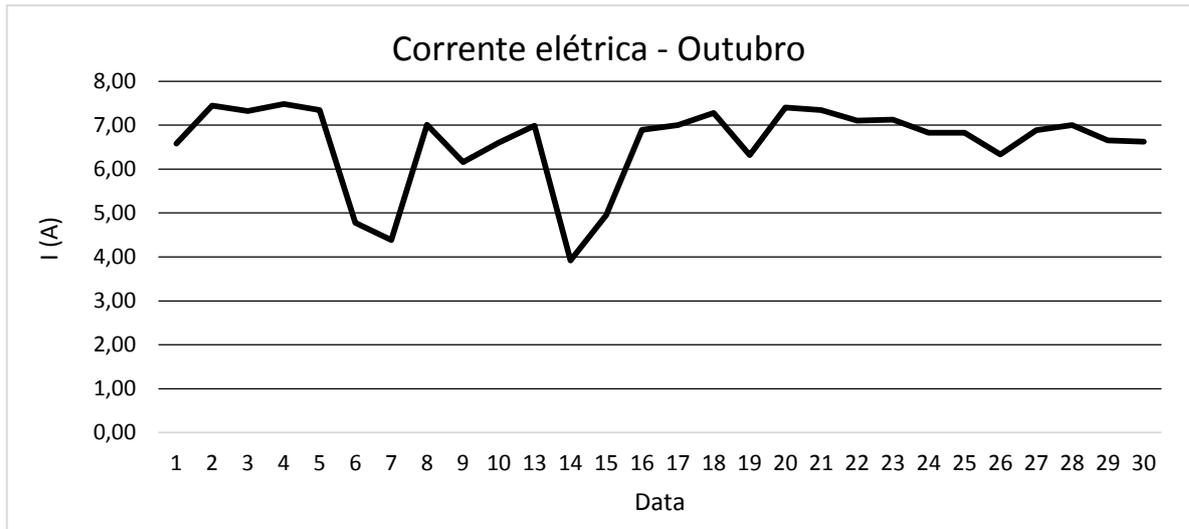


Figura 43 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Outubro/2015.

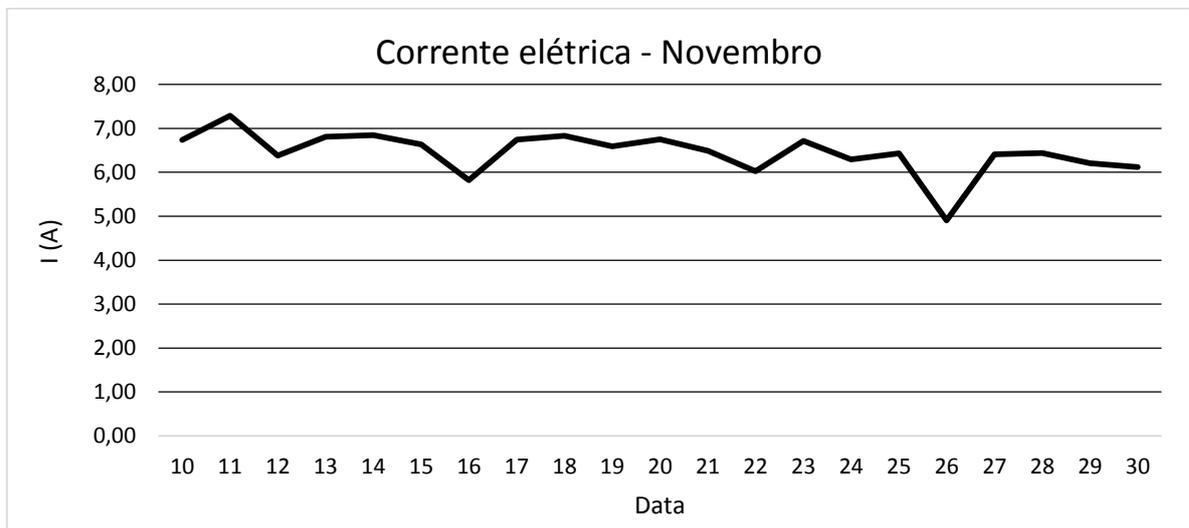


Figura 44 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Novembro/2015.

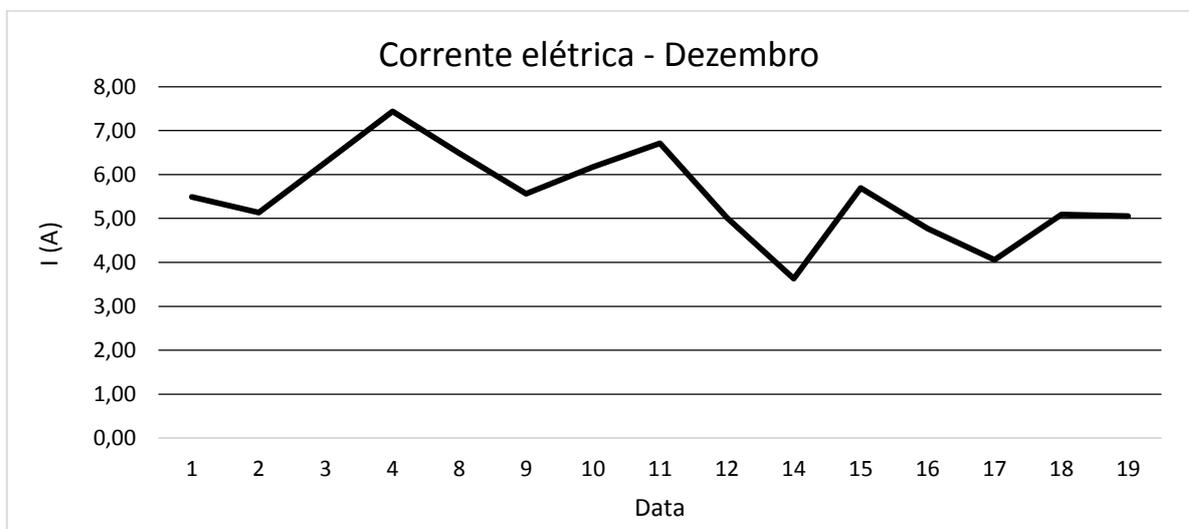


Figura 45 – Corrente elétrica gerada pelo SFCR, Dezembro/2015.

As Figuras 46 a 50 mostram o comportamento e valores médios diários da potência ativa gerada pelo sistema fotovoltaico. O valor médio mensal da potência ativa variou de 1,3 a 1,6 kW, como foi mostrado na Tabela 4.

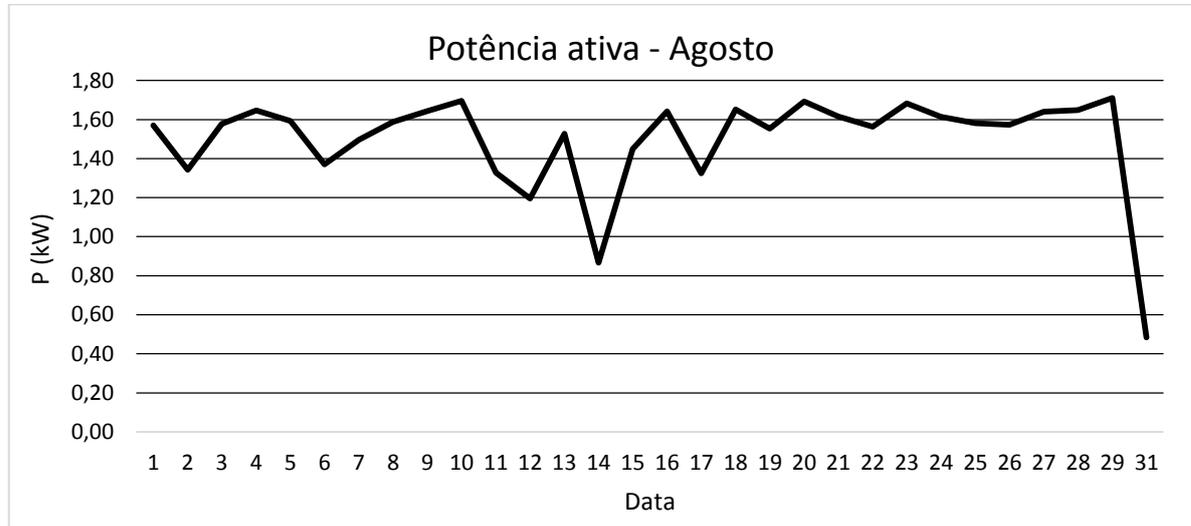


Figura 46 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Agosto/2015.

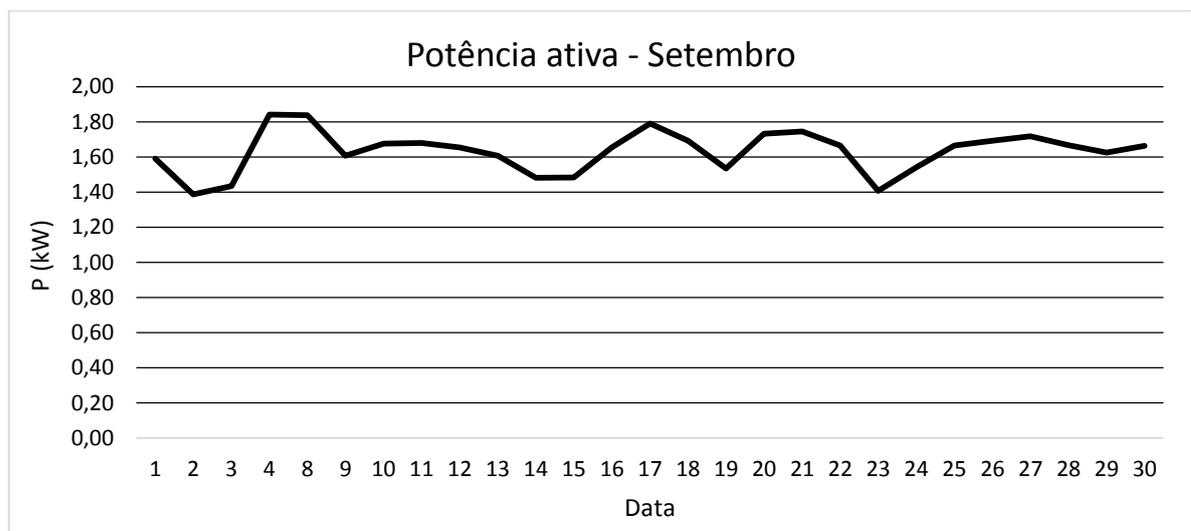


Figura 47 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Setembro/2015.

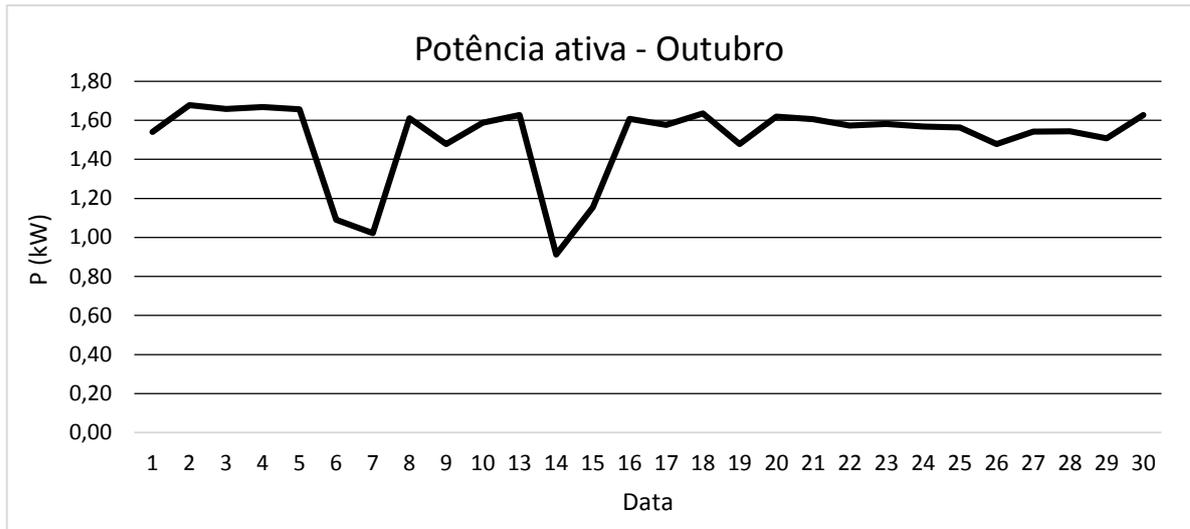


Figura 48 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Outubro/2015.

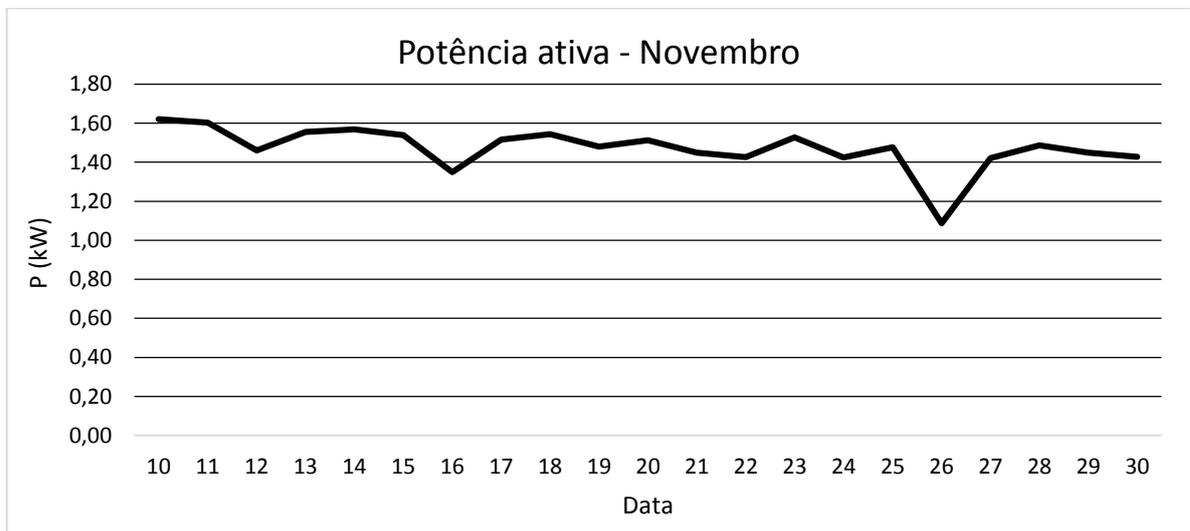


Figura 49 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Novembro/2015.

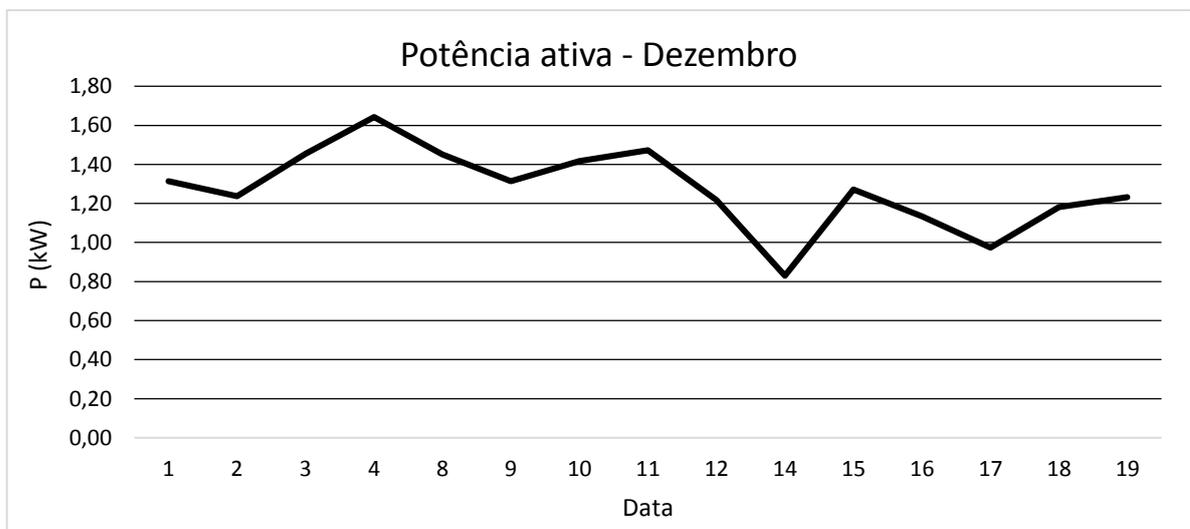


Figura 50 – Potência elétrica gerada pelo SFCR, Dezembro/2015.

A energia ativa diária gerada pelo sistema fotovoltaico variou entre 16 e 18 kWh/dia, como mostra os valores médios mensais deste parâmetro, como pode ser observado na Tabela 4. Vale salientar que o valor médio do mês de dezembro pode ser desconsiderado, pois foi observado que em três dias não houveram medições durante todo o dia, em especial no dia 14/12/2015, em que o equipamento iniciou sua medição as 13:47 hs, contabilizando apenas 2,9kWh, trazendo, assim, grande influência ao valor médio do referido mês (vide Figura 55). Nas Figuras 51 a 55 podem ser visualizados os gráficos da energia gerada diária pelo SFCR.

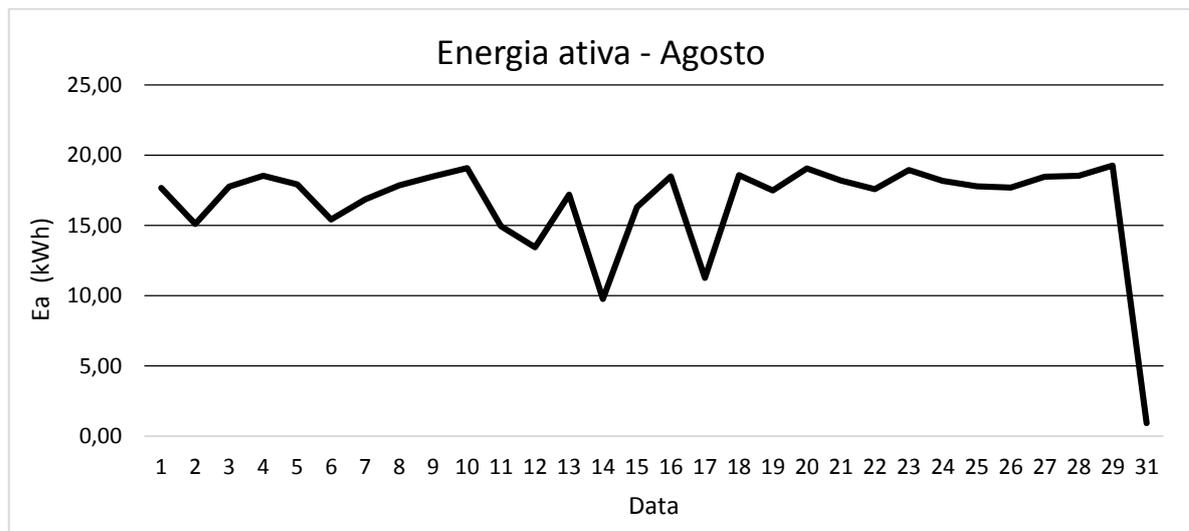


Figura 51 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Agosto/2015.

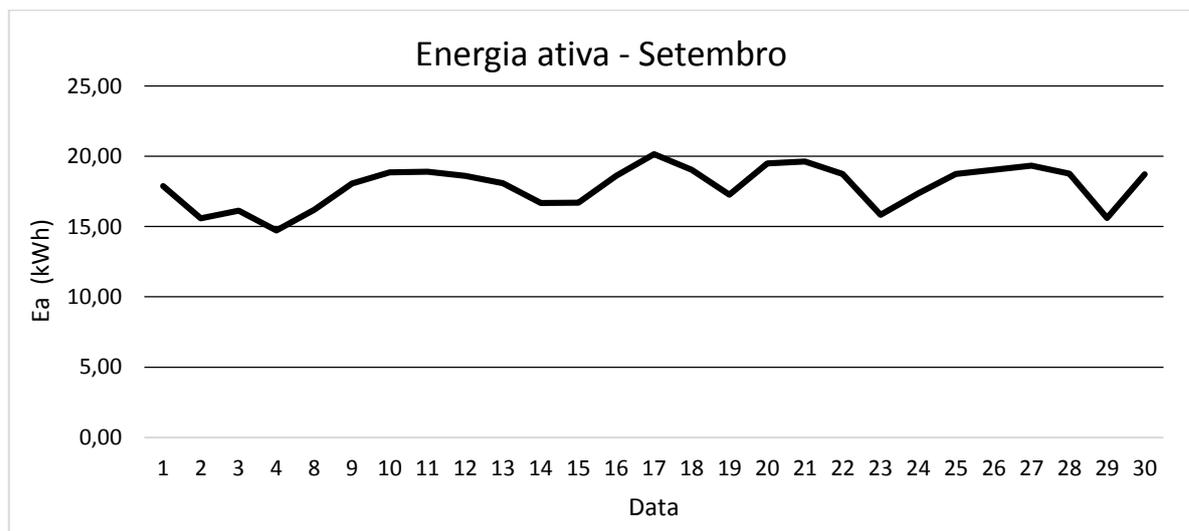


Figura 52 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Setembro/2015.

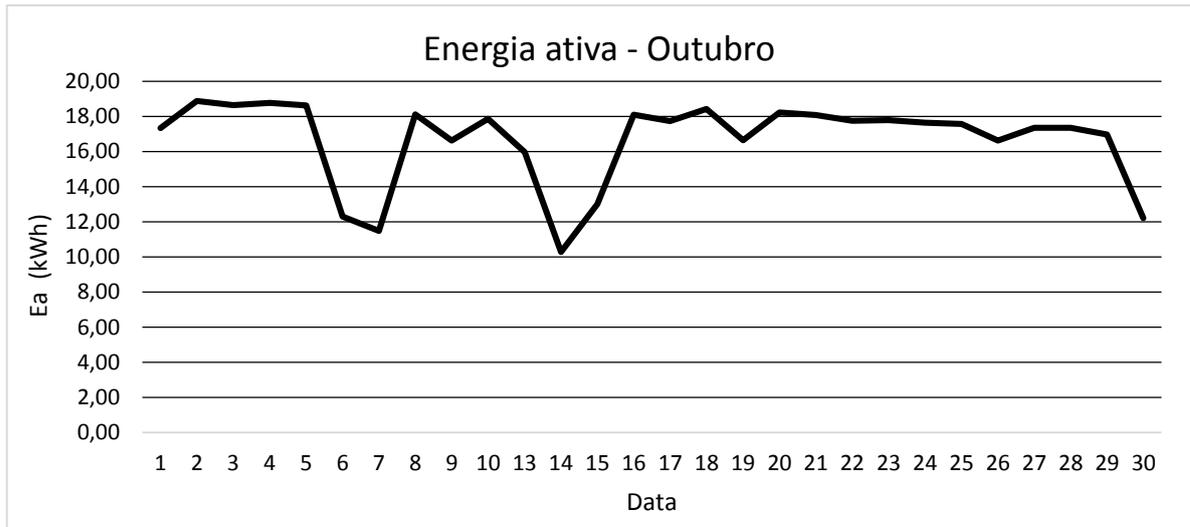


Figura 53 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Outubro/2015.

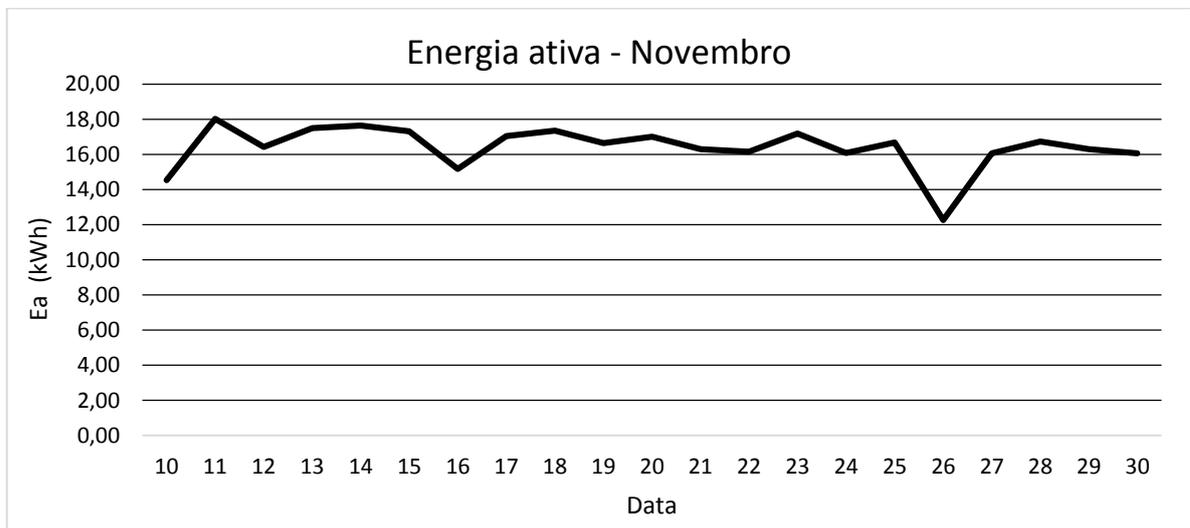


Figura 54 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Novembro/2015.

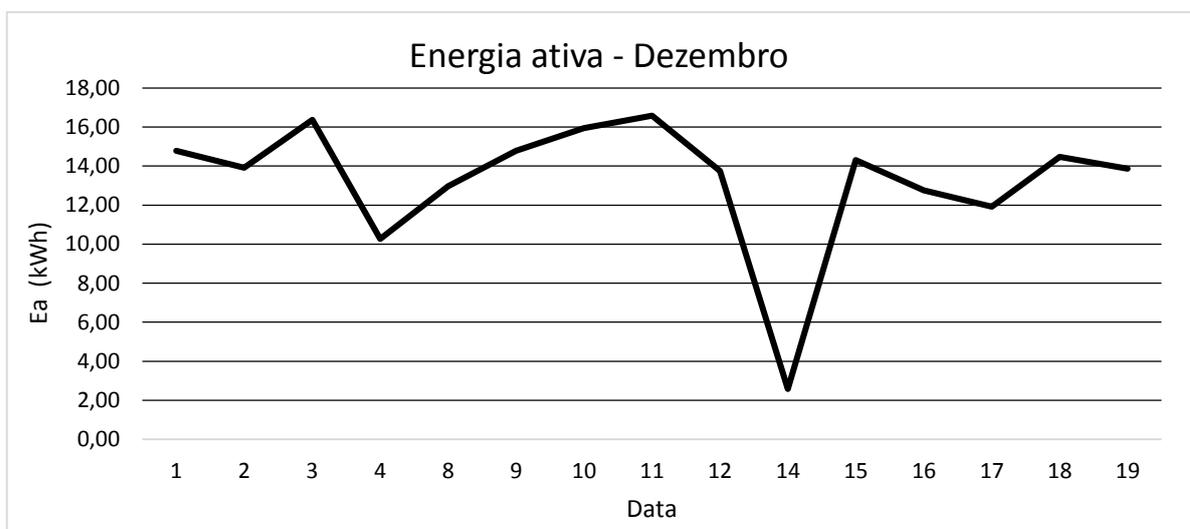


Figura 55 – Energia elétrica ativa gerada pelo SFCR, Dezembro/2015.

#### 4.2.5. Fator de potência

Como explanado no item 2.5, os sistemas de microgeração com potência nominal menor ou igual a 3kW, como é o caso do SFCR estudado neste trabalho, devem apresentar fator de potência entre 0,98 indutivo e 0,98 capacitivo quando a potência injetada for maior que 20% da potência nominal do gerador. Assim, para a construção dos gráficos mostrados nas Figuras 56 a 60 foram analisados somente os períodos de tempo em que o sistema injetou na rede mais que 600W. Vale salientar que não foram construídos gráficos para o fator de potência capacitivo (mesmo sendo realizadas medições para este parâmetro), somente para o indutivo, pelo fato de que o SFCR apresentou fator de potência predominantemente indutivo ou unitário.

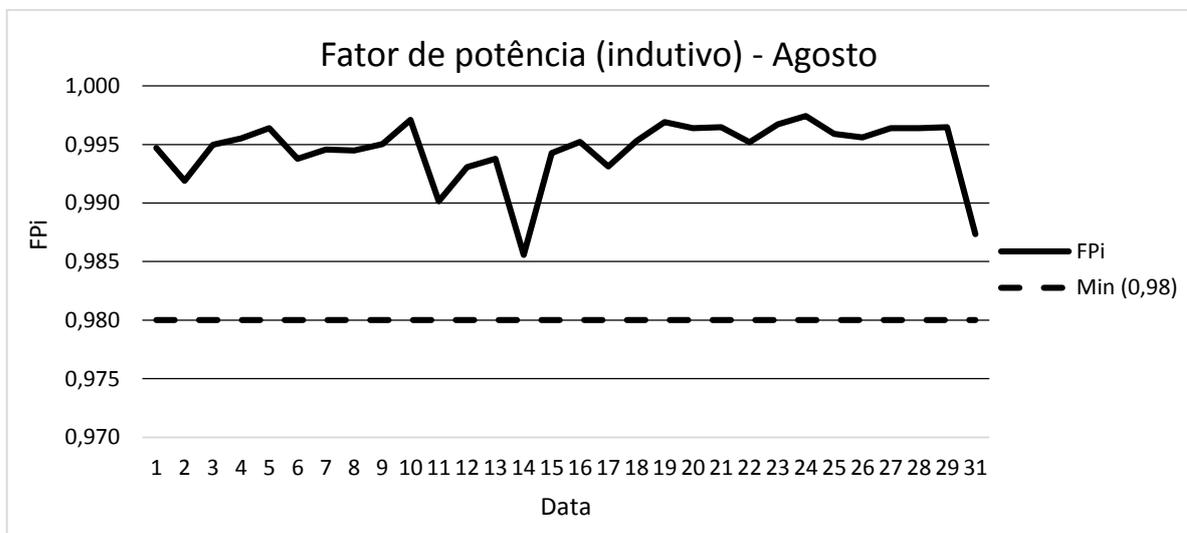


Figura 56 – Fator de potência indutivo, Agosto/2015.

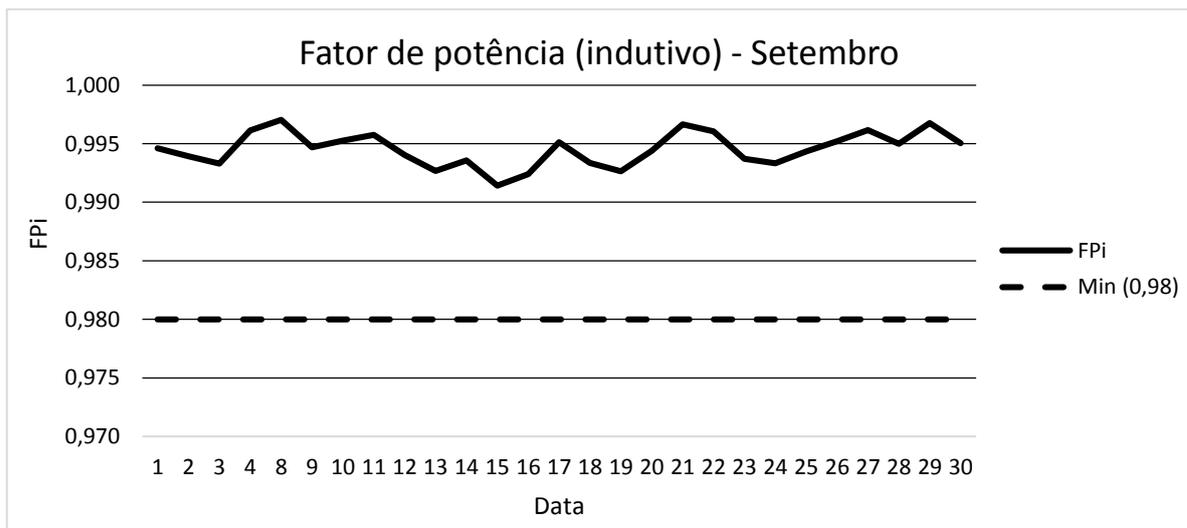


Figura 57 – Fator de potência indutivo, Setembro/2015.

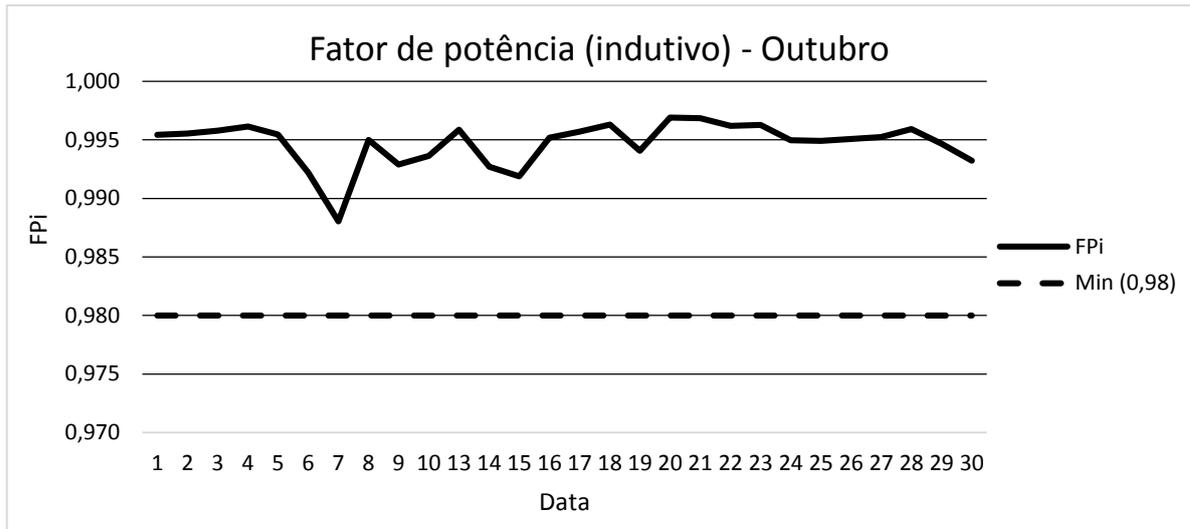


Figura 58 – Fator de potência indutivo, Outubro/2015.

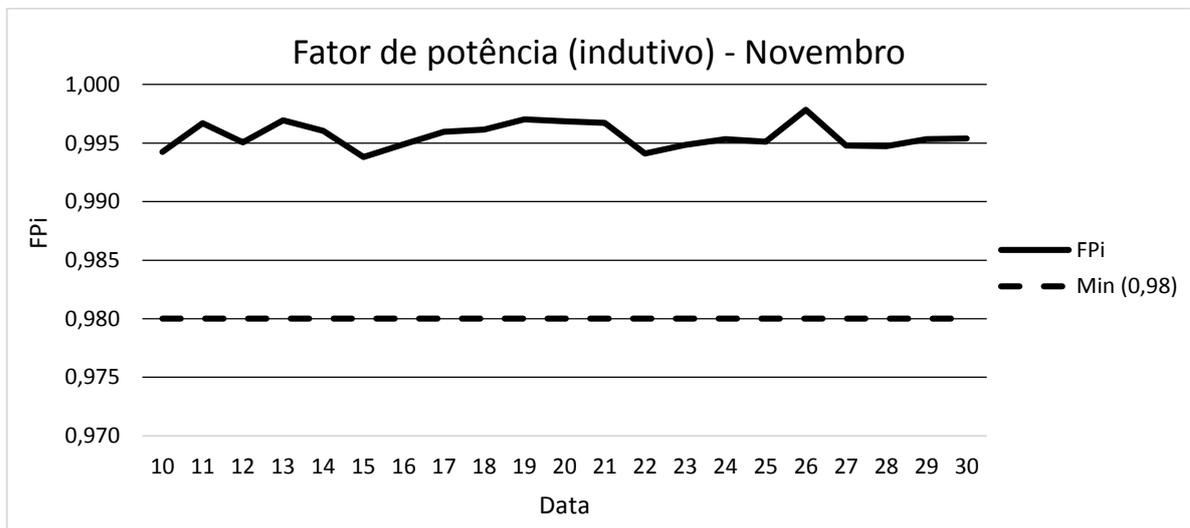


Figura 59 – Fator de potência indutivo, Novembro/2015.

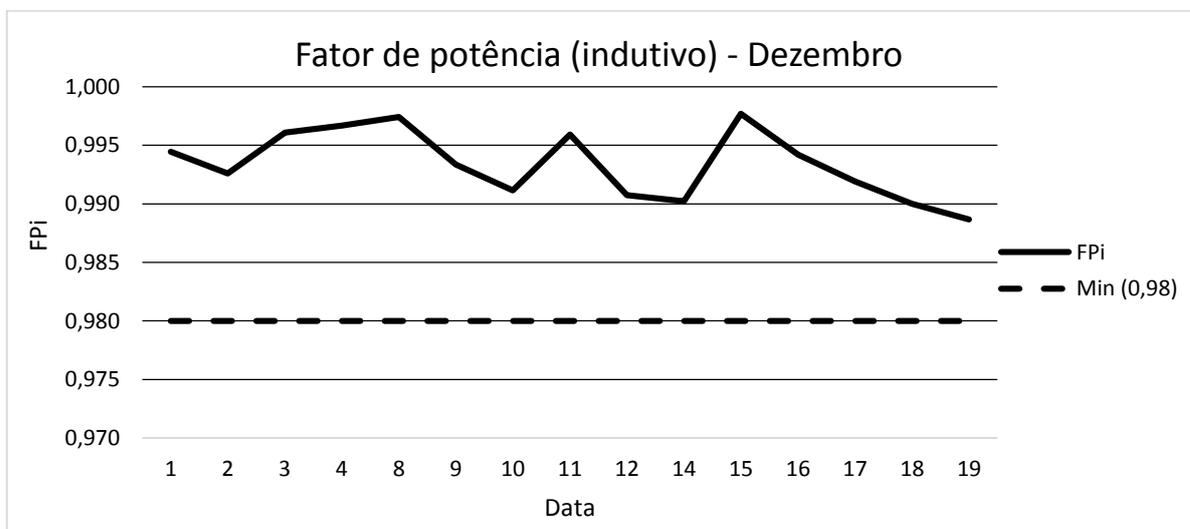


Figura 60 – Fator de potência indutivo, Dezembro/2015.

Analisando o comportamento do fator de potência mostrado nos gráficos e os valores apresentados nas Tabelas 4 e 5, pode-se concluir que o inversor possui um elevado fator de potência, apresentando valores com poucas variações em torno de 0,99, valor este próximo ao valor ótimo, que é quando o fator de potência é unitário. Verificou-se ainda que o maior desvio padrão alcançado na média mensal foi de 0,0029, o que confirma a estabilidade do fator de potência do sistema nos momentos requeridos pela legislação.

#### 4.2.6. Taxa de distorção harmônica total de tensão – THDV (%)

Com relação a distorção harmônica de tensão, é possível concluir que o sistema fotovoltaico estudado não apresenta anomalias, apresentando valores médios da ordem de 2%, que representa apenas 1/4 do valor máximo estabelecido. As Figuras 61 a 65 trazem estes valores medidos.

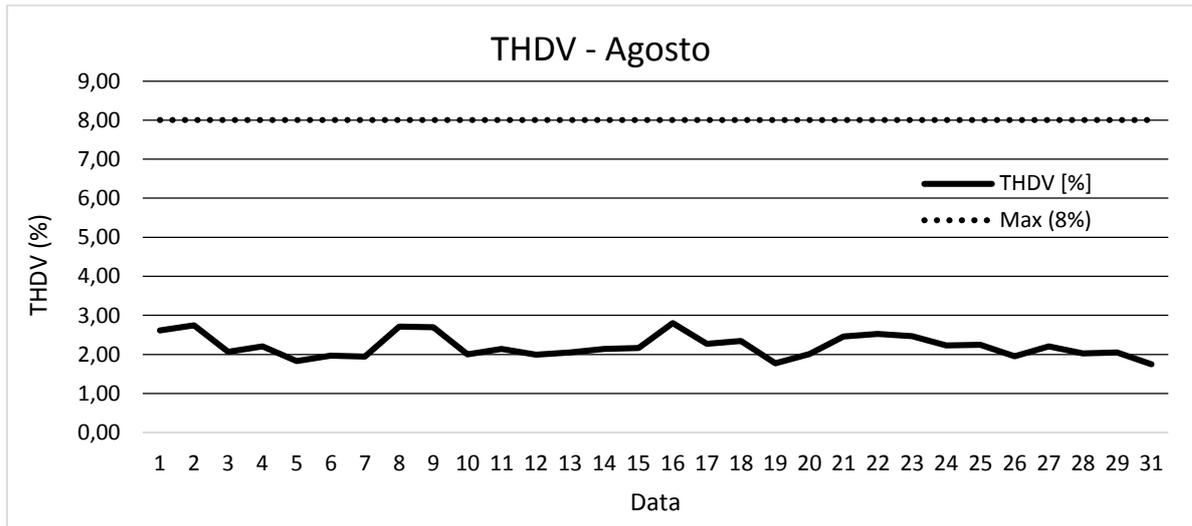


Figura 61 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Agosto/2015.

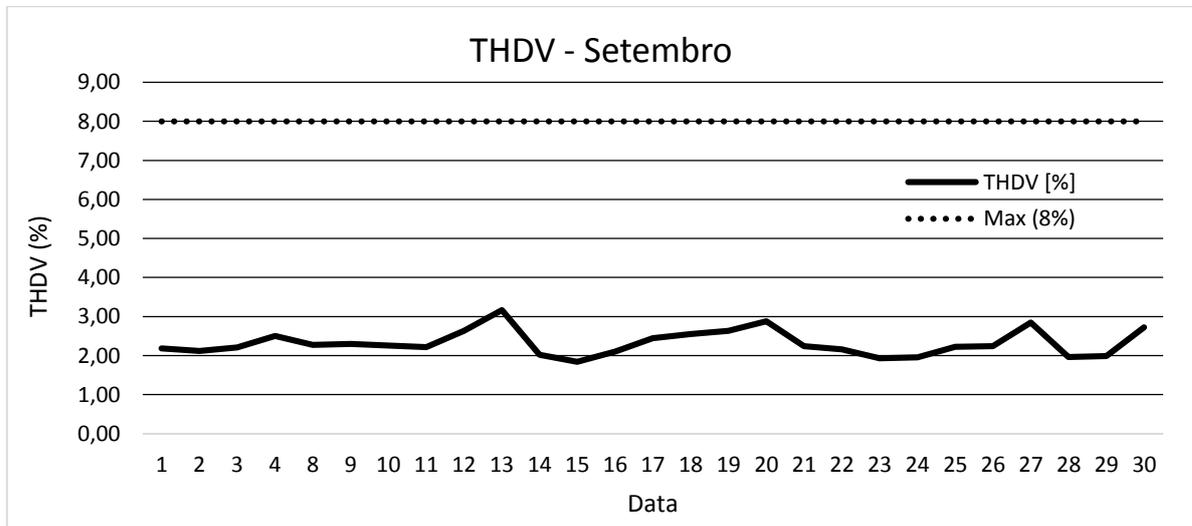


Figura 62 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Setembro/2015.

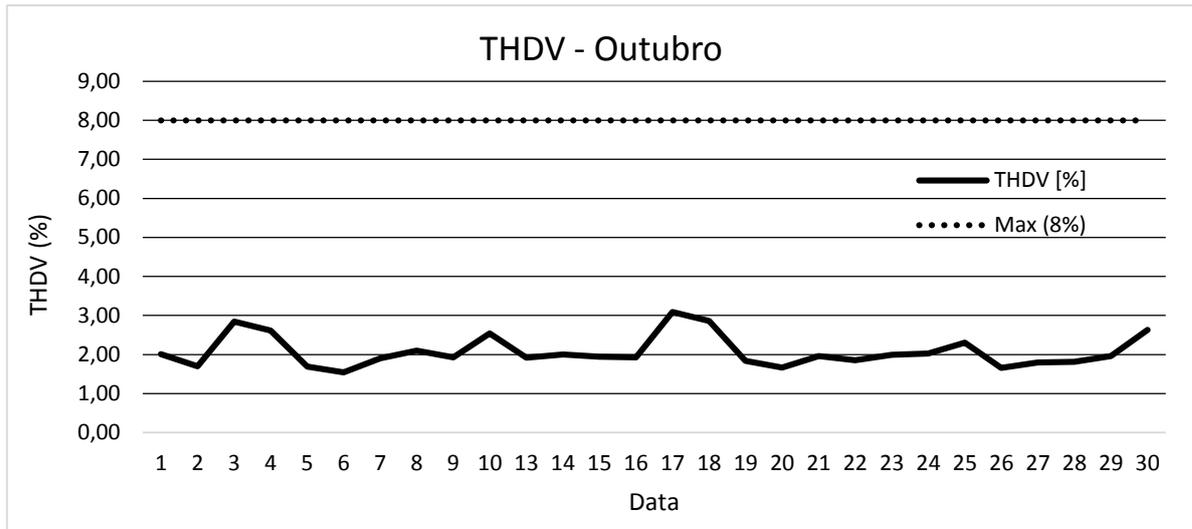


Figura 63 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Outubro/2015.

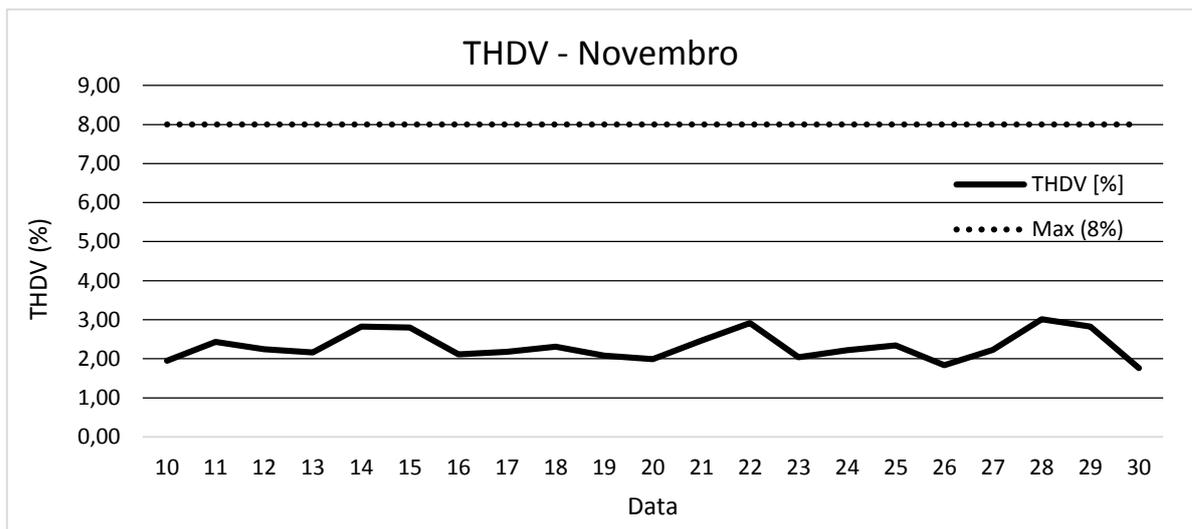


Figura 64 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Novembro/2015.

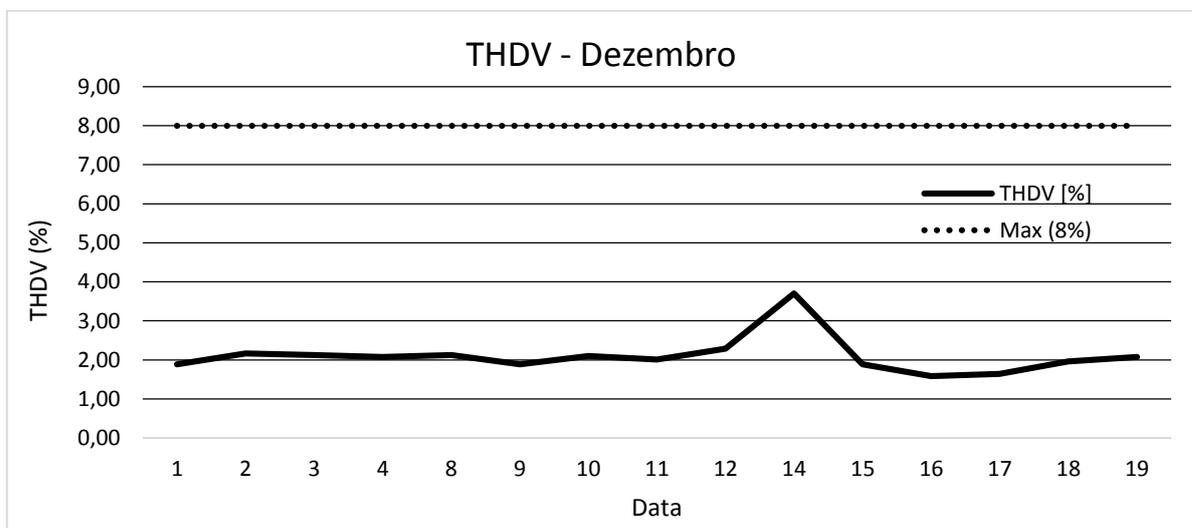


Figura 65 – Taxa de distorção harmônica total de tensão, Dezembro/2015.

#### 4.2.7. Taxa de distorção harmônica total de corrente – THDI (%)

COSERN (2016) regula que a taxa de distorção total de corrente deve ser inferior a 5%, na potência nominal do sistema de geração distribuída. Dessa forma, foram avaliados os pontos (a cada mês) que o SFCR aproximou-se da potência nominal. No caso, avaliou-se quando a potência injetada pelo inversor ultrapassou 90% da potência nominal, visto que poucas vezes o SFCR alcança a nominal. As Figuras 66 a 70 ilustram o comportamento da THDI nas situações descritas neste item.

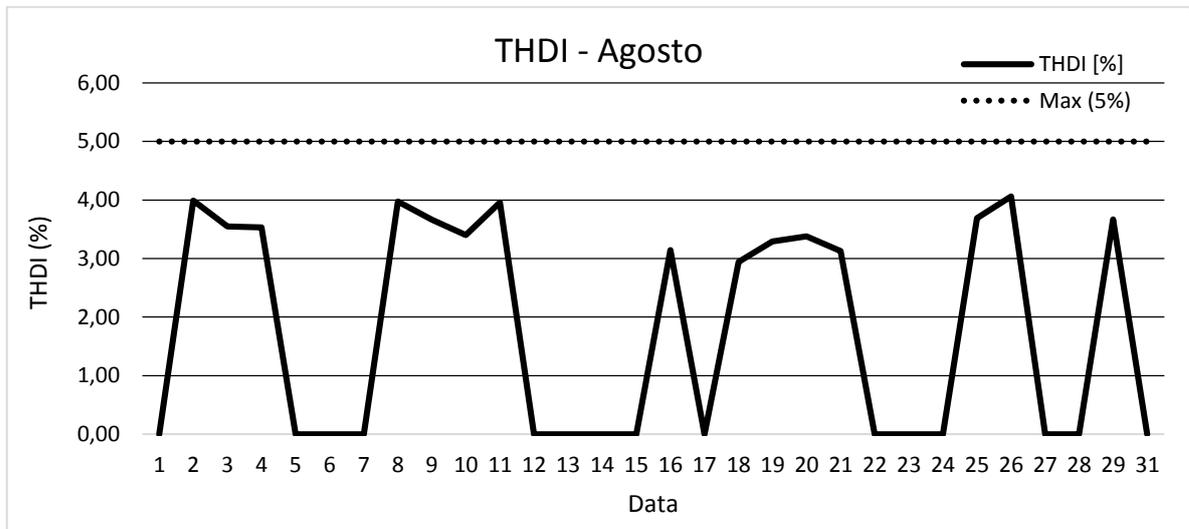


Figura 66 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Agosto/2015.

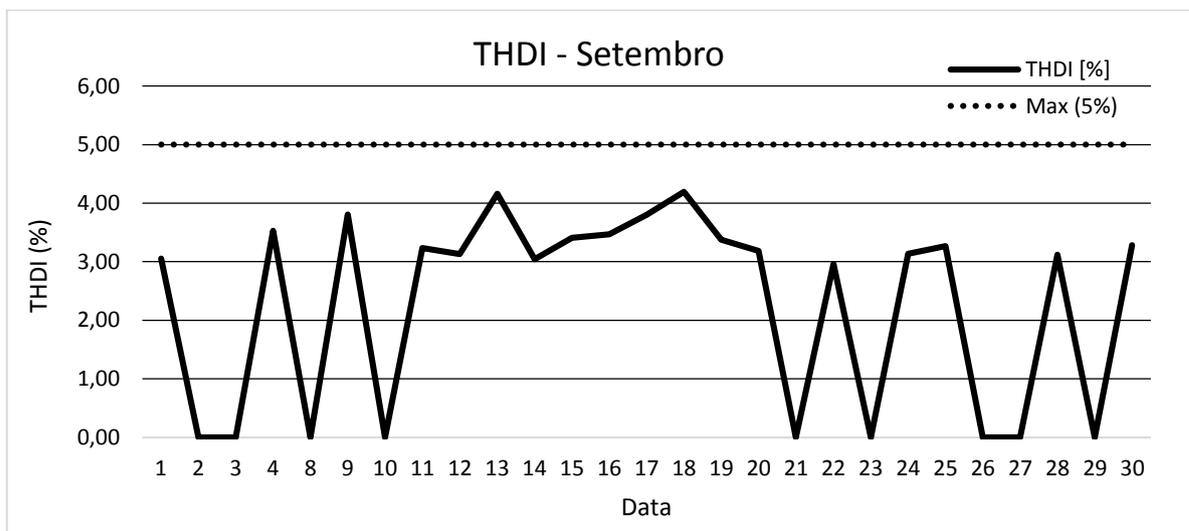


Figura 67 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Setembro/2015.

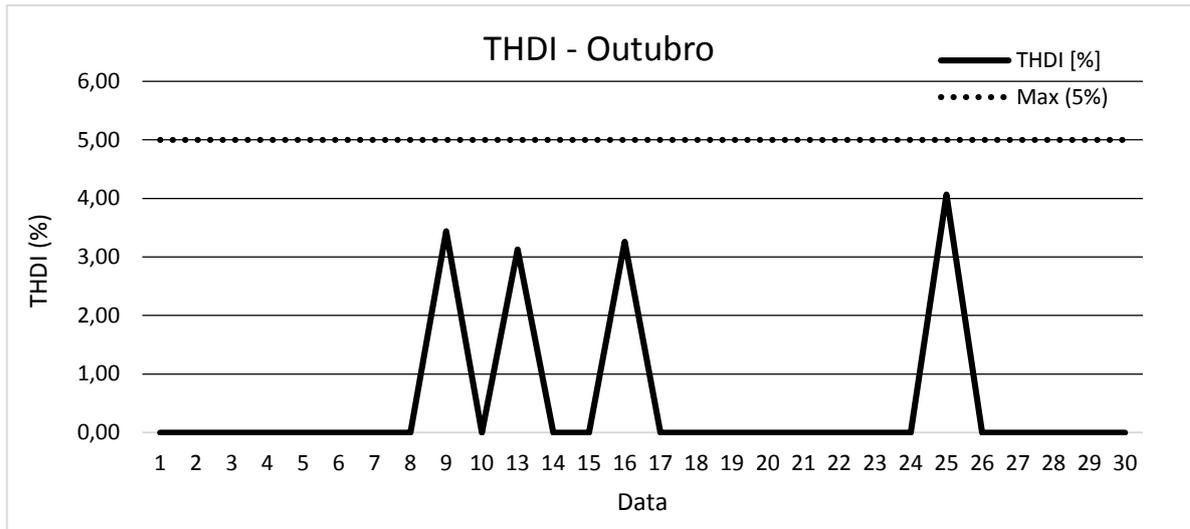


Figura 68 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Outubro/2015.

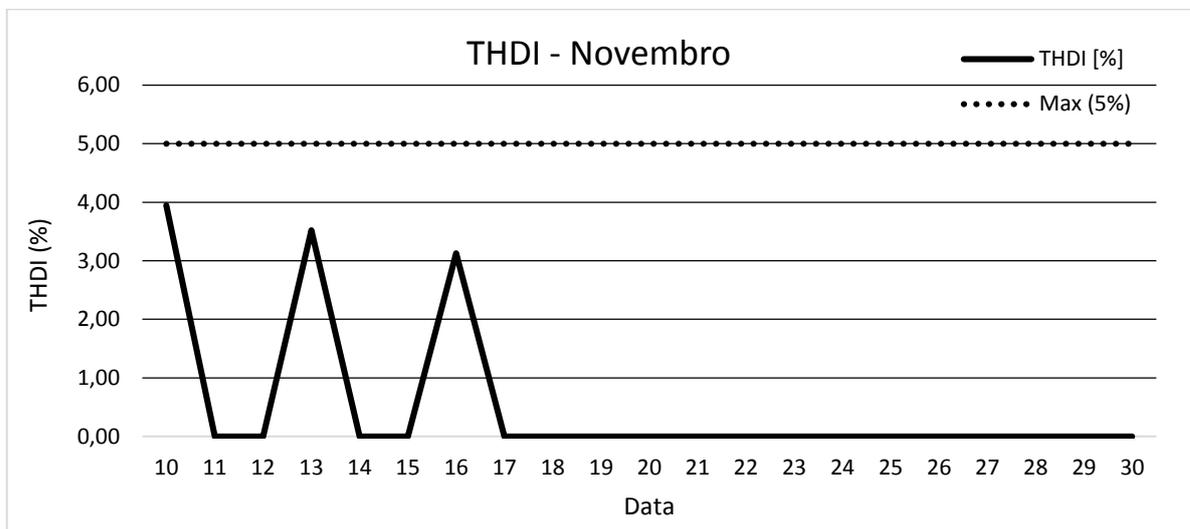


Figura 69 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Novembro/2015.

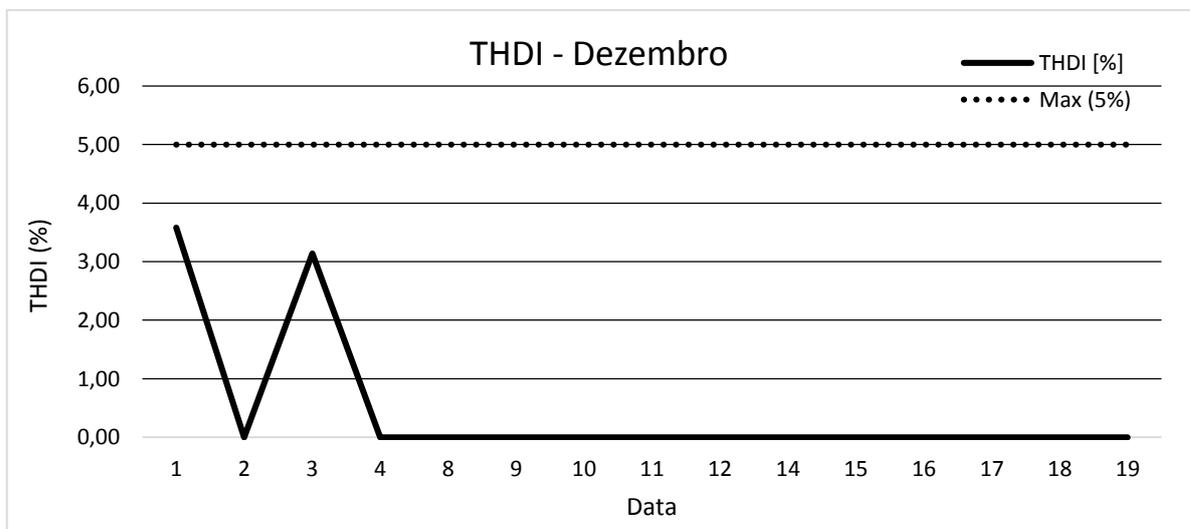


Figura 70 – Taxa de distorção harmônica total de corrente, Dezembro/2015.

Analisando a taxa de distorção harmônica total da corrente elétrica injetada pelo inversor conclui-se que vários dias (em alguns meses, praticamente todos os dias) o SFCR não alcança 90% da potência nominal. Assim, conclui-se que, considerando os requisitos especificados em norma, o inversor não injeta na rede elétrica mais que 5% de THDI. Portanto, o sistema fotovoltaico atende às normas também para este parâmetro.

#### 4.3. Análise do impacto da inserção do SFCR na rede elétrica

Nos meses de Março a Maio de 2016, foram realizadas medições dos parâmetros elétricos no quadro geral de baixa tensão (QGBT) do prédio CITED, com o objetivo de avaliar o impacto causado pela inserção da microgeração distribuída tratada neste trabalho. Para isto, o analisador de energia elétrica foi instalado no QGBT, como mostrado na Figura 71. No mês de Março foram coletados dados com o SFCR desligado e nos meses seguintes, a saber, Abril e Maio, o sistema fotovoltaico foi religado, de forma que torna-se possível comparar os dados medidos com e sem injeção de potência pelo SFCR.

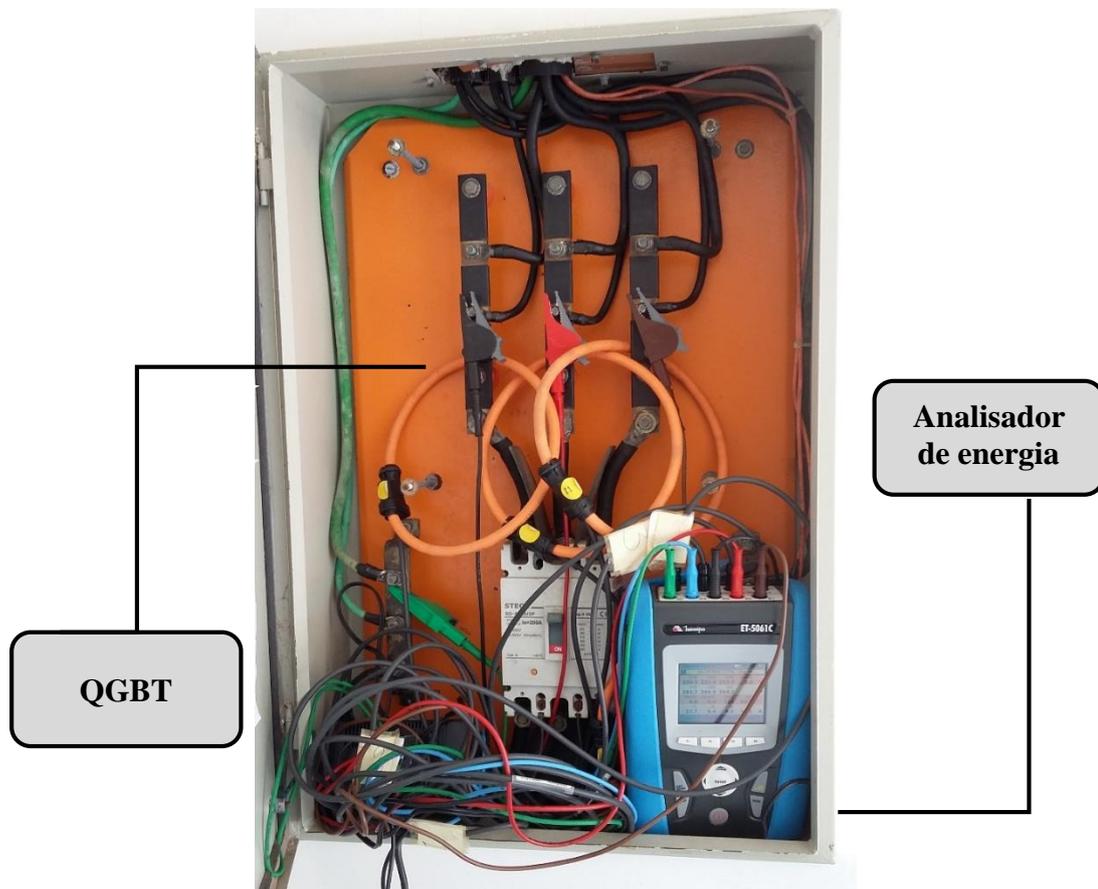


Figura 71 - Medição de parâmetros elétricos trifásicos da rede elétrica do CITED. Fonte: Autoria própria, 2016.

Como informado no item 3.1, o sistema fotovoltaico foi conectado à fase S da rede elétrica do quadro de distribuição térreo (QDT) do CITED. Desta forma, após aquisição e análise dos dados coletados pelo analisador de energia elétrica, tornou-se possível avaliar o impacto da inserção do SFCR nos parâmetros elétricos da rede do prédio. As tabelas 7 e 8 mostram, respectivamente, a média dos valores médios diários<sup>7</sup> e os seus desvios padrão dos parâmetros analisados para a Fase S da rede elétrica. As siglas dos parâmetros significam:

- V – tensão fase-neutro;
- VNPE – tensão neutro-terra;
- F – frequência;
- I – corrente elétrica consumida;
- P – potência ativa consumida;
- Ea – energia ativa consumida;
- FPI – fator de potência;
- THDV – taxa de distorção harmônica total de tensão;
- THDI – taxa de distorção harmônica total de corrente.

Mês	Parâmetro – Média dos valores médios diários								
	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
Maior	220,12	0,72	60,00	18,54	3715,25	70,45	0,89	2,39	21,15

Tabela 7 – Média dos valores médios diários dos parâmetros elétricos medidos no QGBT para a fase S, exceto a energia ativa.

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
Maior	1,84	0,74	0,00	8,48	2023,82	31,28	0,09	0,45	8,09

Tabela 8 – Desvios padrão dos valores médios diários dos parâmetros elétricos medidos no QGBT para a fase S.

<sup>7</sup> Exceto para a Energia ativa, em kWh, que representa o valor acumulado consumido pela fase S em um dia.

As Figuras 72 a 80 mostram o comportamento dos parâmetros elétricos medidos na fase S, através de gráficos mensais de cada parâmetro para os três meses analisados neste item, de modo a verificar as alterações nos valores com a inserção da microgeração fotovoltaica à rede elétrica.

Analisando os dados expostos neste item, apresentados através de tabelas e figuras é possível perceber a influência da inserção do sistema fotovoltaico na rede elétrica. Com relação a tensão elétrica fase-neutro conclui-se que a inserção da microgeração gerou um acréscimo em seu valor eficaz de até 1,38%. No entanto, verifica-se que esta leve sobretensão ocasionada pelo SFCR não é prejudicial à rede elétrica, pois os valores mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos nas normas vigentes. Percebe-se, na verdade, que a tensão apresentou valores abaixo da tensão nominal (220V) sem a presença do SFCR e, que após a inserção do sistema na rede elétrica, esta grandeza se aproximou bastante do valor nominal, apresentando valores médios mensais de 220,84V e 220,12V nos meses de Abril e Maio, respectivamente.

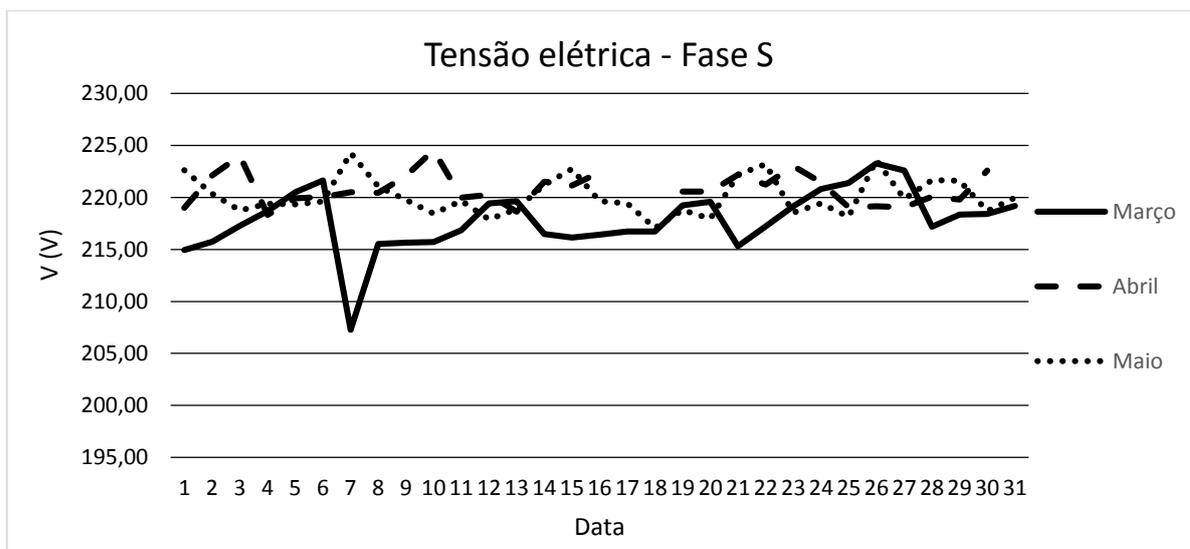


Figura 72 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da tensão elétrica – fase S.

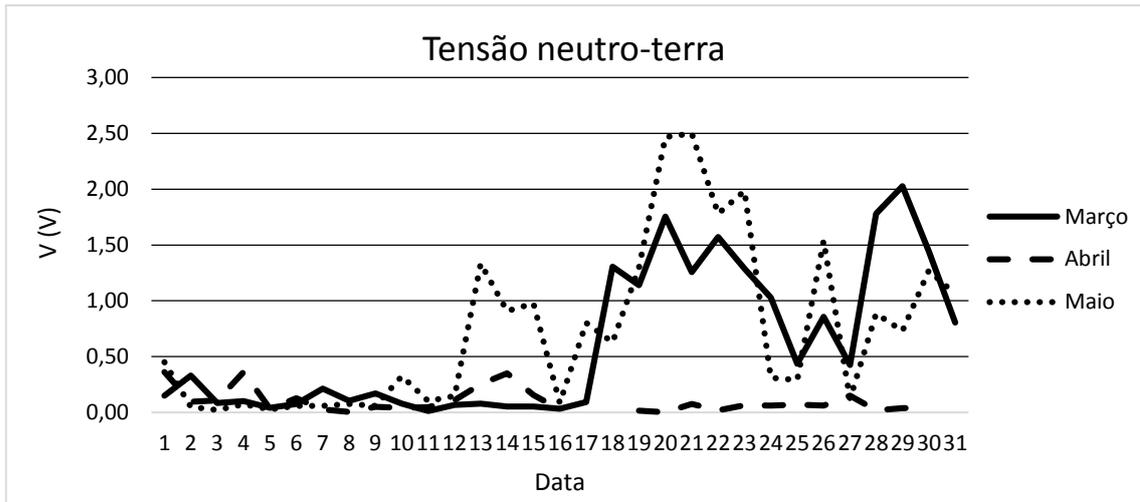


Figura 73 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da tensão elétrica neutro-terra.

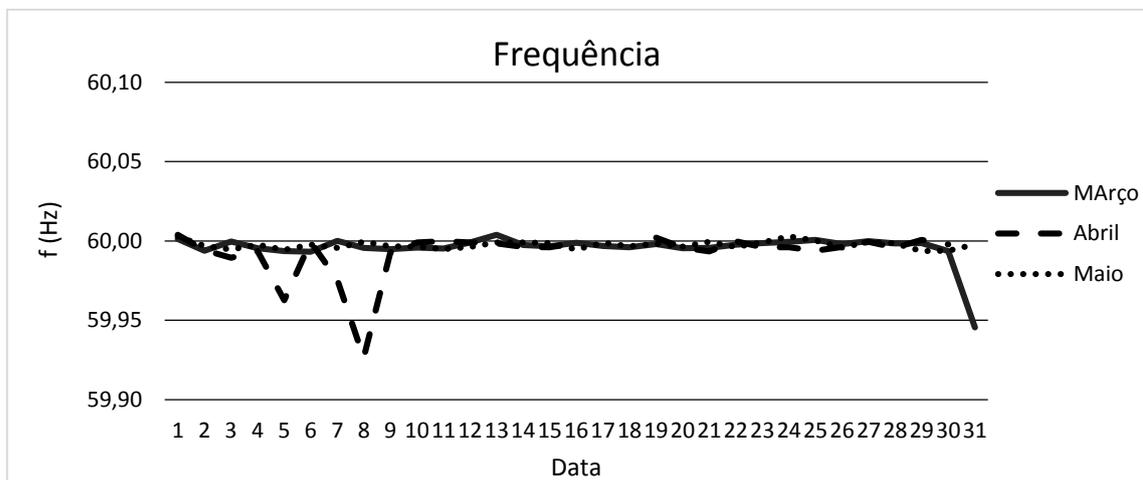


Figura 74 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da frequência elétrica da rede – fase S.

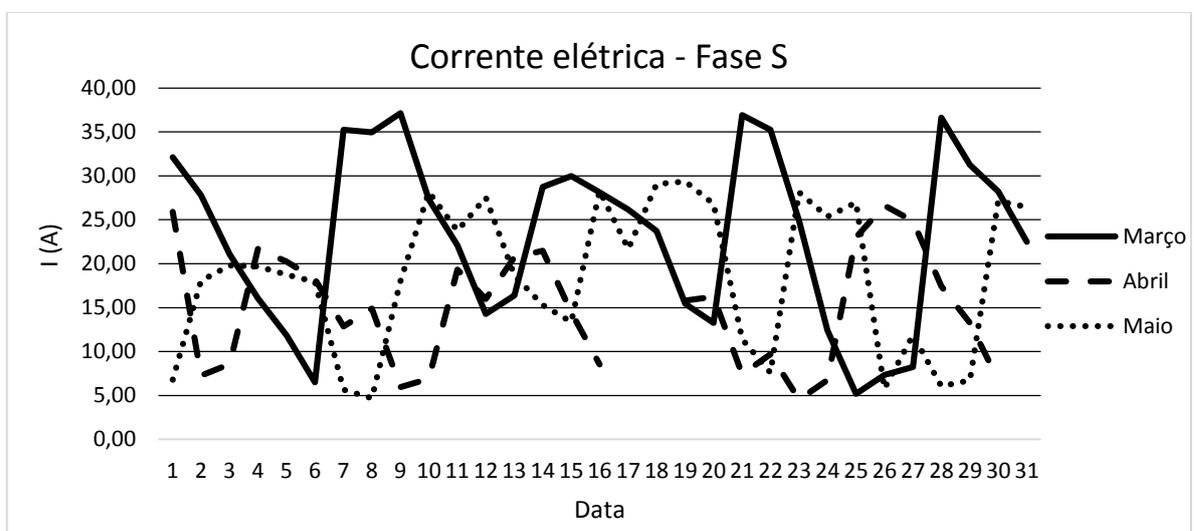


Figura 75 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da corrente elétrica consumida – fase S.

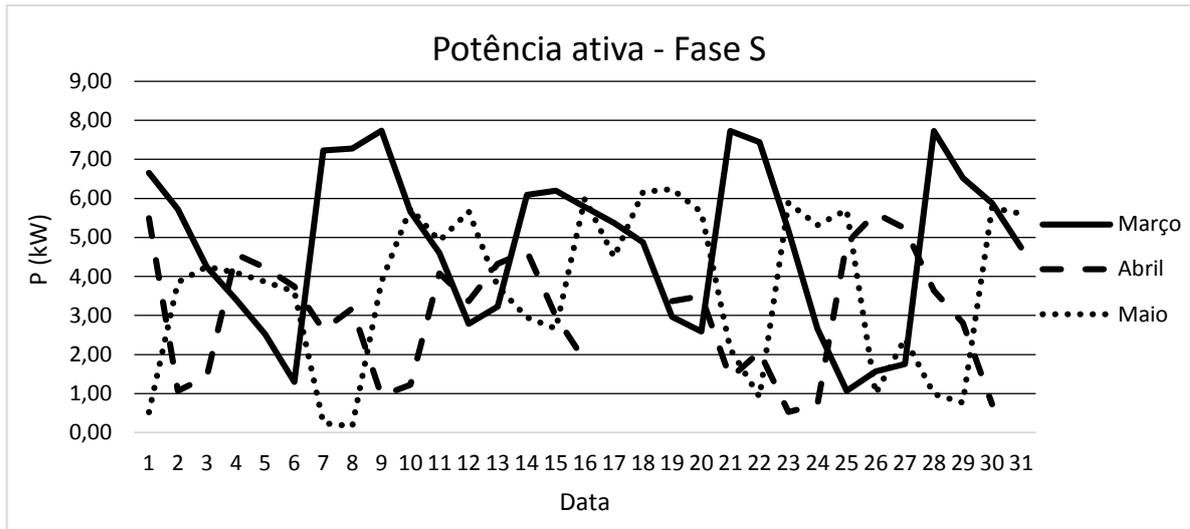


Figura 76 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da potência ativa consumida – fase S.

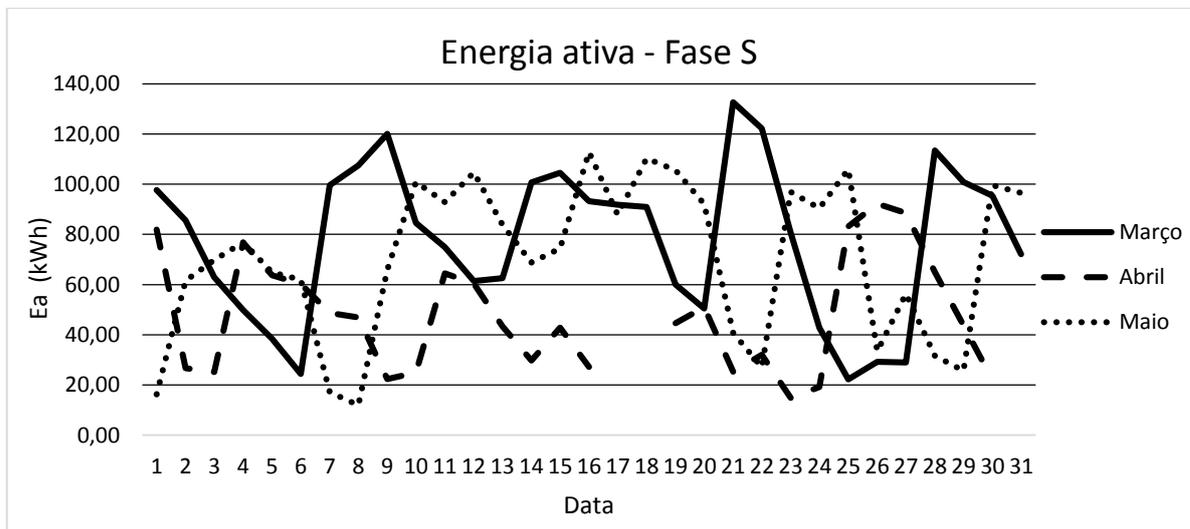


Figura 77 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da energia ativa consumida – fase S.

No que diz respeito a energia ativa, potência ativa e corrente elétrica consumida verifica-se redução em seus valores médios diários, fato proporcionado pela injeção de potência ativa pelo SFCR. No mês de Abril, o abatimento diário médio na energia ativa consumida foi de 38,83% enquanto que em Maio esta redução foi de apenas 9,07%. Considerando a energia ativa gerada e injetada pelo SFCR, mostrada na Tabela 4, a economia diária deveria ser em torno de 21%. No entanto, estes índices podem variar conforme a variação da demanda ativa do prédio, que influencia diretamente na energia ativa consumida, fato facilmente perceptível nos resultados encontrados.

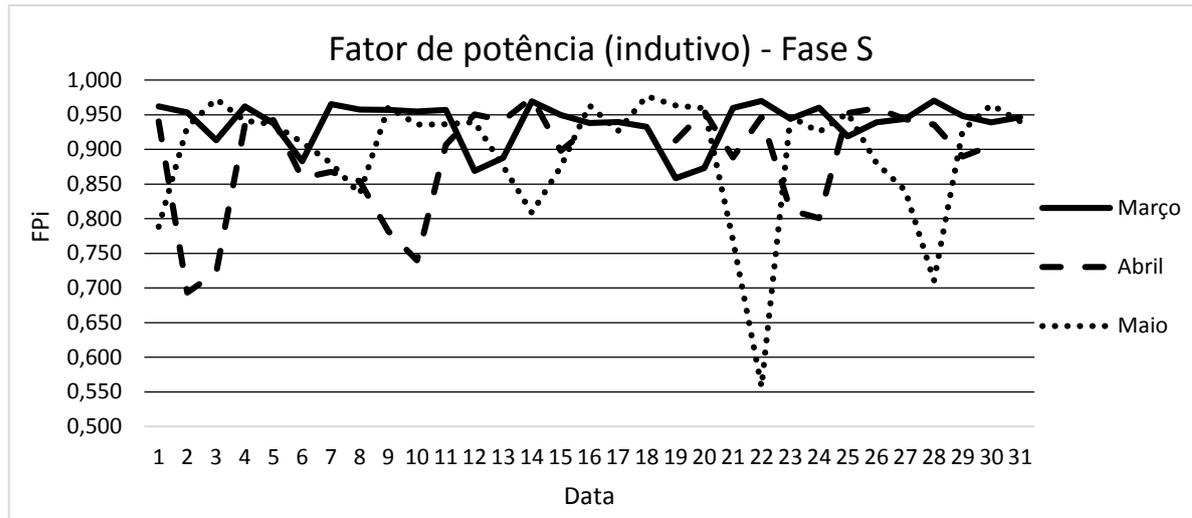


Figura 78 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado do fator de potência da rede – fase S.

O fator de potência indutivo da fase S apresentou uma redução em seu valor médio, saindo de 0,94 em Março para 0,89 nos meses de Abril e Maio. Mesmo com esta variação, que poderia ser considerada prejudicial para a rede elétrica, o fator de potência trifásico (considerado na medição e faturamento pela concessionária) se manteve acima do limite mínimo exigido pelas normas (0,92), apresentando os valores de 0,92 e 0,95 em Abril e Maio, respectivamente.

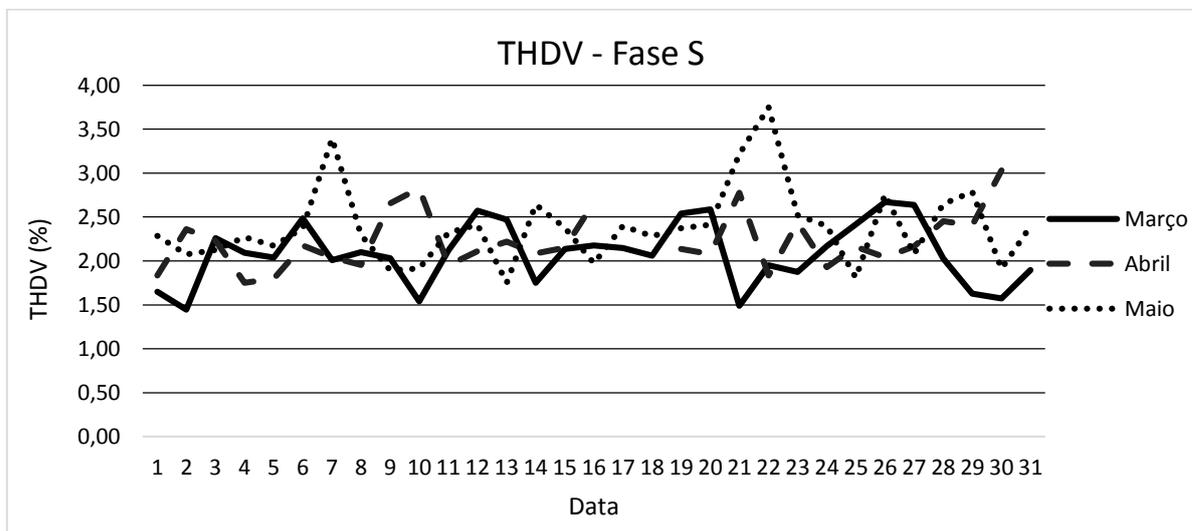


Figura 79 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da taxa de distorção harmônica de tensão (THDV) – fase S.

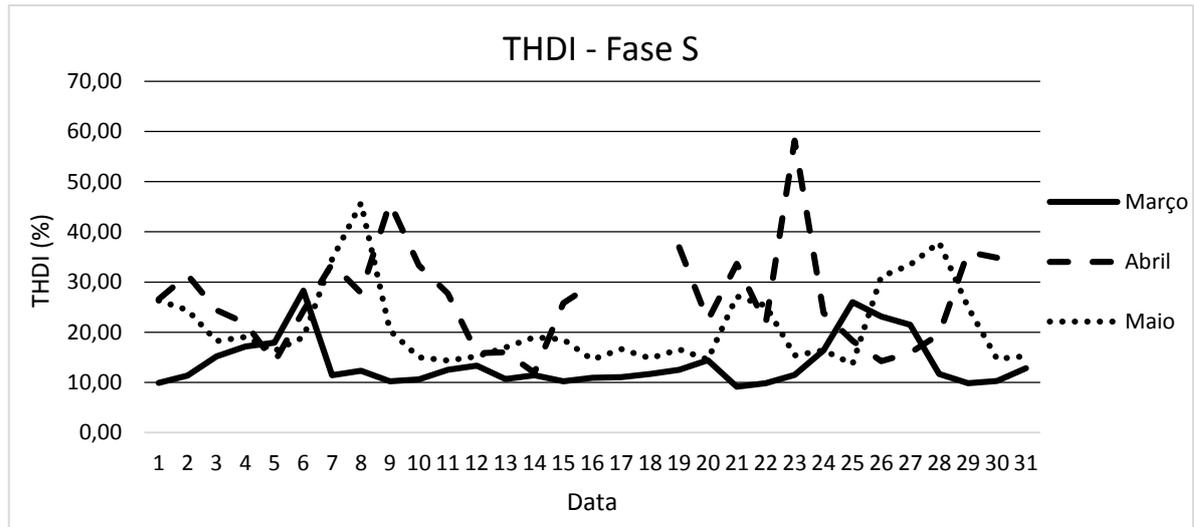


Figura 80 – Comparação entre valores com o SFCR desligado e ligado da taxa de distorção harmônica de corrente (THDI) – fase S.

Outro parâmetro que sofreu alterações significativas foi a taxa de distorção harmônica de corrente – THDI, com aumento de até 94% em relação ao percentual percebido sem a influência do SFCR. Vale salientar que a rede elétrica do prédio já apresenta valores de THDI considerados altos, da ordem 14%, valores prejudiciais para a rede elétrica, no aspecto da qualidade de energia. Percebe-se que este crescimento no valor médio da THDI ocorre principalmente devido aos altos valores registrados no início da manhã, entre 6:00 e 8:00 horas, momentos em que a radiação solar está baixa e o sistema fotovoltaico está com injeção de baixa potência na rede elétrica. Como já detalhado no item 4.2.7, a análise deste parâmetro para inversores deve ser considerada quando este equipamento estiver trabalhando em sua potência nominal, e as análises mostradas no referido item revelaram que o inversor satisfaz as condições estabelecidas em norma para a THDI. Portanto, pode-se concluir que o SFCR não contribui negativamente em relação a este parâmetro de qualidade de energia diante dos requisitos estabelecidos por COSERN (2016).

Os demais parâmetros, a saber, tensão neutro-terra, frequência e taxa de distorção harmônica de tensão – THDV, não apresentaram variações relevantes de um mês para o outro que pudessem ser consideradas como influência da inserção do sistema fotovoltaico na rede elétrica do prédio.

## 5. CONCLUSÕES

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm passado por momentos de expansão em todo o mundo, evidenciado pelo crescimento alcançado em países como a China, que chegam a apresentar crescimento de mais de 300% em sua potência instalada no período de um ano. As projeções realizadas mostram que nos próximos anos o mercado fotovoltaico tende a crescer, incentivado pela paridade tarifária, que para alguns países será alcançada até 2020, pela criação e reformulação da legislação do setor e por outros motivos relacionados como a diminuição da oferta interna de energia em países com matrizes energéticas pouco diversificadas.

Este trabalho objetivou realizar uma análise da qualidade de energia e impacto de um sistema fotovoltaico na rede de distribuição, no intuito de verificar se o sistema comporta-se conforme as normas atuais exigem. No caso em específico, analisou-se um SFCR monofásico de potência nominal de 3 kW, instalado no prédio CITED, da UFERSA. Assim, o sistema foi conectado diretamente na rede elétrica de distribuição através das instalações elétricas trifásicas de alimentação do prédio citado, que por sua vez, está conectado à rede de distribuição da Universidade.

Percebeu-se que, de modo geral, a instalação de um sistema de microgeração fotovoltaica produz impacto na rede elétrica onde está conectado, mesmo que na maioria dos casos o impacto seja mínimo. Foi possível verificar que a inserção da microgeração gerou um acréscimo de tensão de até 1,38%

. No entanto, os valores mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos nas normas vigentes, apresentando valores médios mensais de 220,84V e 220,12V nos meses de Abril e Maio, respectivamente.

Com relação ao fator de potência pode-se concluir que o inversor possui um elevado fator de potência, apresentando valores com poucas variações em torno de 0,99, valor este próximo ao valor ótimo, que é quando o fator de potência é unitário, quando medido no ponto de conexão do inversor. Quando se comparou o fator de potência antes e após a instalação do SFCR, o fator de potência indutivo da fase S apresentou uma redução em seu valor médio, saindo de 0,94 em Março para 0,89 nos meses de Abril e Maio. Mesmo assim, vale salientar que o fator de potência trifásico (grandeza medida pela concessionária) ultrapassou o valor mínimo de 0,92.

Outro importante parâmetro analisado que sofreu alteração foi a taxa de distorção harmônica total de corrente (THDI). Verificou-se que a legislação regula que o limite deste

parâmetro é de 5%, no entanto, apenas quando o sistema de geração está operando em sua potência nominal. Através das medições realizadas, constatou-se o SFCR em estudo satisfaz os critérios estabelecidos, apresentando uma THDI entre 3 e 4% quando a potência ultrapassou 90% da potência nominal. Porém, a ser realizada a análise deste parâmetro no impacto da inserção do SFCR na rede elétrica, ocorreu uma grande variação na THDI, com aumento de até 94% em relação ao percentual de 14% percebido sem a influência do SFCR. Este crescimento ocorre principalmente no início da manhã, quando o sistema fotovoltaico está com injeção de baixa potência na rede elétrica. Assim, torna-se essencial uma análise mais profunda neste parâmetro, a fim de verificar estratégias de redução nestes valores.

O impacto da instalação do sistema fotovoltaico na energia consumida pelo prédio foi perceptível, apresentando redução diária média de cerca de 40% no mês de Abril e 10% em maio, enquanto esperava-se uma economia diária em torno de 21%. No entanto, estes índices podem variar conforme a variação da demanda ativa do prédio.

Por fim, um outro objetivo deste trabalho foi realizar a comparação entre valores de potência injetada na rede medidos e simulados com o auxílio de um modelo matemático para o SFCR. Contudo, não foi possível lograr total êxito nesta análise. O modelo do sistema foi construído, porém não foi possível ter resultados na simulação. Um dos motivos encontrados foi a diferença entre o equipamento de medição dos dados da potência injetada na rede e os instrumentos de coleta dos dados de temperatura e radiação. O primeiro realiza diversas leituras durante cada intervalo definido, e ao final do intervalo grava o valor médio das leituras. Os outros realizam medições de forma manual, através dos quais coletaram-se dados de temperatura e radiação num intervalo de 15 minutos durante um dia de geração. Outras formas de medição poderiam ser avaliadas, no entanto, esta atividade demandaria tempo não disponível. Alguns resultados podem ser elencados com a elaboração do modelo do sistema fotovoltaico, tais como o conhecimento das formas de controle de injeção de potência pelo inversor na rede, que depende basicamente dos parâmetros de tensão e frequência da rede elétrica.

### **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

A partir dos resultados obtidos, bem como os conhecimentos adquiridos ao longo desta pesquisa, pode-se sugerir alguns melhoramentos para trabalhos futuros, tais como:

- Identificar mecanismos de redução de harmônicos de corrente em SFCR;
- Construção e implantação de um sistema de redução de harmônicos de corrente para o sistema fotovoltaico estudado;
- Realizar medições e validação do modelo do sistema fotovoltaico de 3kW analisado neste trabalho;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. Brasília: ANEEL, 2014. 28p.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade de energia elétrica**. Brasília: ANEEL, rev. 7, 2016. 76p.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 687**. Brasília: ANEEL, 2015. 26p.

BAUMGARTEM C. **Inserção de micro e minigeração distribuída de fonte solar fotovoltaica: uma abordagem através da dinâmica de sistemas**. Monografia ( Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

BP p.l.c. *2016 Energy Outlook*, Londres, Reino Unido, 2016.

BREYER, C. GERLACH, A. *Global Overview on grid-parity. Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, p. 121-136, 2013.

CÁCERES, M. BUSSO, A. J., VERA, L. H. FIRMAN, A., LEIVA, G., LUQUE, L. *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.

CANADIAN SOLAR. Módulo fotovoltaico 260W. Disponível em: <<http://www.canadiansolar.com/solar-panels/>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

COSERN. Companhia Energética do Rio Grande do Norte. **Conexão de microgeradores ao sistema de distribuição em baixa tensão – VR01.01-00.12**. COSERN, 3ªed., 2016.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil – Condicionantes e impactos**. Rio de Janeiro: EPE, 2014. 60p.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Leilão de energia reserva de 2014 – Participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos**: visão geral. Rio de Janeiro: EPE, 2014. 22p.

EPIA. *European Photovoltaic Industry Association. Global Market Outlook for photovoltaics. 2016-2020*. EPIA, 2015.

FIRMAN, A., TORANZOS, V., BUSSO, A. J., CADENA, C., VERA, L. H. *Determinación del punto de trabajo de sistemas fotovoltaicos conectados a red: método simplificado de traslación punto a punto a condiciones estándar de medida, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol 15, pp. 1-8, ASADES, 2011.

HECKTHEUER, L. A. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

IEA. *International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2012*. IEA, 2012.

KRENZINGER, A. Desenvolvimento de modelos para simulação de sistemas de energia solar fotovoltaica. Relatório de pós-doutorado, 1993.

MINIPA. Analisador de energia ET-5061C, 2015. Disponível em: <http://www.minipa.com.br>. Acesso em: 18 jun. 2015.

OLIVEIRA, F. S. **Desenvolvimento de traçador de curvas I-V portátil para arranjos fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

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

RODRÍGUEZ, C. R. C. **Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída**: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, 2002.

SILVA, J. B. **Impacto da geração solar fotovoltaica conectada à rede de distribuição na qualidade de energia elétrica: estudo de caso.** Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

TORRES, R.G. **Desenvolvimento de metodologia para avaliação do potencial de utilização de sistemas de energia solar fotovoltaicas em meios urbanos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

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

WANDERLEY, A. C. F. **Perspectivas de inserção da energia solar fotovoltaica na geração de energia elétrica no Rio Grande do Norte.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

ZILLES, R., MACÊDO, W. N., GALHARDO, M. A. B., OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo: Oficina de textos, 2012. ISBN 978-85-7975-052-6.