

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

DANIEL OLIVEIRA GUIMARÃES

MEDIÇÃO, MODELAGEM E ANÁLISE DA INSERÇÃO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO NA REDE – ESTUDO DE CASO DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DE ALFENAS – CAMPUS POÇOS DE CALDAS

Poços de Caldas, MG

2021

DANIEL OLIVEIRA GUIMARÃES

MEDIÇÃO, MODELAGEM E ANÁLISE DA INSERÇÃO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO NA REDE – ESTUDO DE CASO DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DE ALFENAS – CAMPUS POÇOS DE CALDAS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alfenas. Orientadora: Profa. Dra. Izabella Carneiro Bastos

Poços de Caldas, MG

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca campus Poços de Caldas

Guimarães, Daniel Oliveira.
G963m Medição, modelagem e análise da inserção de sistema
fotovoltaico na rede – estudo de caso da Universidade Federal de
Alfenas – Campus Poços de Caldas / Daniel Oliveira Guimarães. --
Poços de Caldas/MG, 2021.
147 f. –

Orientador(a): Izabella Carneiro Bastos.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade
Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2021.
Bibliografia.

1. Sistemas fotovoltaicos. 2. Simulação por computador. 3.
Eficiência energética. I. Bastos, Izabella Carneiro. II. Título.

CDD – 660

DANIEL OLIVEIRA GUIMARÃES

MEDIÇÃO, MODELAGEM E ANÁLISE DA INSERÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO NA REDE – ESTUDO DE CASO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS – CAMPUS POÇOS DE CALDAS

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a
Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pela
Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração:
Engenharia Química.

Aprovada em: 22 de janeiro de 2021.

Profa. Dra. Izabella Carneiro Bastos
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Dr. Álvaro Afonso Furtado Leite
Instituição: Cenergel

Prof. Dr. Iraí Santos Júnior
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **ALVARO AFONSO FURTADO LEITE, Usuário Externo**, em 25/01/2021, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Izabella Carneiro Bastos, Professor do Magistério Superior**, em 25/01/2021, às 14:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iraí Santos Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 25/01/2021, às 14:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0442318** e o código CRC **58005FFE**.

Dedico este trabalho aos meus pais e amigos que sempre me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação não teria sido desenvolvida sem o apoio e auxílio de algumas pessoas a quem gostaria de agradecer.

Primeiramente devo meus agradecimentos a Deus, que esteve comigo durante toda a minha vida iluminando meu caminho e me levando a lugares inimagináveis. Hoje consigo entender que todos os percalços superados foram para que pudesse estar aqui e realizar meus sonhos.

Desejo igualmente agradecer a minha orientadora Izabella Carneiro Bastos que foi quem proporcionou a oportunidade para o aprimoramento de meus conhecimentos através do mestrado, depositando a confiança necessária para a realização dos projetos e acreditando que eu conseguiria superar os meus limites.

Agradeço aos meus pais Antonio Carlos e Maria Abigail por terem dado apoio aos meus sonhos e me incentivado a realizá-los. Por serem minha inspiração e meu modelo a seguir. Ao meu irmão Guilherme por ser o meu primeiro amigo e a pessoa que me impulsionou a tomar decisões.

Agradeço também a minha namorada Laura pela paciência durante as dificuldades e pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço, ainda, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e ao Departamento Municipal de Eletricidade Distribuição (DMED) por patrocinar o projeto P&D e proporcionar o meu crescimento acadêmico.

Agradeço também a UNIFAL por proporcionar a oportunidade de estudos e incentivar seus trabalhadores.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, eles são a abertura para achar as que estão certas."

(Carl Sagan)

RESUMO

Na intenção de abranger os conhecimentos obtidos através da engenharia química e aplicados na prática, o trabalho teve como intuito a medição, modelagem e análise da inserção do sistema fotovoltaico na rede. Assim, a pesquisa utilizou como estudo de caso, a Universidade Federal de Alfenas - Campus Poços de Caldas, o qual houve o acompanhamento da instalação de uma mini usina fotovoltaica de 84,36 kWp. A mini usina foi instalada em dois prédios da universidade com a implementação de um sistema de instrumentação e automação, o qual proporciona dados de medições seja na parte contínua (CC) ou alternada (CA), fornecendo informações necessárias sobre a qualidade de energia gerada. Inicialmente foi elaborado um pré-projeto, utilizando o software PVsyst, para quantificar os benefícios da instalação do sistema fotovoltaico na universidade. Baseado em simulações, e com a verificação de todas as possíveis perdas do sistema, foi realizado um estudo durante um período de 12 meses referente a eficiência energética bem como a economicidade a ser gerada para instituição. Para fins de comparação e validação, o sistema simulado foi comparado com o real através do Software do fabricante Fronius Solar Web. Para garantir o correto funcionamento da usina, avaliando possíveis problemas que este sistema poderia gerar na rede elétrica, realizou-se também em conjunto, uma simulação de todo o sistema fotovoltaico utilizando o software padrão de engenharia, denominado MATLAB/Simulink. Dados reais climáticos, coletados da estação solarimétrica instalada na universidade, foram inseridos na simulação, assegurando assim, a correta avaliação do sistema. Além disso, foi necessário o desenvolvimento em software, de um sistema de controle capaz de atender o ponto máximo de potência durante a geração de energia. Posterior as análises teóricas, foi realizado, com o sistema fotovoltaico já instalado, medições em campo utilizando o instrumento analisador de energia, de modo a comparar os impactos efetivamente causados a rede com aqueles que foram simulados no MATLAB/Simulink. As medições foram realizadas antes e após a instalação da mini usina, o que resultou em uma análise de qualidade de energia comparando a energia elétrica em ambas situações. Cabe ressaltar que os resultados obtidos perante os equipamentos de medição e simulação foram confrontados com o MODULO 8 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, que define os padrões de qualidade de energia elétrica (QEE) em relação aos distúrbios que ocorrem na rede. Deste modo, conclui-se que a instalação do sistema fotovoltaico obteve uma eficiência de 79,3%, gerando para a instituição uma economia média mensal de 10.947kW. Durante o período analisado, a geração fotovoltaica causou impactos mínimos na rede após sua inserção, permanecendo dentro dos parâmetros exigidos, havendo ainda uma melhora no fator de potência, o qual contribui na qualidade de energia do sistema avaliado.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico. Simulação MATLAB/Simulink. Qualidade de energia

ABSTRACT

In order to cover the knowledge obtained through chemical engineering and applied in practice, the work aimed to measure, model and analyze the insertion of the photovoltaic system in the network. Thus, the research used the Federal University of Alfenas - Poços de Caldas Campus as a case study, which was accompanied by the installation of a 84.36 kWp mini photovoltaic plant. The mini plant was installed in two buildings of the university with the implementation of an instrumentation and automation system, which provides measurement data in both the continuous (DC) and alternating (AC) parts, providing the necessary information on the quality of the energy generated. Initially, a pre-project was developed, using the PVsyst software, to quantify the benefits of installing the photovoltaic system at the university. Based on simulations and with the verification of all possible losses of the system, a study was carried out over 12 months on energy efficiency and savings to be generated for the institution. For comparison and validation purposes, the simulated system was compared with the real one using the software from the manufacturer Fronius Solar Web. In order to guarantee the correct functioning of the plant, evaluating possible problems that this system could generate in the electrical network, it was also performed, in together, a simulation of the entire photovoltaic system using standard engineering software, called MATLAB / Simulink. Real climatic data, collected at the solarimetric station installed at the university, were inserted in the simulation, thus guaranteeing the correct assessment of the system. In addition, it was necessary to develop in software, a control system capable of meeting the maximum power point during power generation. After the theoretical analysis, field measurements were made with the photovoltaic system already installed using the energy analyzer instrument, in order to compare the impacts actually caused on the network with those that were simulated in MATLAB / Simulink. The measurements were performed before and after the installation of the mini plant, which resulted in an analysis of the energy quality comparing the electrical energy in the two situations. It is worth mentioning that the results obtained with the measurement and simulation equipment were compared with MODULE 8 of the Electricity Distribution Procedure in the National Electric System - PRODIST, which defines the electric power quality standards (QEE) in relation to the disturbances that occur on the network. Thus, it is concluded that the installation of the photovoltaic system obtained an efficiency of 79.3%, generating for the institution an average monthly savings of 10,947kW. During the analyzed period, photovoltaic generation caused minimal impacts on the grid after its insertion, remaining within the required parameters, with an improvement in the power factor, which contributes to the energy quality of the evaluated system.

Keywords: Power quality. Photovoltaic system. MATLAB/Simulink.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Sistema fotovoltaico On-Grid simplificado	21
Figura 2 — Universidade Federal de Alfenas - Campus Poços de Caldas	22
Figura 3 — Sistema energético genérico	27
Figura 4 — Diagrama do sistema fotovoltaico conectado à rede	31
Figura 5 — Fluxograma do algoritmo MPPT P&O para definição da corrente de referência	34
Figura 6 — Metodologia	49
Figura 7 — Prédios F e G.....	52
Figura 8 — Painéis Fotovoltaicos Instalados no Prédio F	53
Figura 9 — Painéis Fotovoltaicos Instalados no Prédio G	53
Figura 10 — Sistema instalado	54
Figura 11 — Sistema de automação e inversores do Prédio F	55
Figura 12 — Sistema de automação e inversores do Prédio G.....	56
Figura 13 — Estação Solarimétrica instalada na universidade	57
Figura 14 — Dados da solarimétrica	58
Figura 15 — Simulação 3D no PVsyst	61
Figura 16 — Representação da simulação	62
Figura 17 — Simulação MATLAB/Simulink	63
Figura 18 — (a) Bloco Signal Builder (b) Curva diária de irradiação e temperatura	64
Figura 19 — (a) Bloco PV array (b) Tela de configuração do bloco	65
Figura 20 — Bloco MPPT e controle do inversor	66
Figura 21 — Analisador de energia instalado no painel de entrada	71
Figura 22 — Energia normalizada simulada.....	74
Figura 23 — Energia normalizada medida	75
Figura 24 — Índice de performance	76
Figura 25 — Consumo mensal dos anos 2018, 2019 e 2020.....	78
Figura 26 — Porcentagem de economia de kWh/mês	79
Figura 27 — Tensão em regime permanente simulada no dia 13 julho (primeiro dia)	81
Figura 28 — Tensão em regime permanente simulada no dia 19 de julho (sétimo dia)	82
Figura 29 — Tensão em regime permanente medida no dia 13 de julho (primeiro dia)	83
Figura 30 — Tensão em regime permanente medida no dia 19 de julho (sétimo dia)	84
Figura 31 — Fator de potência simulado no dia 13 de julho (primeiro dia)	85
Figura 32 — Fator de potência simulado no dia 19 de julho (sétimo dia).....	86
Figura 33 — Fator de potência medida no dia 13 de julho (primeiro dia).....	87
Figura 34 — Fator de potência medida no dia 19 de julho (sétimo dia)	88

Figura 35 — Valor simulado de THDv no dia 13 de julho (primeiro dia).....	90
Figura 36 — Valor simulado de THDv no dia 19 de julho (sétimo dia).....	91
Figura 37 — Harmônicos total de tensão (TDHv) medido no dia 13 de julho (primeiro dia).....	92
Figura 38 — Harmônicos total de tensão (TDHv) medido no dia 19 de julho (sétimo dia).....	93
Figura 39 — Frequência da rede simulada no dia 13 de julho (primeiro dia).....	94
Figura 40 — Frequência da rede simulada no dia 19 de julho (sétimo dia).....	95
Figura 41 — Frequência da rede medida no dia 13 de julho (primeiro dia).....	96
Figura 42 — Frequência da rede medida no dia 19 de julho (sétimo dia).....	97
Figura 43 — Valores de tensão temporal sem geração de energia fotovoltaica.....	99
Figura 44 — Valores de tensão temporal com geração de energia fotovoltaica....	100
Figura 45 — Histograma da fase AN sem inserção da geração fotovoltaica.....	101
Figura 46 — Histograma da fase AN com inserção da geração fotovoltaica.....	101
Figura 47 — Valores de tensão temporal entre fases sem inserção de energia fotovoltaica.....	102
Figura 48 — Valores de tensão temporal entre fases com inserção de energia fotovoltaica.....	103
Figura 49 — Histograma da fase CA sem a inserção da geração fotovoltaica.....	104
Figura 50 — Histograma da fase CA com a inserção da geração fotovoltaica.....	104
Figura 51 — Histograma do fator de potência sem inserção de geração fotovoltaica.....	106
Figura 52 — Histograma do fator de potência com inserção de geração fotovoltaica.....	107
Figura 53 — Harmônicas totais e 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a ordem - Sem inserção fotovoltaica...	108
Figura 54 — Harmônicas totais e 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a ordem - Com inserção fotovoltaica...	109
Figura 55 — Desequilíbrio de tensão sem inserção de geração fotovoltaica.....	111
Figura 56 — Desequilíbrio de tensão com inserção de geração fotovoltaica.....	112
Figura 57 — Plt E Pst sem energia fotovoltaica.....	113
Figura 58 — Plt E Pst com energia fotovoltaica.....	114
Figura 59 — Frequência sem geração fotovoltaica.....	116
Figura 60 — Frequência com geração fotovoltaica.....	117
Figura 61 — Curva ITIC e CBEMA - Sem a geração fotovoltaica.....	118
Figura 62 — Curva ITIC e CBEMA - Com a geração fotovoltaica.....	119
Figura 63 — Evento 1 sem inserção do sistema fotovoltaico.....	120
Figura 64 — Evento 2 sem inserção do sistema fotovoltaico.....	121
Figura 65 — Evento 3 sem inserção do sistema fotovoltaico.....	122
Figura 66 — Evento 4 sem inserção do sistema fotovoltaico.....	123
Figura 67 — Evento 5 sem inserção do sistema fotovoltaico.....	124
Figura 68 — Evento 6 sem inserção do sistema fotovoltaico.....	125
Figura 69 — Evento 7 sem inserção do sistema fotovoltaico.....	126
Figura 70 — Evento 1 de onda com inserção do sistema fotovoltaico.....	127

Figura 71 — Evento 2 com inserção do sistema fotovoltaico 128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Opções do PIMVP	28
Tabela 2 — Faixas de Tensão Medida em Relação à de Referência	37
Tabela 3 — Classificação das harmônicas até 14 ^a ordem	39
Tabela 4 — Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	40
Tabela 5 — Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão ímpares não múltiplas de 3	41
Tabela 6 — Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão ímpares múltiplas de 3	42
Tabela 7 — Limites de desequilíbrio de tensões.....	43
Tabela 8 — Valores de frequência e seus respectivos tempos.....	46
Tabela 9 — Classificação da Variação de Tensão de Curta Duração.....	47
Tabela 10 — Configuração da miniusina	52
Tabela 11 — Dados da Solarimétrica.....	59
Tabela 12 — Dados técnicos dos módulos	65
Tabela 13 — Parâmetros do controlador PI	66
Tabela 14 — BLOCO PWM.....	67
Tabela 15 — FILTRO	67
Tabela 16 — Ligação de inversores.....	68
Tabela 17 — Consumo no ano de 2018.....	69
Tabela 18 — Consumo no ano de 2019.....	70
Tabela 19 — Consumo no ano de 2020.....	70
Tabela 20 — Padrões respeitados pelo Fluke 435 Série II	72
Tabela 21 — Energia gerada em um ano	76
Tabela 22 — THDi e THDv- Distorção harmônica total da corrente e tensão	110
Tabela 23 — Valores de Pst e Plt médios antes e após a inserção fotovoltaica	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
DHI	Distorção Harmônica Individual
DHli	Distorção Harmônica Individual de Corrente
DHlv	Distorção Harmônica Individual de tensão
DHT	Distorção Harmônica Total
DHTi	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHTv	Distorção Harmônica Total de Tensão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FD	Fator de Desequilíbrio
FP	Fator de Potência
IEA	International Energy Agency
IHM	Interface Homem Máquina
IoT	Internet of things
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PRODIST	Procedimento de Distribuição
PWM	Pulse Width Modulation
RMS	Root Mean Square
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede
Tf	Tempo final
Ti	Tempo inicial
TR	Tensão de referência
Vab	Tensão entre as fases a e b
Vbc	Tensão entre as fases b e c
Vca	Tensão entre as fases c e a
Ve	Amplitude do evento de curta duração
Vref	Tensão de referência
Vres	Tensão residual do evento

VTCD	Varição de tensão de curta duração
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
PIMVP Performance	Protocolo Internacional de Medição e Verificação de
EVO	Efficiency Valuation Organization
PR	Performance Ratio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	19
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	20
3.1	SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE - SFCR.....	20
3.1.1	Instrumentação e controle aplicada ao sistema fotovoltaico	22
3.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	23
3.2.1	Software PVsyst	24
3.2.2	Software MATLAB	25
3.3	AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO	26
3.4	MODELAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO E MÉTODO DE CONTROLE	31
3.4.1	Painel fotovoltaico	31
3.4.2	Inversor fotovoltaico	32
3.4.3	Filtro	34
3.5	QUALIDADE DE ENERGIA.....	35
3.5.1	Regime Permanente	36
3.5.1.1	Tensão em regime permanente.....	36
3.5.1.2	Fator de Potência	37
3.5.1.3	Distorções harmônicas	39
3.5.1.4	Desequilíbrio de tensão.....	42
3.5.1.5	Flutuação de tensão	43
3.5.1.6	Variação de frequência.....	45
3.5.2	Variação de tensão de curta duração (VTCD)	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1	ESTUDO DE CASO: MINIUSINA SOLAR FOTOVOLTAICA	51
4.1.1	Acompanhamento do pré-projeto da instrumentação	53
4.2	ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA	56
4.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	58
4.3.1	Software PVsyst	59
4.3.2	Software Matlab	61
4.3.2.1	Sistema simulado	63
4.4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	68
4.5	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
5.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	73
5.2	COMPARAÇÃO DOS DADOS SIMULADOS E DADOS MEDIDOS EM CAMPO.....	79
5.2.1	Comparação - Tensão em regime permanente	80

5.2.2	Comparação - Fator de potência	84
5.2.3	Comparação - Harmônicos de tensão total (THDv)	88
5.2.4	Comparação - Frequência	93
5.3	ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA	97
5.3.1	Tensão em regime permanente	98
5.3.2	Fator de Potência	105
5.3.3	Distorções Harmônicas	107
5.3.4	Desequilíbrio de tensão	110
5.3.5	Flutuação de tensão	112
5.3.6	Variação de frequência	115
5.3.7	Variação de tensão de curta duração	117
6	CONCLUSÃO	129
7	TRABALHOS FUTUROS	132
	REFERÊNCIAS	133
	APÊNDICE A — Dados da estação solarimétrica - Irradiação e Temperatura	133

1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje é possível notar o crescente aumento de geração de energia fotovoltaica, seja devido a redução dos impactos ambientais, o baixo custo, bem como a redução de perdas nas transmissões e/ou na distribuição de energia elétrica (Aneel, 2015). No Brasil, conforme notícia publicada pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, ABSOLAR, foram instalados cerca de 162 mil novos sistemas fotovoltaicos no ano de 2019, cerca de 130% superior ao ano anterior (CASARIN, 2020). No ano de 2020 houve um aumento de 64%, com um aumento de 4,6 GW (gigawatts) em 2019 para 7,5 GW em 2020 através do levantamento feito pela ABSOLAR (SAUAIA; KOLOSZUK, 2021).

Devido ao crescimento contínuo de instalações fotovoltaicas conectadas à rede bem como a redução do custo de aquisição, a utilização não regulamentada do sistema pode ser um dos fatores que causam um grande impacto na característica da carga e conseqüente qualidade de energia do sistema (AGRAWAL; SINGH, 2018). As pesquisas sobre o tema remetem-se ao fato de ser uma tecnologia relativamente nova, que gera diversos questionamentos, sendo um deles, a utilização da energia fotovoltaica e os impactos que podem ser gerados durante sua inserção na rede elétrica.

Neste sentido foi realizado um estudo de caso na Universidade Federal de Alfenas - MG, campus de Poços de Caldas, o qual houve o acompanhamento da instalação de uma miniusina de geração de energia fotovoltaica de 84,36kWp (quilowatt pico), bem como a implementação de instrumentação e automação para monitoramento e controle do sistema.

Durante a pesquisa utilizou-se dos aprendizados da engenharia, para criação de modelagem de processos, simulações e avaliação da eficiência energética obtendo-se assim informações sobre o sistema fotovoltaico estudado.

Para simular e modelar o processo de geração de energia através de sistemas fotovoltaicos, foram utilizados dois softwares, sendo o PVsyst específico para geração fotovoltaica e o MATLAB/Simulink para uma análise iterativa da geração fotovoltaica conectada com rede elétrica.

De forma a desenvolver o estudo e criar um pré-projeto, utilizou o software PVsyst, visando averiguar e quantificar os benefícios da instalação do sistema

fotovoltaico, assim como a eficiência do sistema na universidade. Mesmo que o software PVsyst já tenha uma base de dados pré-cadastrados, foram utilizados dados próprios coletados com a estação solarimétrica instalada na universidade, o que de fato representa maior confiabilidade nas simulações. Além do mais, a geração simulada foi comparada através da aplicação Fronius Solar.Web que traz os dados gerados pelos equipamentos instalados na universidade.

Para mensurar a economia produzida pela mini usina para instituição, foi comparado os consumos entre os anos de 2018, 2019 e 2020, já que o sistema fotovoltaico não foi dimensionado para suprir 100% da demanda.

As simulações para verificação prévia de possíveis distúrbios na rede têm muita importância e já vinham sendo utilizadas por outras pesquisas ao redor do mundo, como por exemplo, um estudo realizado na Malásia, o qual foi analisado a inserção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e a oscilação de tensão de curto e longo prazo em uma micro usina de 15,6 kWp com diferentes tipos de tecnologia. O estudo demonstrou que a oscilação de tensão variou conforme a irradiação recebida no local, onde foi feita uma simulação e comparou-se com dados medidos de um analisador da Fluke 435 série II. A pesquisa ainda mostra alguns pontos críticos, como as oscilações de tensão foram acima das normas IEC (FARANADIA; OMAR; NOOR, 2017)

Em um outro estudo feito para análise da irradiância sobre a qualidade de energia de 14 tipos diferentes de sistemas fotovoltaicos, instalado na Universidade de Chipre, foi concluído que com a irradiância baixa, as medições revelaram alta corrente harmônica total e um fator de potência que às vezes excede os limites aceitáveis, causando grande quantidade de energia reativa a ser fornecido à rede de distribuição (PATSAIDES et al., 2014).

Como forma de antecipar possíveis distúrbios apresentados frente a instalação de energia fotovoltaica, foram realizadas simulações no software MATLAB/Simulink. Além do mais, para que o sistema simulado se aproxime dos valores gerados, a simulação é baseada nos parâmetros técnicos fornecidos pelos fabricantes, assim como o sistema também usufrui de um sistema de controle que rastreia o ponto máximo de potência gerado pelo painel fotovoltaico. Devido à baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos, é muito importante o fornecimento da potência instantânea máxima dessas fontes de energia para a carga (DEHBONEI; LEE; NEHRIR, 2009).

A simulação é capaz de criar condições aproximadas ao ambiente onde a tecnologia será utilizada, podendo ser modificado de forma a testar diversas anomalias no sistema. Cada categoria simulada no software MATLAB foi organizada e separada: módulo fotovoltaico, inversor, Maximum Power Point Tracking - Rastreamento de Ponto Máximo de Potência (MPPT), e rede. Normalmente há estudos básicos e avançado quanto ao MPPT, sendo este capaz de obter uma maior eficiência na geração fotovoltaica.

Na universidade entre o processo de projeto e a instalação foram feitas medições com o analisador de energia, sendo uma medição anterior e outra após o sistema instalado. Deste modo pôde-se comparar com a simulação do MATLAB/Simulink além de uma análise de qualidade de energia da própria universidade.

A comparação entre os dados teve como intuito não somente verificar os problemas futuros que o sistema fotovoltaico possa ter, mas também analisar a qualidade de energia, já que diversos problemas nas redes de distribuição podem ser notados neste tipo de estudo. Alguns chegam a demonstrar os aumentos de harmônicos, que atingem diretamente proteção de relé, sistemas de automação e medidores inteligentes (SHEVCHENKO; VOLOKHIN; DIAHOVCHENKO, 2017).

Os resultados obtidos foram verificados para análise da qualidade de energia utilizando como parâmetro as normas estabelecidas pelo PRODIST, módulo 8, sendo verificadas as categorias de tensão de regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variação de tensão de curta duração.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo de caso na Universidade Federal de Alfenas no Campus Poços, através de coleta de dados climáticos locais e medições de parâmetros elétricos para a realização de modelagem e simulação do sistema fotovoltaico nos softwares PVsyst e MATLAB/Simulink. No mais a análise da inserção de geração fotovoltaico e sua eficiência energética, comparando entre as simulações feitas e os dados reais coletados.

Por fim, utilizou-se deste sistema para distinguir os principais fatores que influenciam na estimativa da geração e de sistemas fotovoltaicos, conectados à rede elétrica, sendo possível diagnosticar os impactos causados na rede após a instalação da miniusina.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Acompanhar o pré-projeto da usina fotovoltaica e do sistema de instrumentação e automação a ser instalado;
- b) Medir os parâmetros elétricos anterior a instalação da miniusina fotovoltaica para verificar o comportamento da rede na instituição;
- c) Simular o pré-projeto através do software PVSYST para averiguar a geração de energia e eficiência do sistema a ser instalado;
- d) Acompanhar a implantação do sistema fotovoltaico em conjunto com o sistema de instrumentação e automação da geração de energia fotovoltaica;
- e) Simular o sistema fotovoltaico no MATLAB/Simulink que conte com um sistema de controle para o rastreamento do ponto máximo de potência e assim obter dados teóricos a serem comparados com os dados coletados pelo analisador de energia;
- f) Medir os parâmetros elétricos na rede elétrica após a instalação da mini usina fotovoltaica para comparação da qualidade de energia antes e após a instalação;
- g) Analisar os dados obtidos pelo analisador de energia, com os parâmetros estabelecidos segundo os padrões das normas brasileiras, para avaliar a qualidade de energia elétrica;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

Devido ao aumento do consumo energético e as perdas causadas pelo distanciamento da rede de transmissão/distribuição e o consumidor final, surgem cada vez mais sistemas de geração distribuída, ou seja, geração de energia por fontes renováveis ou cogeração qualificada, próxima ou no local de consumo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

Umas das fontes de energia renováveis com o maior crescimento nos últimos anos são aquelas que utilizam os raios solares para a sua produção de energia elétrica, sendo denominado de sistema fotovoltaico (DANTAS; POMPERMAYER, 2018). Existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos, On-Grid e Off-Grid, que consistem respectivamente naqueles que são conectados à rede elétrica de distribuição e aqueles que são isolados e utilizam de baterias para armazenar a energia elétrica gerada por eles. Todavia, o sistema Off-Grid não é objeto de estudo desse trabalho, já que se tem como um dos objetivos a análise da inserção da energia gerada na rede (MARTINHO, 2019).

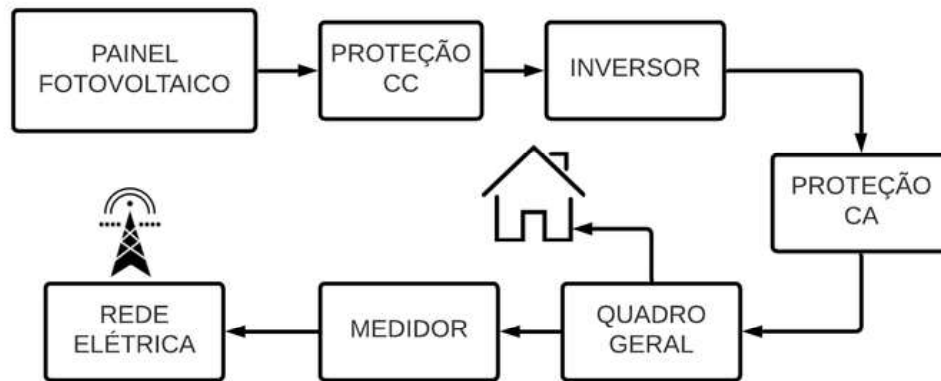
O sistema fotovoltaico é relativamente novo, surgem questionamentos sobre a qualidade de energia gerada, se esta pode vir a atrapalhar a energia entregue pela concessionária ou se o padrão de qualidade se mantém.

3.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE - SFCR

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - SFCR, geram energia por meio dos painéis fotovoltaicos através da transformação de energia solar em elétrica Corrente Contínua (CC), que são conectados no inversor para a transformação da corrente contínua produzida em corrente alternada e assim disponibilizada para o consumidor. Os quadros de proteção (CC e CA) possuem disjuntores, fusíveis e outras proteções (ZILLES et al., 2012).

O sistema fotovoltaico simplificado pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 — Sistema fotovoltaico On-Grid simplificado



Fonte: Adaptado de Zilles et al. (2012)

O sistema possui uma conexão bidirecional através do medidor com a concessionária (Rede Elétrica), possibilitando a alimentação de sua própria carga de energia. Por outro lado, durante a noite ou durante períodos em que saída é menor do que a demanda energética, a energia é importada da rede elétrica (ZILLES et al., 2012).

O estudo de caso foi realizado na Universidade Federal de Alfenas no campus de Poços de Caldas, onde foi instalada uma miniusina fotovoltaica *on-grid* com uma potência de 84,36 kWp, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 — Universidade Federal de Alfenas - Campus Poços de Caldas



Fonte: O autor (2020)

No caso em questão por se tratar de um sistema localizado em uma universidade e para favorecer os estudos, os painéis que foram instalados e monitorados contém diferentes tecnologias e potências.

3.1.1 Instrumentação e controle aplicado ao sistema fotovoltaico

Na área da engenharia é comum o termo instrumentação e controle, que graças aos avanços da tecnologia proporcionam a precisão do processo industrial, através de monitoramentos contínuos ou discretos do desempenho das variáveis que interessam ao homem nas áreas do conhecimento humano (FIALHO, 2010).

Não importa qual o tipo de processo industrial, ele é vital para o controle das variáveis do sistema, seja como temperatura, pressão, vazão, nível, pH, velocidade, umidade, tensão e corrente, de modo a cooperar para o desempenho e análise de produção dentro de uma indústria e ou usina. A instrumentação e o controle, são capazes de permanecer com sua variável conforme exigido, sendo mais precisa e adequada do que se fossem operadas manualmente (BEGA et al., 2011).

Com o amadurecimento do mercado fotovoltaico brasileiro se torna imprescindível o estudo e o monitoramento dos sistemas fotovoltaicos instalados, sendo necessário a criação de um sistema de instrumentação e controle para averiguações na geração de energia. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o custo da energia nos leilões abaixou em 62,2% do preço máximo para o

fotovoltaico no leilão, que foi 312 R\$ / MWh, e 18,6% quando se compara ao preço final do leilão realizado em dezembro de 2018 (EPE, 2018). Com a alta demanda de utilização de sistemas fotovoltaicos e a grande inserção nos sistemas de distribuição, devemos entender quais as consequências geradas através dos sistemas de medição instalados nos geradores de energia.

Na geração de energia fotovoltaica é mais comum a utilização de sistemas que monitoram os sistemas fotovoltaicos de diferentes maneiras, através dos próprios inversores (ARISTIZABAL et al., 2006) ou instrumentos virtuais (RAHMAN et al., 2011) ou ainda com equipamentos de baixo custo usando o Internet of things - Internet das coisas (IoT) (ROUIBAH et al., 2019). Este tipo de monitoramento apenas acompanha o sistema fotovoltaico instalado e os estudos giram em torno do seu desempenho ou na análise de impacto na rede (CEAKI et al., 2015).

Um estudo feito por Mills Price, demonstra uma instrumentação capaz de realizar o controle em uma usina fotovoltaica monitorando os equipamentos e as funções de controle interno da usina, ajustando os pontos operacionais dos equipamentos para atender aos requisitos da interconexão. Este sistema ainda pode considerar condições imprevisíveis como falhas no sistema elétrico ou condições meteorológicas extremas. Além disso, demonstra a conexão do sistema com os equipamentos internos da usina fotovoltaica como os inversores, estações meteorológicas, rastreadores do sol, relés de proteção, medidores de faturamento, geradores locais e sistemas de alarme e também com os externos, tais como sistemas de previsão meteorológica, sistemas de gerenciamento de energia e interfaces com o sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA) (MILLS-PRICE; HAO, 2014).

Diante de sua aplicabilidade a engenharia química e através da compreensão sobre sua importância, o acompanhamento da instalação da mini usina e o projeto incluíram um sistema de instrumentação e controle, de modo a tornar possível obter as medições de cada parte instalada.

3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional assume um papel importante como ferramenta de conhecimento, possibilitando uma análise pormenorizada de dados e a resolução de possíveis problemas.

Desde que houve crescimento exacerbado de sistemas fotovoltaicos, conectados à rede elétrica, pesquisas tentam simular os possíveis impactos que esse tipo de conexão gera na rede distribuição da concessionária. Inclusive há estudos que simulam até mesmo a própria análise da eficiência do sistema durante a geração de energia.

Constantemente tem se falado sobre a conexão do sistema fotovoltaico e a rede elétrica de energia, relacionando a importância dos sistemas de medição para análise das ocorrências de distúrbios elétricos que preocupam tanto o consumidor como a concessionária.

Assim ocorreu a realização da simulação computacional em dois softwares diferentes para que ao final houvesse uma comparação entre o que foi projetado e o que foi instalado. De forma a analisar tanto a geração quanto os problemas ocasionados pela geração fotovoltaica na rede, atingindo assim um dos objetivos da pesquisa de obter os resultados sobre os impactos causados à rede, pelo sistema fotovoltaico em estudo.

A simulação também foi utilizada de forma secundária após a instalação da mini usina para criar a modelagem, de modo, a chegar o mais próximo possível da real situação da qualidade de energia.

3.2.1 Software PVsyst

O PVsyst trata de uma ferramenta criada para auxiliar no dimensionamento e desenvolvimento de projetos de geração solar fotovoltaica. Permite análise de estudos, simulações e inserções de dados (SOFTWARE..., 2019).

O software permite a simulação tanto de sistemas fotovoltaicos autônomos como aqueles que são conectados à rede. Além disso possui um vasto banco de dados meteorológicos de diferentes locais e de diversos componentes de sistemas fotovoltaicos (módulos fotovoltaicos, inversores, reguladores de carga, etc.), que facilitam análise e modelagem do sistema (COSTA, 2019).

O PVsyst pode ser utilizado conforme a necessidade de cada usuário, principalmente de arquitetos, engenheiros e pesquisadores, bem como pode ser utilizada de forma educacional por professores e alunos (SOFTWARE..., 2019).

Estes profissionais utilizam o software principalmente para cálculo de perdas por sombreamento e sujeira nos módulos, além de conseguirem estimar a produção de energia considerando a eficiência de cada equipamento do sistema fotovoltaico (SOFTWARE..., 2019).

Neste trabalho, a ferramenta teve duas funções. A primeira de criar um pré-dimensionamento que pode ser definido como sendo uma simulação rápida com valores médios mensais, apenas disponibilizando algumas características gerais do sistema sem especificar componentes. O pré-dimensionamento foi realizado devido ao grande consumo de energia da universidade, de forma que fosse possível compreender a necessidade de implementar energia fotovoltaica para que se torne energeticamente eficiente.

Mediante a necessidade, observa-se que o pré-dimensionamento se torna parte importante da análise quanto a qualidade de energia, já que através do conhecimento da eficiência energética da universidade é possível compreender as vantagens e a economia energética que a mini usina causaria após sua implantação.

De modo complementar o software foi utilizado para análise da eficiência do sistema já considerando os componentes reais instalados e dados meteorológicos da universidade e as perdas principais.

3.2.2 Software MATLAB

O software MATLAB é desenvolvido pela empresa MathWorks e refere-se a uma plataforma para programação voltada para engenheiros e cientistas e sua linguagem é fundamentada na aplicação de matrizes (MATLAB..., 2019).

O software combina um ambiente de desktop ajustado para análise interativa e processos de design com uma linguagem de programação que expressa diretamente matrizes, incluindo o Live Editor para criar scripts que combinam código, saída e texto formatado em um bloco de notas executável. Além disso, os aplicativos MATLAB permitem a percepção de como diferentes algoritmos funcionam com os dados inseridos, podendo repetir quantas vezes necessárias até obter os resultados desejados e, em seguida, gerar automaticamente um programa para reproduzir ou automatizar o trabalho (MATLAB..., 2019).

Com a ferramenta, Simulink, incorporada pelo próprio MATLAB, foi possível a simulação de todo o sistema através de blocos já pré-existentes que facilitam e demonstram seus modelos de cálculos e suas configurações padrão (ROPP; GONZALEZ, 2009).

No Simulink existem bibliotecas específicas para cada área dentro da engenharia, facilitando a simulação e tornando possível obter os resultados necessários. Uma de suas bibliotecas disponíveis foi utilizada o Simscape Electrical, onde se encontra os componentes específicos para a modelagem e simulação do sistema elétrico incluindo o fotovoltaico.

Deste modo é possível parametrizar os modelos usando variáveis e expressões MATLAB e projetar sistemas de medição para sistemas elétricos no Simulink, podendo ainda integrar sistemas físicos no modelo usando componentes do Simscape.

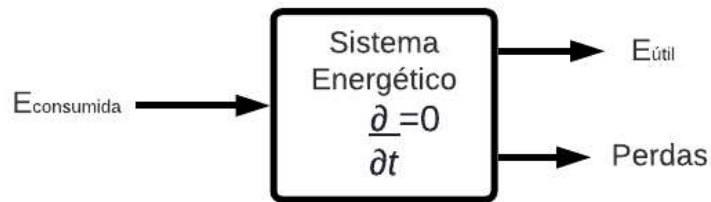
3.3 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para a realização de qualquer trabalho sempre houve necessidade da utilização de energia, seja ela elétrica, mecânica, motriz, química, térmica, solar ou atômica. Assim foram criados meios que identificassem quais eram mais eficientes para a realização do trabalho.

A geração de energia é basicamente apenas conversão energética, ou seja, a transformação de uma energia em outra para realização de trabalho. Duas das leis da física são utilizadas como base, a lei da Conservação de energia e a lei da dissipação de energia (VIANA et al., 2012). O entendimento sobre estas duas leis é necessário para compreender como realizar a eficiência energética.

A lei da Conservação de energia é estudada na engenharia química e conhecida como a Primeira lei da termodinâmica, que possibilita efetuar balanços energéticos, determinar perdas e fluxos energéticos (VIANA et al., 2012). Para uma das aplicações dessa lei nessa pesquisa é utilizado um dos conceitos baseados nela, sendo o de desempenho ou eficiência energética de um sistema. A Figura 3 exemplifica um sistema energético genérico, relacionando o efeito energético útil com o consumo energético (VIANA et al., 2012).

Figura 3 — Sistema energético genérico



Fonte: O autor (2021)

A equação 1 demonstra o cálculo da eficiência de um sistema.

$$\eta_{energ} = \frac{E_{util}}{E_{consumida}} = \frac{E_{consumida} - Perdas}{E_{consumida}} = 1 - \frac{Perdas}{E_{consumida}} \quad (1)$$

A segunda lei básica utilizada em processos energéticos é a Lei da Dissipação da Energia, que fundamenta que não importa o processo de conversão energética sempre terá uma parte de energia térmica como produto final.

É necessário compreender que o uso eficiente de energia é um dos meios para realizar o gerenciamento de custos de empresas, indústrias, universidades ou até residências, já que assim é possível obter uma redução no valor final de um produto comercial ou numa fatura de energia elétrica. Promover a eficiência energética é utilizar de um conhecimento específico dos conceitos baseados na engenharia (SANTOS et al., 2007).

O conhecimento das leis da física e os benefícios de tornar-se um local eficiente energeticamente foram motivos para serem aplicados na pesquisa, realizando a avaliação no sistema fotovoltaico instalado na universidade em duas etapas análise do sistema fotovoltaico em si e da economia produzida pela mini usina instalada para a universidade.

O sistema fotovoltaico é baseado na conversão da irradiação solar em energia elétrica, e devido as perdas o software PVsyst foi utilizado para avaliar cada uma delas.

Para avaliação energética quanto a economia, foi utilizado o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) desenvolvido pela Efficiency Valuation Organization - Organização de Avaliação de Eficiência (EVO) e fornece métodos de diferentes níveis de custo e exatidão, para determinar economia de qualquer instalação ou para Ações individuais de eficiência energética (AEE) (EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION - EVO, 2012)

O PIMVP oferece 4 opções para a medição e verificação do sistema conforme Tabela 1:

Tabela 1 — Opções do PIMVP

Opção do PIMVP	Como calcular a economia	Aplicações típicas
<p>A. Medição Isolada da AEE: Medição dos parâmetros-chave - A economia é determinada por medições no campo dos parâmetros chave. Estes parâmetros definem o uso de energia dos sistemas afetados pela AEE, e/ou o sucesso do projeto. A frequência da medição vai desde o curto prazo a contínua, dependendo das variações esperadas no parâmetro medido e da duração do período de determinação da economia. Os parâmetros não selecionados para medição no campo são estimados. As estimativas podem basear-se em dados históricos, especificações do fabricante, ou avaliação de engenharia. É necessária a documentação da fonte ou a justificação do parâmetro estimado. O erro de economia plausível que surge da estimativa em vez da medição é avaliado.</p>	<p>Cálculo de engenharia do consumo da linha de base e do consumo do período de determinação da economia a partir de medições a curto prazo ou contínuas de parâmetros chave de funcionamento e valores estimados. Ajustes de rotina e não de rotina como exigido.</p>	<p>A AEE da iluminação onde a potência requerida é o parâmetro chave de desempenho energético, medido periodicamente. Estimar as horas de funcionamento a iluminação com base nos horários do edifício e no comportamento dos ocupantes.</p>

Tabela 1 — Opções do PIMVP

(continuação)

Opção do PIMVP	Como calcular a economia	Aplicações típicas
<p>B. Medição isolada da AEE: Medição de todos os parâmetros</p> <p>A economia é determinada pela medição no campo do consumo de energia do sistema afetado pela AEE. A frequência da medição vai desde o curto prazo à contínua, dependendo das variações esperadas na economia e da duração do período de determinação da economia.</p>	<p>Medições a curto prazo ou contínuas do consumo da linha de base e consumo do período de determinação da economia, e/ou cálculos de engenharia, usando medições de representantes do consumo de energia. Ajustes de rotina e não de rotina como exigido.</p>	<p>Aplicação de variador de velocidade ajustável (variador de frequência) e controle de motor para ajustar o fluxo da bomba. Medir a potência elétrica com um medidor de kW instalado na alimentação elétrica do motor, o qual lê a potência a cada minuto. No período da linha de base este medidor permanece durante uma semana para verificar se a carga é constante. O medidor permanece no lugar durante o período de determinação da economia, para medir as variações da potência.</p>
<p>C. Toda a Instalação</p> <p>A economia é determinada pela medição do consumo de energia em nível de toda a instalação ou sub instalação. Medições contínuas do consumo de energia de toda a instalação são efetuadas durante o período de determinação da economia.</p>	<p>Análise dos dados do medidor da linha de base de toda a instalação e do período de determinação da economia. Ajustes de rotina como exigido, usando técnicas tais como uma simples comparação ou análise de regressão. Ajustes não de rotina como exigido.</p>	<p>Programa de gestão de energia multifacetado, afetando muitos sistemas em uma instalação. Medição do consumo de energia com os medidores de gás e eletricidade das concessionárias para um período da linha de base de doze meses e durante o período de determinação da economia.</p>

Tabela 1 — Opções do PIMVP

(conclusão)

Opção do PIMVP	Como calcular a economia	Aplicações típicas
<p>D. Simulação calibrada</p> <p>A economia é determinada através da simulação do consumo de energia de toda a instalação, ou de uma sub instalação.</p> <p>Rotinas de simulação demonstram modelar adequadamente o desempenho energético real medido na instalação.</p> <p>Esta opção requer habitualmente competências consideráveis em simulação calibrada.</p>	<p>Simulação do consumo de energia, calibrada com dados de faturamento por hora ou mensal da concessionária (medidores de consumo de energia final podem ser usados para ajudar a refinar dados de entrada).</p>	<p>Programa de gestão de energia multifacetado, afetando muitos sistemas em uma instalação, onde não existia nenhum medidor no período da linha de base.</p> <p>Medições do consumo de energia, após a instalação de medidores de gás e de eletricidade, são usados para calibrar a simulação. Consumo de energia da linha de base, determinado com utilização da simulação calibrada, é comparado à simulação do consumo de energia do período de determinação da economia.</p>

Fonte: EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION – EVO (2012, p. 18-19).

O PIMVP baseia-se a equação 2:

$$Economia = E_{hip} - E_{Med} \quad (2)$$

Onde E_{hip} é a energia obtida com o modelo calibrado para o período da linha de base (hipotética ou sem as AEEs) e E_{Med} é a energia do período de determinação da economia do modelo calibrado com AEEs ou a energia efetivamente medida.

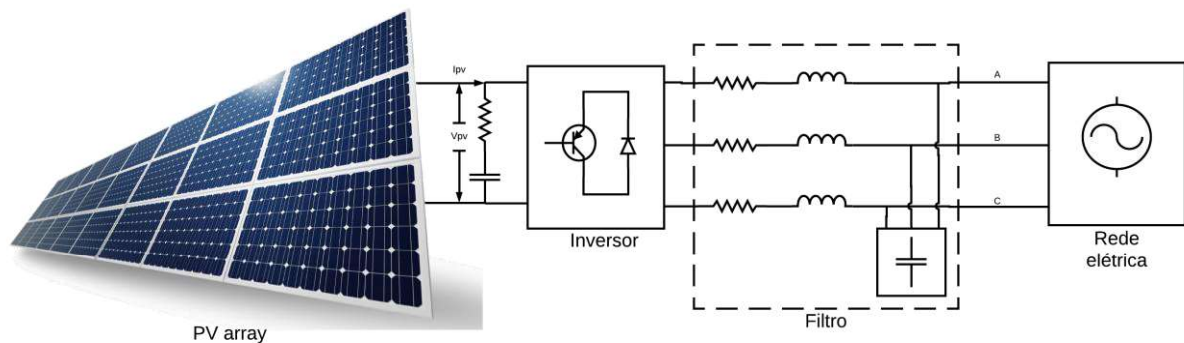
Em teoria a instalação do sistema fotovoltaico gera diminuição no consumo de energia elétrica entregue pela concessionária, ou seja, o aproveitamento de energias que até então eram desperdiçadas, tornando o local instalado eficiente.

3.4 MODELAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO E MÉTODO DE CONTROLE

De forma a avaliar o desempenho de um sistema de geração de energia fotovoltaica é necessário compreender como os painéis fotovoltaicos vão se comportar quando estiverem em operação.

A modelagem do sistema fotovoltaico instalado na universidade, foi baseado em um modelo simples, conforme pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 — Diagrama do sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Adaptado de Khatib e Elmenreich (2016).

No diagrama, Figura 4, é possível perceber que a geração em corrente contínua passa pelo conjunto de painéis fotovoltaicos que é interligado ao inversor que faz a conversão para corrente alternada passando por um filtro que está conectado a rede elétrica.

A modelagem foi criada através do software MATLAB/Simulink utilizando as particularidades técnicas dos principais componentes do sistema fotovoltaico. Os parâmetros utilizados estão dispostos abaixo, nos tópicos referentes ao painel fotovoltaico, inversor e filtro.

3.4.1 Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico gera sua energia baseado na incidência da irradiação solar e a temperatura ambiente, sendo um sistema completamente dependente dos fatores ambientais. Deste modo cada painel fotovoltaico é definido sob as Standard Test Conditions - Condições Padrões de Teste (STC) industrial de irradiação solar de 1.000 W/m² com ângulo zero de incidência, espectro solar de massa de ar a 1,5 e temperatura de célula de 25°C, para que assim seja possível obter as características elétricas de cada painel para o dimensionamento correto para cada local.

As características elétricas dos fabricantes incluem potência máxima definida, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão de potência máxima e coeficientes de temperatura (FRONTIN et al., 2017).

3.4.2 Inversor fotovoltaico

O inversor é responsável pela conversão de energia contínua em alternada, e para isso é necessário ter como base a rede elétrica para que ocorra o sincronismo entre a energia gerada e a energia entregue pela concessionária. Deste modo, para que ocorra a conversão o inversor faz o chaveamento PWM que acompanha a rede elétrica.

Um estudo realizado por Shonardie demonstra a realização do chaveamento utilizando como base o controle feito pela potência ativa e reativa utilizando a transformada Direct-quadrature-zero - Quadratura de zero direta (dq0). A transformada dq0, também conhecida como a transformada de Clarke e Park, transforma um sinal trifásico em um quadro de referência rotativo, possibilitando o controle do chaveamento do inversor baseado na corrente entre o inversor e a rede elétrica, já que obtém as equações das funções de transferência destas correntes de saída, em relação as suas razões cíclicas (SCHONARDIE, 2011).

O inversor também é responsável pelo melhor aproveitamento da geração de energia, pois além da posição de instalação e a angulação do painel é necessário que o sistema trabalhe no máximo ponto de potência, baseado na corrente e tensão gerada pelos painéis. Geralmente os inversores são equipados com Maximum Power Point Tracking - Rastreadores de Ponto Máximo de Potência (MPPT), que conforme a carga conectada no sistema, é feito através de eletrônica de potência, acréscimos ou decréscimos na tensão ou corrente.

Os métodos de MPPT, são conhecidos dentro de sistemas de controle, como controle de Feedback, ou seja, tem-se uma medição da variável que após uma perturbação, um controlador age através do erro medido para que se possa permanecer com o valor adequado da variável.

Os métodos de MPPT mais comuns implementados em inversores são Perturbation and Observation - Perturbação e Observação (P&O) e Incremental Conductance - Condutância Incremental (IC). O método P&O é um método básico e interativo que não necessita de um conhecimento intrínseco das características do sistema fotovoltaico para sua implementação, já o IC é um método baseado na derivada diferenciando a potência do sistema fotovoltaico em relação a tensão ajustando o resultado em zero (KHATIB; ELMENREICH, 2016).

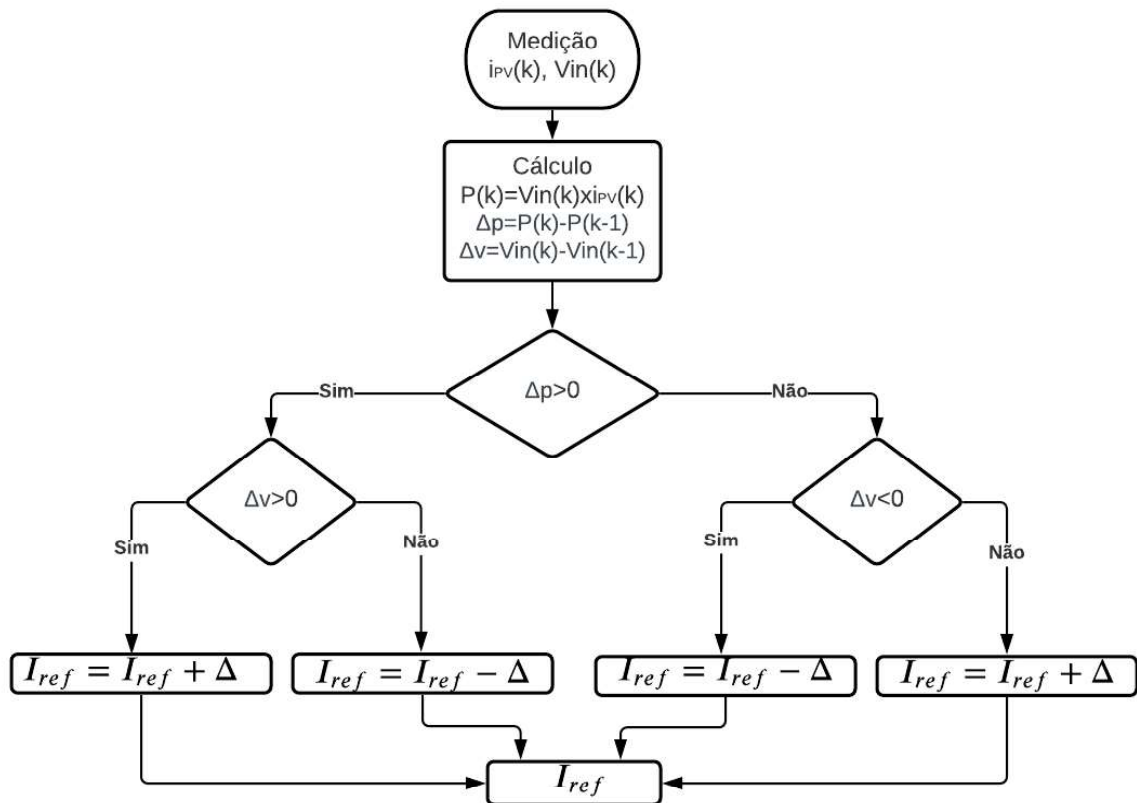
Estudos mais recentes, utilizam como controle dois métodos simultâneos, para que se possa garantir maior eficiência, como o caso de Ahmed, Cherkaoui e Mokhlis, que utilizaram um método híbrido como rede de neurônio (ANN) para determinar uma tensão de referência onde a potência é máxima e o método Deslizante Integral (ISMC) que tenta diminuir o erro entre a tensão gerada pelo módulo fotovoltaico e a tensão de referência do primeiro método (AHMED; CHERKAOUI; MOKHLIS, 2019).

A tecnologia MPPT, vem sendo melhorada e adaptada através de meios que o tornem mais preciso, sendo que os métodos híbridos possuem uma melhor sensibilidade e capacidade dinâmica, como estudo de Güler e Irmak (2019), que se utilizou de um algoritmo Model Predictive Control - Modelo de Controle Preditivo (MPC). Onde a corrente de referência do algoritmo MPC determinada pelo método P&O e o fluxo de potência é controlado pelo algoritmo MPC baseado no MPPT.

Para o método MPC é necessário o controle da corrente de saída do inversor, por isso é utilizado o método P&O para a obtenção da corrente de referência na saída do inversor (IRMAK; GÜLER, 19).

A Figura 5, apresenta o algoritmo de controle que começa com a medição dos parâmetros a cada iteração (k) de tensão (V_{in}) e corrente (i_{pv}) gerado pelos painéis que possui a função de calcular a potência e o valor atual e anterior da potência e tensão que baseado na diferença entre esses valores define-se o acréscimo ou decréscimo na corrente de referência (GÜLER; IRMAK, 2019).

Figura 5 — Fluxograma do algoritmo MPPT P&O para definição da corrente de referência



Fonte: Adaptado de Güler e Irmak (2019).

O sistema de controle foi baseado no modelo básico de P&O adaptado pelo Güler e Irmak (2019), tendo como valor de referência a corrente. Apesar do objeto de estudo não ter utilizado o modelo mais eficiente de MPPT, aplicou aquele que foi capaz de simular a entrada de energia fotovoltaica conectada a rede.

3.4.3 Filtro

Para realização da modelagem do filtro, que é conectado logo após o inversor, foi baseado no modelo de Güler e Irmak (2019) com uma indutância em série e uma capacitância em paralelo.

A equação 3 demonstra o cálculo da indutância (L_f) (GÜLER; IRMAK, 2019).

$$L_f = \frac{0.1V^2}{2\pi f P_p} \quad (3)$$

A equação 4 demonstra o cálculo da capacitância (C_f) (GÜLER; IRMAK, 2019).

$$C_f = \frac{0.05P_p}{2\pi f V^2} \quad (4)$$

As equações 3 e 4 estão representando, tensão entre fases (V), frequência da rede (f) e a potência (P_p) por fase do sistema fotovoltaico.

3.5 QUALIDADE DE ENERGIA

Com o aumento da demanda de energia e a necessidade de atendimento ao mercado de forma eficiente, o termo qualidade de energia passa a ter destaque. A preocupação com a qualidade de energia entregue ao consumidor, passa por normas nacionais e internacionais para que se tenha certeza da qualidade do produto entregue. Deste modo quando o consumidor é um gerador, ele deve estar ciente das normas para que sua geração própria não interfira na qualidade da rede de distribuição.

A qualidade de energia elétrica é necessária para a medição do produto e do serviço oferecido pelas concessionárias cuja análise é realizada através da verificação de quaisquer fenômenos eletromagnéticos que possam influenciar nos parâmetros elétricos da rede. As normas técnicas definem os fenômenos que ocorrem no sistema elétrico e classifica sua faixa de operação e o tempo máximo de ocorrência para que o sistema tenha confiabilidade.

Segundo Nunes (2017), os distúrbios que atingem o setor elétrico, sejam eles, variações de tensão, correntes e frequências, tem consequências diretas de interesse econômico, devido ao fato de tais distúrbios causarem interrupções no fornecimento

de energia. Em indústrias que dependem do fornecimento de energia de modo contínuo para produções em grande escala, o atraso pela interrupção de energia, causa atrasos irreparáveis, além de perda de matéria prima e do prejuízo financeiro.

Dado ao exposto, ressalta-se a importância de entender as classificações e a diversidade das variações ocorrentes, como demonstrado pela regulamentação do PRODIST - Módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). Estas se subdividem em categorias, de regime permanente ou de transitório mostrados a seguir:

I - Permanente

- a. Tensão em regime permanente;
- b. Fator de potência;
- c. Distorções harmônicas;
- d. Desequilíbrio de tensão;
- e. Flutuação de tensão;
- f. Variação de frequência;

II - Transitório:

- a. Variação de tensão de curta duração;

3.5.1 Regime Permanente

Classificados como fenômenos que ocorrem durante o regime permanente acompanhando a frequência fundamental da rede.

3.5.1.1 Tensão em regime permanente

A tensão em regime permanente terá de ser fornecida pela concessionária dentro dos parâmetros ajustados, e a análise da qualidade do produto também deve seguir as normas estabelecidas pela (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

O sistema da UNIFAL, entrega em baixa tensão, assim o valor da tensão nominal é a tensão de referência. As faixas de tensão são definidas e classificadas como adequadas, precárias e críticas. A Tabela 2, demonstra as faixas de variação de tensão medidas (TM) em relação à tensão de referência (TR) e suas respectivas classificações. Esses valores são padrões para sistemas com o ponto de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV para tensões de 220V e 127V.

Tabela 2 — Faixas de Tensão Medida em Relação à de Referência

Tensão	Faixa de Variação da Tensão Medida (TM) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$(202 \leq TM \leq 231) / (117 \leq TM \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TM < 202 \text{ ou } 231 < TM \leq 233) / (110 \leq TM < 117 \text{ ou } 133 < TM \leq 135)$
Crítica	$(TM < 191 \text{ ou } TM > 233) / (TM < 110 \text{ ou } TM > 135)$

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2018).

Para a medição dos parâmetros de qualidade de energia usa a equação 5 para o cálculo do índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100 \quad (5)$$

A equação 6 para o cálculo do índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100 \quad (6)$$

Onde nlp é o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária e nlc representa o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa crítica.

3.5.1.2 Fator de Potência

O fator de potência trata de uma medida a qual informa a eficiência do uso da energia. Em suma refere-se ao ângulo de defasagem entre a potência ativa e a aparente no triângulo de potências. Se destaca pela razão entre a potência ativa, aquela que produz trabalho medido em kW, pela potência aparente, a potência total medida em kVA, sendo a soma vetorial da potência ativa e a potência reativa medida em kVAr (WEG, 2009).

A potência aparente é o valor total da potência que será utilizada de uma fonte geradora, sendo que a potência ativa é a componente da potência aparente, que se transforma integralmente em trabalho. Por fim, a potência reativa pode ser definida como sendo o contrário da potência ativa, sendo a componente da potência aparente que não realiza trabalho (MARTINHO, 2019).

Em um sistema elétrico a potência reativa ocupa um espaço que poderia ser utilizado pela potência ativa, assim quanto maior a quantidade de energia reativa mais baixo será o fator de potência, o que indica uma baixa eficiência energética (WEG, 2009).

O fator de potência pode ser calculado conforme equação 7, onde P refere-se a potência ativa e Q a potência reativa:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (7)$$

Os inversores fotovoltaicos on-grid entregam a potência ativa, dada em Watts (W), produzida pelos painéis para a rede de distribuição. Como existem cargas que consomem e geram a potência reativa, dada em VAR, o fator de potência tende a baixar (NUNES, 2017).

O fator de potência é um dos pontos da análise para a qualidade de energia sendo necessário que ele se mantenha dentro dos parâmetros toleráveis, sejam eles, 0,92 a 1 indutivo e 0,92 a 1 capacitivo. Caso o consumidor esteja fora desses parâmetros, o consumidor pode ser penalizado com pagamento de multas por ultrapassagem dos limites de Fator de Potência.

Aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativos que excederem o limite permitido, serão aplicadas as cobranças de acordo com o cálculo

estabelecido por norma e serão adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras (Aneel, 2010/2018). Nota-se que é necessário medir o fator de potência para avaliar se a qualidade de energia entregue ao consumidor está dentro dos padrões recomendados.

3.5.1.3 Distorções harmônicas

As distorções harmônicas são fenômenos capazes de causar deformações nas formas de ondas senoidais da frequência fundamental das tensões e correntes no sistema elétrico (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). A quantidade de vezes que a harmônica é múltipla inteira da frequência fundamental é denominado a sua ordem harmônica (FORTES, 2016).

A Tabela 3 informa a classificação harmônicas até 14ª ordem, com a sua respectiva frequência e sequência.

Tabela 3 — Classificação das harmônicas até 14ª ordem

Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª
Freq. (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	520	580	640	700	760	820
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	+	-	0

Fonte: Adaptado de Fortes (2016).

As distorções harmônicas ímpares, são comuns na corrente alternada e podem prejudicar os semiciclos da forma de onda com deformações simétricas. Já as distorções pares causam deformações assimétricas de meia onda, sendo que os impactos são menores que os ímpares devido ao fato que sua assimetria não influencia no valor médio da onda, mantendo em zero, ou seja, permanecendo com o mesmo valor de área de cada semi-ciclo (FORTES, 2016).

Em meio a tantos equipamentos instalados a rede elétrica, aqueles com características não-lineares são os causadores das distorções harmônicas. Essas cargas tendem a drenar a corrente causando uma distorção na forma de onda que ao passar por toda impedância causa a queda de tensão equivalente a frequência da harmônica trazida pela corrente (FORTES, 2016).

Para se calcular a distorção harmônica total na tensão (DHT_v) é necessário o uso da equação 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018):

$$DHT_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=max} \frac{v_h^2}{v_1^2}} \cdot 100 \quad (8)$$

Para se calcular a distorção harmônica total na corrente (DHT_i) é necessário o uso da equação 9 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018):

$$DHT_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=max} \frac{i_h^2}{i_1^2}} \cdot 100 \quad (9)$$

A taxa de distorção harmônica total de tensão e corrente são representadas respectivamente por DHT_v e DHT_i. O valor eficaz da tensão e da corrente de ordem da componente harmônica, h, são v_h e i_h e o valor eficaz da tensão e corrente fundamental são v₁ e i₁.

O sistema elétrico deve estar em conformidade com as normas regulamentadas pelo Módulo 8 do PRODIST, que define as faixas aceitáveis de distorções harmônicas, conforme demonstradas na Tabela 4.

Tabela 4 — Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Tensão nominal	Distorção harmônica total (DTH)
V _n ≤ 1,0 kV	10,0%
1,0 kV < V _n < 69 kV	8,0%
69 kV ≤ V _n < 230kV	5,0%

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2018).

É possível calcular as distorções harmônicas individuais através das equações 10 e 11 (FORTES, 2016), explanadas abaixo, todavia houve uma revisão no

PRODIST, e o Módulo 8 que está em vigência não tratou destes limites de distorções individuais, porém são tratados em versões anteriores desta norma.

A distorção harmônica individual de tensão é demonstrada na equação 10 (FORTES, 2016).

$$DHI_v = \frac{v_h}{v_1} \cdot 100 \quad (10)$$

A distorção harmônica individual de corrente é demonstrada na equação 11 (FORTES, 2016).

$$DHI_i = \frac{v_h}{v_1} \cdot 100 \quad (11)$$

O DHI_v e o DHI_i são respectivamente as taxas de distorções harmônicas individual de tensão e corrente.

Os limites das distorções individuais de tensão conforme Tabela 5 e 6.

Tabela 5 — Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão ímpares não múltiplas de 3

Ordem Harmônica	VN ≤ 1 KV	1 KV < VN ≤ 13,8 KV	13,8 KV < VN ≤ 69 KV	69 KV < VN < 230 KV
5	7,5	6	4,5	2,5
7	6,5	5	4	2
11	4,5	3,5	3	1,5
13	4	3	2,5	1
17	2,5	2	1,5	1
19	2	1,5	1,5	1
23	2	1,5	1,5	1
25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2018).

Tabela 6 — Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão ímpares múltiplas de 3

Ordem Harmônica	VN ≤ 1 KV	1 KV < VN ≤ 13,8 KV	13,8 KV < VN ≤ 69 KV	69 KV < VN < 230 KV
3	6,5	5	4	2
9	2	1,5	1,5	1
15	1	0,5	0,5	0,5
21	1	0,5	0,5	0,5
>21	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (2018).

3.5.1.4 Desequilíbrio de tensão

O sistema elétrico pode ser monofásico, bifásico e trifásico, entretanto, o sistema mais eficiente é o trifásico que, por ser composto por três fases com módulos de tensão iguais e defasagem de 120° entre cada uma delas distribui melhor a corrente entre as fases. Entretanto, o desequilíbrio de tensão acontece quando se identifica diferentes valores, tanto no módulo quanto na defasagem entre estas tensões (NUNES, 2017).

O desequilíbrio de tensão pode ser estimado através das equações 12 e 13 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018):

$$FD = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (13)$$

As siglas V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} representam as magnitudes de tensões eficazes de linha na frequência fundamental, e a sigla FD representa o fator de desequilíbrio de tensão.

Nas normas regulamentadoras, são tolerados valores limites para desequilíbrio de tensão. Esses valores limites encontram-se na Tabela 7 e são utilizados conforme (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Tabela 7 — Limites de desequilíbrio de tensões

Tensão nominal	FD
$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	3,0%
$1 \text{ kV} < V_n < 230\text{kV}$	2,0%

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2018).

Os valores representam o valor máximo desejável no sistema elétrico de distribuição sendo importante ressaltar que é impossível ter um sistema perfeitamente equilibrado, visto que existem cargas com potências diferentes sendo monofásicas, bifásicas e trifásicas, o que dificulta o equilíbrio em cada uma das fases, porém é possível atenuar o desbalanceamento.

Esse desequilíbrio pode se tornar um problema quando se trata de sistemas fotovoltaicos, visto que o inversor injeta uma potência inconstante no sistema o que é causado pela potência gerada pelos módulos. Ainda deve-se considerar que eles dependem da irradiância do sol.

O desequilíbrio de tensão pode ainda afetar no desempenho de equipamentos, como dispositivos eletrônicos, motores elétricos de indução, reguladores de tensão e outros. Esse problema acaba sendo prejudicial a longo prazo, visto que os picos de tensão podem resultar em queima do equipamento, deixando-o inútil para uso.

3.5.1.5 Flutuação de tensão

Flutuação de tensão é um fenômeno que ocorre nos sistemas elétricos sendo descrito como variações na tensão elétrica, seja no valor eficaz ou de pico esses fenômenos podem ser esporádicos, aleatório ou até repetitivo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). Algumas das consequências das flutuações de tensão são as perdas de rendimento de equipamentos e os efeitos de cintilação luminosa (Flicker).

A qualidade de tensão tem por objetivo evitar a cintilação luminosa para o consumidor devido ao incômodo que pode causar ao ser humano em um ambiente afetado por esse fenômeno. Quando há uma variação na tensão de alimentação das lâmpadas ocorre a variação do fluxo luminoso, trazendo ao consumidor um desconforto visual, que pode gerar irritabilidade, fadiga e redução de concentração e outros sintomas de mal-estar.

A Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração (PST - Probability Short Term), representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos. Já a Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração (PLT - Probability Long Term), representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas.

Para calcular o PST é utilizada a equação 14 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018):

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (14)$$

Para calcular o PLT utiliza-se a equação 15 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018):

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{st_i})^3} \quad (15)$$

Os valores de PST, iguais ou superiores a 1pu, são considerados inadmissíveis por causarem incômodos acima do nível de conforto (MARTINHO, 2019).

O item 6 do Módulo 8 do PRODIST também trata da flutuação de tensão e seus índices de severidade, considerando que o PST é adequado quando menor que 1 pu, precário quando de 1 pu a 2 pu e crítico quando maior que 2 pu (MARTINHO, 2019).

Na regulamentação do PRODIST é considerado também os níveis de PLS, sendo considerado adequado quando menor é que 0,8 pu, precário quando é de 0,8 pu a 1,6 pu, e crítico quando maior que 1,6 pu (MARTINHO, 2019).

Nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, a flutuação de tensão pode ocorrer devido a variação da potência gerada ou inserida conforme a irradiação recebida do sol. Neste caso, a corrente do sistema fotovoltaico ao interagir com a impedância da rede elétrica faz com que a tensão penda para inconstância da irradiação, gerando variações no seu valor eficaz ou criando picos de tensão instantânea (NUNES, 2017).

3.5.1.6 Variação de frequência

Um dos principais parâmetros a ser analisado no sistema elétrico para medição quanto a qualidade de energia é a frequência. A frequência possui um valor único em todo o sistema brasileiro, sendo o padrão de 60 Hz, pois é interligado e totalmente dependente dos geradores síncronos. Toda geração conectada ao sistema de distribuição, seja em condições normais de operação ou em regime permanente deve operar no mesmo valor de frequência.

Conforme definido pelo Módulo 8 do PRODIST, os limites de variação da frequência permitidos estão determinados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Todavia, após ter ocorrido qualquer distúrbio na rede as gerações devem assegurar que a frequência regresse no tempo de 30 segundos ao dos limites de 59,5 Hz e 60,5 Hz, para que volte ao equilíbrio entre carga e geração (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

O Módulo 8 do PRODIST dispõe que, em caso de necessidade de desligamento da geração ou da carga, seja possível o equilíbrio do sistema de distribuição durante a perturbação. A frequência deve seguir os valores expressados na Tabela 8.

Tabela 8 — Valores de frequência e seus respectivos tempos

Frequência (F)	Tempo permitido (s)
$F < 56,5 \text{ Hz}$ ou $F > 66 \text{ Hz}$	0 s
$62 \text{ Hz} < F < 63,5 \text{ Hz}$	30 s
$F > 63,5 \text{ Hz}$	10 s
$57,5 \text{ Hz} < F < 58,5 \text{ Hz}$	10 s
$57,5 \text{ Hz} > F > 56,5 \text{ Hz}$	5 s

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2018).

3.5.2 Variação de tensão de curta duração (VTCD)

A maioria dos equipamentos e dispositivos utilizam um determinado nível de tensão para funcionar corretamente. Quando a tensão é muito baixa o equipamento não funciona e quando é muito alta se danifica (MARTINHO, 2019).

Para evitar esses efeitos da variação de tensão a Associação de Fabricantes de Computadores (CDEMA), definiu as tolerâncias mínimas de variação de tensão que os equipamentos devem suportar sem o risco de ser prejudicado. A curva CDEMA define os valores de variação de tensão para mais e para menos em função do tempo em que ocorre. Quanto menor o tempo da variação, maior a chance de não afetar os equipamentos (MARTINHO, 2019).

Como forma de aprimorar a curva CBEMA, a Information Technology Industry Council (ITIC), criou a curva ITIC, que é caracterizada por ter uma análise mais precisa quanto a sensibilidade de equipamentos eletroeletrônicos (MARTINHO, 2019).

As variações de tensão de curta duração são caracterizadas pelo aumento e redução da tensão em relação à tensão nominal, durante um período que compreende 0,5 ciclo e um minuto (MARTINHO, 2019).

Para que permaneça dentro dos parâmetros definidos pelo PRODIST, os desvios devem ser de no máximo três minutos na amplitude do valor eficaz da tensão (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

O PRODIST define dois tipos de classificação para a variação de tensão de curta duração:

- Variação Momentânea de Tensão
- Variação Temporária de Tensão

A Tabela 9, demonstra suas características e definições.

Tabela 9 — Classificação da Variação de Tensão de Curta Duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	≤ 3 s	< 0,1 p.u
Variação Momentânea de Tensão	Afundamento Momentâneo de Tensão	1 ciclo - 3 s	0,1 p.u - 0,9 p.u
Variação Momentânea de Tensão	Elevação Momentânea de Tensão	1 ciclo - 3 s	> 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	3 s - 3 min	< 0,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Afundamento Temporária de Tensão	3 s - 3 min	0,1 p.u - 0,9 p.u
Variação Temporária de Tensão	Elevação Temporária de Tensão	3 s - 3 min	> 1,1 p.u

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2018).

Pode se calcular a amplitude do evento (%) através da equação 16 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \cdot 100 \quad (16)$$

Onde V_e é a amplitude do evento dado em porcentagem, V_{res} é o valor da tensão residual do evento de VTCD dado em Volt (V) e V_{ref} é a tensão de referência dada em Volt (V).

A variação do tempo para compreensão do início e do final do evento, pode ser calculado através da equação 17 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (17)$$

A duração do evento é dado em milissegundos (ms) e simbolizado por Δt_e , enquanto os valores tempo final (TF) do evento e tempo inicial (TI) é respectivamente, t_f e t_i .

$$f_e = n \quad (18)$$

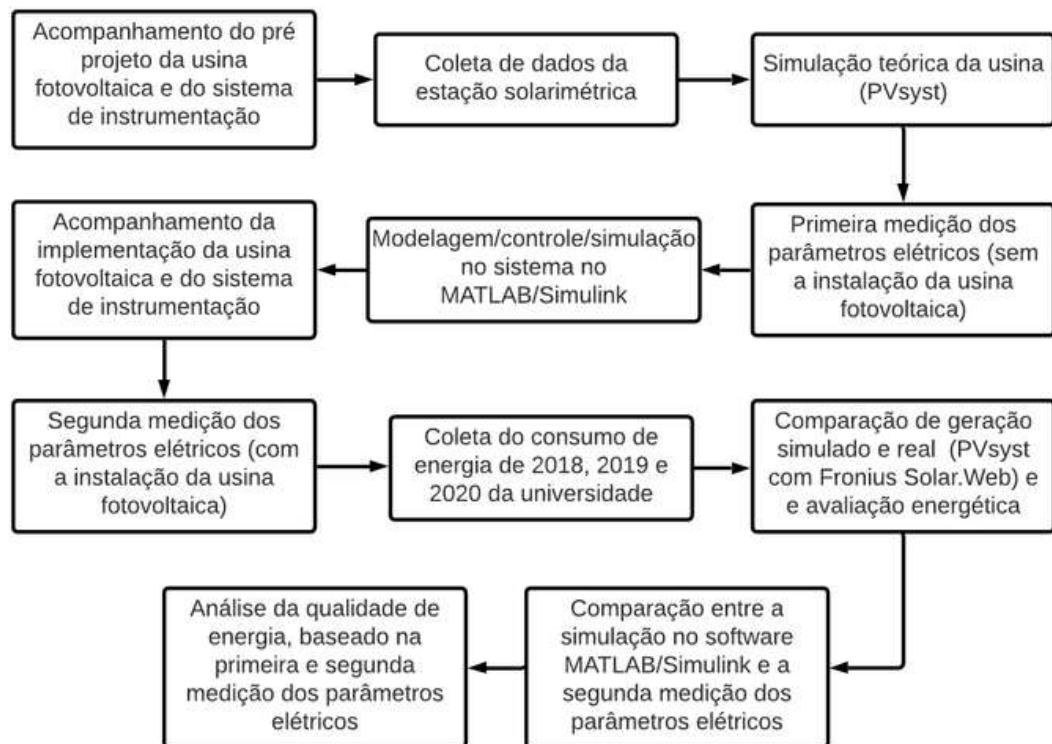
Conforme a equação 18, a frequência do evento é dado por f_e o qual representa a quantidade de eventos de VTCD ocorridos durante o período de análise.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema fotovoltaico apesar de simples de ser compreendido, possui variáveis que precisam ser medidas e monitoradas para que opere em sua capacidade máxima, aproveitando toda sua eficiência. Logo, este trabalho se baseou em todo contexto de instrumentação, medição, avaliação energética, modelagem e análises, seja por meio de simulações computacionais e medição de parâmetros em campo, aplicados na engenharia.

Deste modo, seguiu-se a seguinte metodologia, conforme pode ser visualizado no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 — Metodologia



Fonte: O autor (2021).

- O acompanhamento, participação e desenvolvimento do projeto da usina fotovoltaica teve como intuito o conhecimento sobre o pré-projeto, instrumentação, bem como a funcionalidade de cada parte do sistema de geração fotovoltaica.

- A coleta de dados da estação solarimétrica foi necessária para o desenvolvimento das simulações, já que o sistema fotovoltaico é um tipo de geração de energia que depende totalmente das condições climáticas.
- A simulação teórica da usina uma parte fundamental do trabalho, foi necessária para iniciar a avaliação energética referente a quantidade de energia que poderia ser gerada bem como obter supostas perdas seja em relação ao local de instalação, sombreamento, cabeamento, etc. Para isto, um software denominado PVsyst, foi utilizado cuja finalidade é analisar a eficiência energética do sistema.
- A primeira medição dos parâmetros elétricos refere-se à instalação do analisador de energia para o entendimento da qualidade de energia da universidade e futura comparação dos resultados a serem obtidos após a instalação da usina fotovoltaica. Esta medição foi realizada antes da inserção da mini usina e teve como objetivo a análise da rede.
- A modelagem e simulação do sistema no MATLAB/Simulink foram realizadas para uma análise dos dados teóricos e com bases nos aprendizados da engenharia química, utilizou-se métodos de controle para uma simulação via software MATLAB, para análises de possíveis distúrbios que possam ocorrer futuramente na rede elétrica após a inserção do sistema fotovoltaico.
- O acompanhamento da implementação da usina fotovoltaica realizada também como parte do trabalho, teve como propósito o conhecimento total sobre o sistema. A mini usina, com todo sistema de instrumentação, monitoramento foram integrados a rede elétrica visando estudos futuros de impactos e análise quanto a sua eficiência energética. O acompanhamento da instalação da mini usina possibilitou o entendimento de cada fase da geração de energia fotovoltaica.
- Segunda medição dos parâmetros elétricos, concomitante com a geração fotovoltaica foi reinstalado o equipamento analisador de energia para a futura avaliação dos impactos causados na rede elétrica através da utilização deste tipo de geração.
- Coleta de dados de consumo de 2018, ou seja, um ano antes da instalação da usina fotovoltaica e um ano após a instalação, no período de abril de 2019

até Março de 2020. Deste modo para verificar a economia ocasionada pela instalação de uma mini usina de 84,36kWp na universidade.

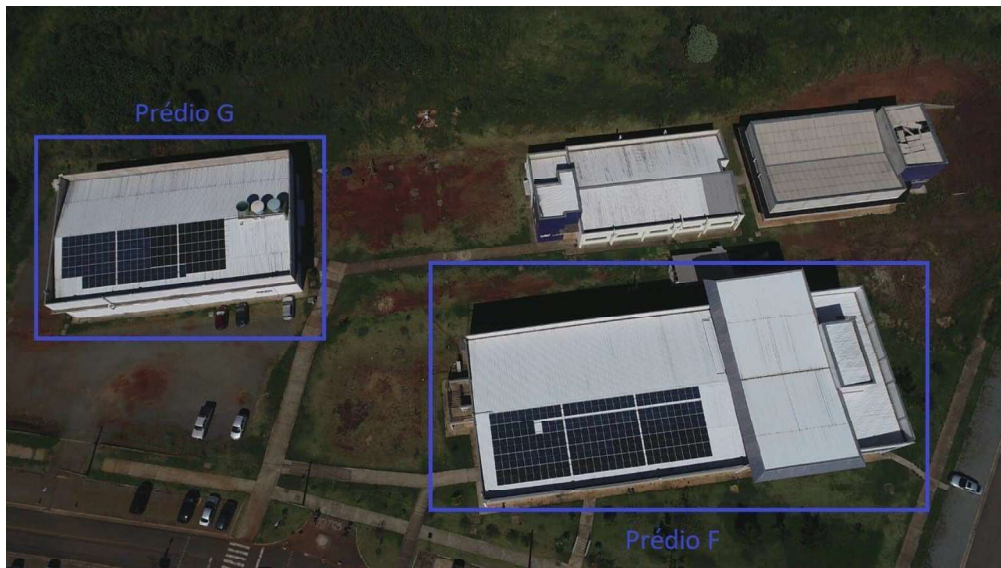
- Comparação PVsyst teórico com a energia gerada: Com a instalação concluída e os dados gerados por um ano, através do software próprio do inversor, foi possível a análise da eficiência energética e análise do teórico e prático (PVSYST e Fronius Solar Web).
- Comparação entre o que foi desenvolvido no software MATLAB/Simulink com os dados da segunda medição através do analisador de energia. Como método de analisar os impactos causados com a inserção gradual dos inversores.
- Análise da qualidade de energia baseada na comparação da primeira medição (sem a inserção do sistema fotovoltaico) e a segunda medição (com a inserção do sistema fotovoltaico).

4.1 ESTUDO DE CASO: MINIUSINA SOLAR FOTOVOLTAICA

Um estudo de caso aplicado na Universidade Federal de Alfenas - MG, campus Poços de Caldas foi realizado, sendo que houve uma prévia análise sobre os locais onde poderia ser instalado os painéis solares para melhor aproveitamento da energia, considerando que a irradiação e outros fatores externos podem modificar os resultados, interferindo na geração de energia fotovoltaica.

O sistema analisado na universidade é composto por duzentos e dezesseis módulos fotovoltaicos, e seis inversores com potência distintas. Para atingir seu ponto de maior eficiência os módulos foram divididos em dois prédios, sendo eles "Prédio F" e "Prédio G", conforme Figura 7. Após um estudo dos telhados estes foram os que demonstraram ter o melhor aproveitamento para geração e menor perdas por sombreamentos. Outra característica refere-se a seus telhados serem voltados para o norte para que a irradiação solar seja melhor aproveitada.

Figura 7 — Prédios F e G



Fonte: O autor (2021).

A configuração da miniusina foi acompanhada em conjunto com os pesquisadores os quais definiram os tipos de painéis a serem instalados bem como suas características técnicas. Tais informações podem ser verificadas na Tabela 10, o qual dispõe de dados específicos seja relacionado a potência, quantidade de painéis em série (strings), quantidade de painéis, tipos e a potência de cada um deles.

Tabela 10 — Configuração da miniusina

Local	Potência do Inversor (Fronius)	Quantidade de Strings	Quantidade de painéis	Tipo de painel	Potência do Painel (Canadian)
Prédio F	15 kWp	2	19	Monocristalino	370 Wp
Prédio F	15 kWp	3	17	Policristalino	355 Wp
Prédio F	15 kWp	3	17	Policristalino	295 Wp
Prédio G	15 kWp	3	17	Policristalino	295 Wp
Prédio G	15 kWp	3	17	Monocristalino	300 Wp
Prédio G	5 kWp	2	7	Policristalino	355 Wp

Fonte: O autor (2019).

A Figura 8 apresenta a instalação dos painéis fotovoltaicos no prédio F.

Figura 8 — Painéis Fotovoltaicos Instalados no Prédio F



Fonte: O autor (2021).

A Figura 9 apresenta a instalação dos painéis fotovoltaicos no prédio G.

Figura 9 — Painéis Fotovoltaicos Instalados no Prédio G



Fonte: O autor (2021).

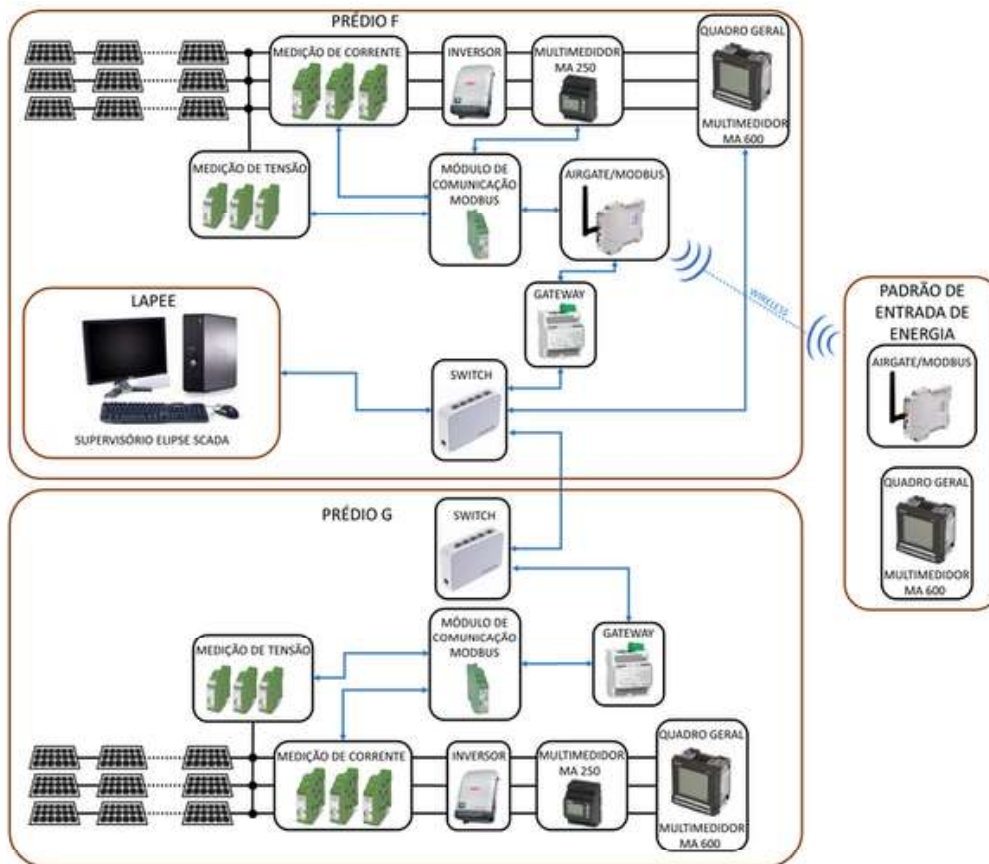
4.1.1 Acompanhamento do pré-projeto da instrumentação

Para o desenvolvimento do sistema de medição é necessário conhecer todo processo em que será utilizado, começando pelo o que será medido, como será feito e como as medições podem ser manipuladas (DALIENTO et al., 2017).

O sistema do pré-projeto está representado na Figura 9. Este é acompanhado de equipamentos de medição de tensão e corrente, entre os módulos fotovoltaicos e inversores. Isso deve-se ao fato da miniusina instalada na universidade ser um sistema inovador no Brasil, já que não possui monitoramento de usina fotovoltaica com sistema de medição separado.

Para que se tenha um acompanhamento do monitoramento, com apresentação de todos os dados medidos, bem como a apresentação de possíveis falhas, uma comunicação entre todos os medidores foi realizada. A Figura 10 apresenta em linhas azuis os cabos de comunicação, enquanto que as linhas pretas as ligações elétricas da instalação.

Figura 10 — Sistema instalado



Fonte: O autor (2020).

Além disso, foram instalados multimedidores, bem como o analisador de energia nos painéis gerais do prédio F e prédio G e no ponto de entrada de energia

da universidade, com o objetivo de obter a medição da qualidade de energia entregue, sendo que o analisador é mais sensível podendo medir os harmônicos de corrente e as tensões individuais e totais.

A Figura 11 demonstra o sistema de automação e os inversores instalados no prédio F.

Figura 11 — Sistema de automação e inversores do Prédio F



Fonte: O autor (2021).

A Figura 12 demonstra o sistema de automação e os inversores instalados no prédio G.

Figura 12 — Sistema de automação e inversores do Prédio G



Fonte: O autor (2021).

As Figuras 11 e 12 apresentam os seis inversores instalados e os painéis com os equipamentos de automação da miniusina. O painel de medição CC é o quadro onde estão instalados os equipamentos de medição das correntes e tensões geradas pelos painéis fotovoltaicos e os fusíveis.

O painel de medição CA é o quadro onde estão instalados os equipamentos de medição MA250 responsável pela medição após a saída do inversor. Os quadros gerais estão instalados o multimetro MA600, os disjuntores individuais de cada inversor e o disjuntor geral do sistema fotovoltaico no prédio.

Já nos painéis de comunicação estão instalados os equipamentos que recebem os dados de medição e enviam para a central no laboratório LAPEE.

Cabe ressaltar que o projeto da mini usina não foi realizado através desse trabalho, ocorrendo apenas o acompanhamento sobre todo o projeto.

4.2 ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA

A estação solarimétrica é um conjunto de instrumentos que medem os parâmetros de irradiância solar global, difusa e direta, mas podem medir outros parâmetros, como velocidade do vento, temperatura ambiente, umidade, dentre outros e, por este motivo, todos seus instrumentos de medição devem ter o certificado solicitado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE.

A estação solarimétrica utilizada pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 — Estação Solarimétrica instalada na universidade



Fonte: O autor (2021).

O equipamento utilizado no campus da universidade contém os piranômetros da Kipp-Zonen que são referência em medição de irradiação. Sensores de temperatura, umidade e vento da Thies Clima e o data logger Ammonit M40 – tecnologia alemã, de fácil manuseio na telemetria e servidor web, para ter acesso aos dados medidos.

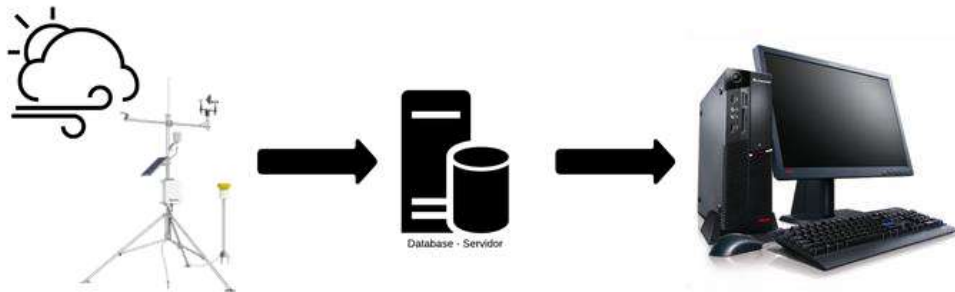
A estação solarimétrica foi utilizada para coletar dados locais sobre temperatura ambiente, irradiação, velocidade do vento e umidade. Dados esses, necessários para o pré-projeto no software PVSyst e também para a simulação no MATLAB/Simulink.

Apesar do software PVsyst já ter bases de dados pré-cadastrados foram utilizados dados próprios coletados com a solarimétrica instalada na universidade, o que de fato representa maior confiabilidade nas simulações.

Os dados foram captados a cada 10 minutos sendo feito uma média mensal durante um ano para a comparação da geração simulada e a geração de energia real produzida pela miniusina instalada na universidade.

A Figura 14 demonstra como a solarimétrica envia os dados de irradiância e temperatura.

Figura 14 — Dados da solarimétrica



Fonte: O autor (2020).

Os dados foram enviados a um servidor acessado de forma automática disponibilizado por uma plataforma online do próprio fabricante. Essa plataforma é denominada AmmonitOR (Ammonit Online Report), sendo utilizada online para arquivar, controlar e visualizar os dados de medição via internet (AMMONIT, 2019).

4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional foi realizada em dois softwares e uma aplicação web. Com o PVsyst foi realizado o pré-projeto considerando a geração do sistema e sua eficiência energética e o Fronius Solar.Web foi utilizado para fins de comparação entre a geração simulada e geração real. O MATLAB/simulink auxiliou na modelagem do sistema para análise da influência na qualidade de energia.

A aplicação *web* é fornecida pela *Fronius*, fabricante dos inversores instalados na universidade. Para os clientes da marca é possível ter acesso a gerações

instantâneas e histórico, através de gráficos e relatórios (FRONIUS INTERNATIONAL GMBH, 2020)

4.3.1 Software PVsyst

O dimensionamento e simulação do sistema fotovoltaico é desenvolvido através do software PVsyst o qual um pré-projeto foi criado com parâmetros climáticos e físicos e demais dados que são capazes de influenciar na geração de energia. Desta forma é possível a obtenção da estimativa da quantidade de energia gerada considerando o local, inclinação dos módulos fotovoltaicos, e condições climáticas em diferentes épocas do ano.

Para o pré-projeto utilizou-se os dados referenciados na Tabela 11 para simular a geração de energia na universidade, a qual levou em consideração cada fator de perda possível e garantias na mitigação de riscos elétricos seja dos painéis ou de seus inversores.

Os dados para simular a geração foram coletados da estação solarimétrica no período de Abril de 2019 até Março de 2020. Dentre os parâmetros utilizados para análise se destacam a irradiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade do ar, conforme pode ser visualizado na Tabela 11.

Tabela 11 — Dados da Solarimétrica

Meses	Irradiação (kWh/m ² .mês)	Temperatura (°C)	Velocidade do Vento (m/s)	Humidade Relativa (%)
Jan	172,5	22,2	0,88	84,5
Fev	113,4	21,0	1,03	90,3
Mar	163,4	20,5	0,78	83,4
Abr	141,9	20,3	0,69	83,2
Mai	119,0	18,0	0,58	84,2
Jun	119,6	15,9	0,59	80,4
Jul	134,0	14,4	0,69	75,8
Ago	142,0	17,0	0,83	74,2

Tabela 11 — Dados da Solarimétrica

(conclusão)

Meses	Irradiação (kWh/m².mês)	Temperatura (°C)	Velocidade do Vento (m/s)	Humidade Relativa (%)
Set	150,2	20,7	0,96	71,1
Out	183,6	21,7	0,92	74,8
Nov	163,6	21,4	0,97	84,1
Dez	159,5	21,7	0,90	84,3

Fonte: O autor (2020).

Nas simulações foram consideradas as perdas padronizadas pelo próprio software, sendo de 3% de perdas por sujidade anual, perdas ôhmicas de 1,5% nos cabos e perdas térmicas devido ao local instalado ser em cima do telhado (semi-integrado com conduta de ar) tendo como valor de 20 W/m²K.

A simulação 3D é feita para que seja o mais próximo possível da realidade sendo baseada na imagem do google maps e nas medidas dos prédios F e G que foram retiradas do projeto civil da própria universidade. A Figura 15 apresenta a simulação 3D no PVsyst bem como o local e a divisão de placas que foram escolhidas pelo grupo de pesquisadores participantes do projeto da instalação do sistema fotovoltaico na universidade.

Figura 15 — Simulação 3D no PVsyst



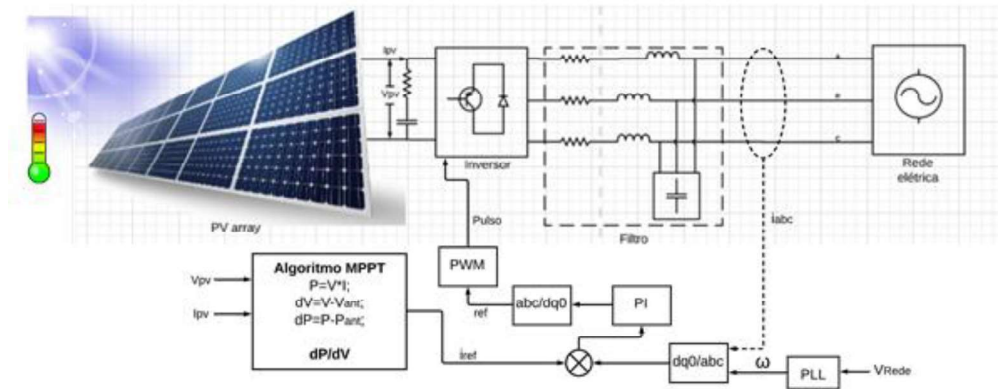
Fonte: O autor (2021).

Assim após a simulação foi possível obter a simulação da eficiência do sistema fotovoltaico calculado pelo próprio PVsyst e o quanto de energia o sistema pode produzir baseados na irradiação solar local e as perdas que haveriam em um sistema real instalado.

4.3.2 Software Matlab

O software MATLAB foi utilizado principalmente para antecipar os possíveis problemas que o sistema fotovoltaico poderia gerar na rede elétrica. O modelo simulado pode ser representado na Figura 16.

Figura 16 — Representação da simulação



Fonte: Adaptado de SCHONARDIE (2011).

A figura demonstra o sistema fotovoltaico e seu método de controle ligados a rede elétrica, utilizando a corrente trifásica da rede como referência para o chaveamento do inversor baseado na transformada dq0. Como o sistema é simulado no MATLAB/Simulink, ele possui os blocos pré-montados capazes de transformar as medições em sinais sem a necessidade de modelar todo sistema.

Baseado no modelo do SCHONARDIE (2011), o sistema de controle utilizado na simulação apresenta a captação dos dados medidos da corrente trifásica após o filtro do inversor, passando para a transformada dq0. Para que o bloco funcione, é necessário a posição angular (ω) para a conversão, o qual é fornecido pelo bloco incluso na biblioteca do Simulink, o PLL (Phase Locked Loop), um outro bloco de controle capaz de gerar sinal de saída, a posição angular e a frequência.

O sinal CC obtido através do bloco dq0/abc, conforme pode ser visualizado na Figura 16, é subtraído da corrente de referência alcançada através do algoritmo de MPPT baseado no modelo de Irmak e Güler (2019) e o erro passa pelo bloco PI (controlador proporcional integral) do MATLAB, onde é configurado com as constantes proporcional e integral para um erro mínimo entre a corrente gerada e a corrente na saída do inversor.

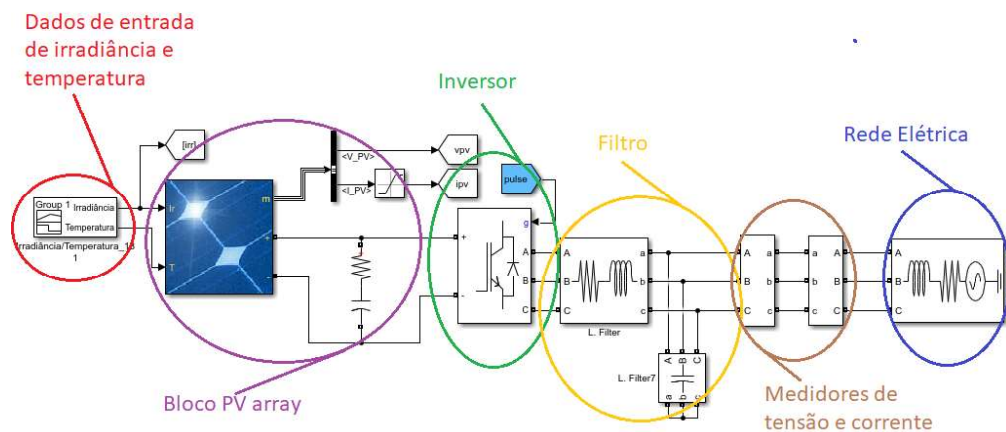
Para o chaveamento do inversor é utilizado o bloco PWM que produz pulsos para conversores de modulação por largura de pulso através de um sinal de entrada trifásico. Logo quando o sinal de referência é maior, o pulso para o dispositivo de comutação superior é alto (1) e o pulso para o dispositivo inferior é baixo (0) e assim por diante. Portanto após o sinal CC passar pelo bloco PI é necessário à sua transformação de volta para o sistema trifásico. Deste modo utiliza-se o bloco abc/dq0

para que o sinal de entrada no bloco PWM seja trifásico e chaveie o inversor para a produção de uma corrente trifásica no ponto máximo de potência.

4.3.2.1 Sistema simulado

O sistema simulado na plataforma do MATLAB/Simulink é composto por cada um dos seis inversores, seus módulos e filtros. A Figura 17 traz a simulação no dia 13 de julho de 2019 com apenas um inversor ligado à rede, e demonstra os blocos de entradas de dados de temperatura e irradiação diária, bloco PV array que representa o conjunto de painéis fotovoltaicos, o inversor, o filtro e rede elétrica da concessionária.

Figura 17 — Simulação MATLAB/Simulink



Fonte: O autor (2020).

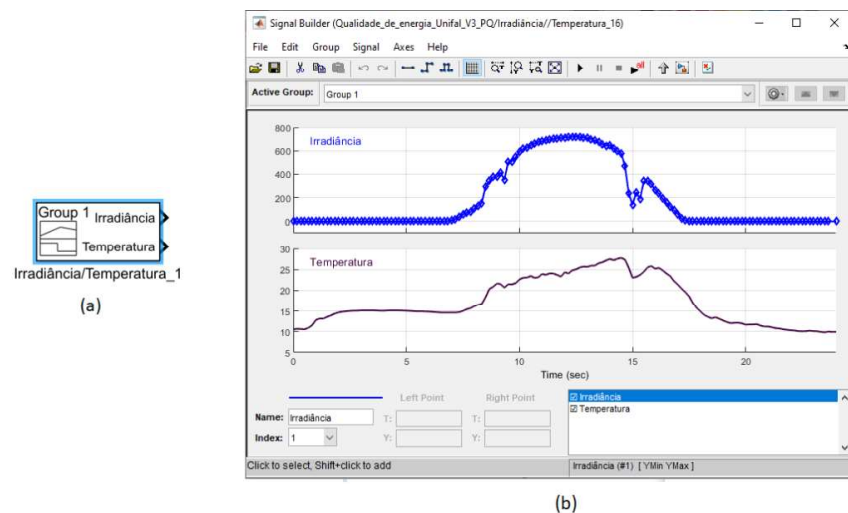
Para criação da modelagem foram utilizados os dados de temperatura e irradiação coletados pela estação solarimétrica entre o dia 13 e 19 de julho de 2020, com intervalo de dez minutos. Para melhor entendimento de cada bloco desenvolvido e utilizado, segue abaixo a descrição técnica detalhada para viabilizar a simulação, modelagem e futura análise do sistema.

A. Bloco de dados de entrada

O software MATLAB é composto por blocos, cada qual, com sua função específica. Deste modo, no bloco Signal Builder criou-se a partir dos dados coletados pela estação solarimétrica, uma curva diária de irradiação e temperatura, e foi simulado os dados de entrada para a geração de energia, foi necessário um bloco para cada dia de simulação.

Para a modelagem e simulação do sistema no software foram replicados os dados diários conjuntamente com os dados de irradiação e temperatura - coletados pela solarimétrica, criando-se assim sete simulações, para uma análise precisa quanto aos impactos causados na qualidade de energia, conforme pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 — Configuração de irradiação e temperatura no MATLAB/Simulink



Fonte: O autor (2021).

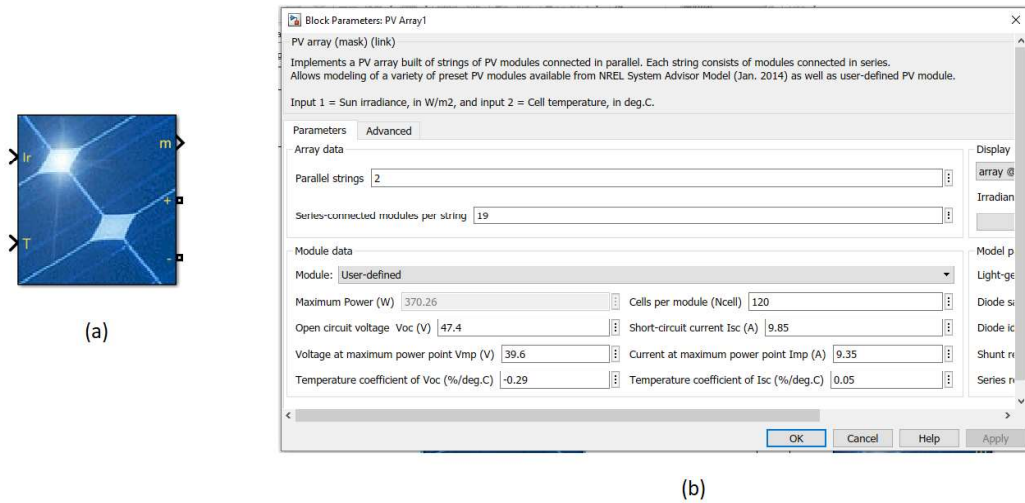
Legenda: a) Bloco Signal Builder

b) Curva diária de irradiação e temperatura

B. Simulação módulo fotovoltaico

O MATLAB possui um bloco que representa um conjunto inteiro de painéis fotovoltaicos chamado PV Array, conforme pode ser visualizado na Figura 19 (a) e sua tela de configuração Figura 19 (b).

Figura 19 — Configuração do painel fotovoltaico no MATLAB/Simulink



Fonte: O autor (2020).

Legenda: a) Bloco PV array

b) Tela de configuração do bloco

O PV array foi configurado conforme os módulos fotovoltaicos do sistema instalado, demonstrado na Tabela 12. Considerando que nem todos estavam previamente disponíveis no banco de dados do software, foi necessário inserir os dados técnicos retirados do manual de cada painel.

Tabela 12 — Dados técnicos dos módulos

Potência do Painel (W)	Voc (V)	Vmp (v)	Coefficiente de temp. Voc (%/deg.C)	Quantidade de células por módulo	Isc (A)	Imp (A)	Coefficiente de temp. Isc (%/deg.C)
370	47,4	39,6	-0,29	120	9,85	9,35	0,05
355	46,8	39,4	-0,29	144	9,59	9,02	0,05
295	39,1	32,5	-0,29	120	9,57	9,08	0,05
300	39,7	32,5	-0,29	60	9,83	9,24	0,05

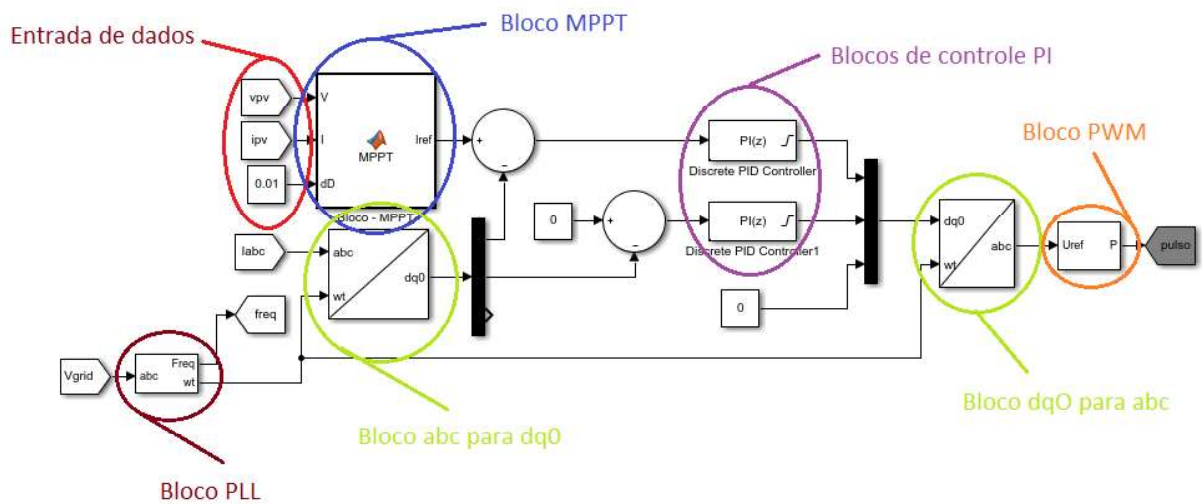
Fonte: O autor (2020).

C. Simulação do controle

Com a variação de irradiação e temperatura e a carga, a tensão e corrente tendem a mudar. Para que o inversor sempre tenha seu ponto máximo de potência (MPP) foi utilizado o método de MPPT - P&O com uma corrente de referência.

Para o chaveamento dos inversores foi utilizado o bloco MPPT e um sistema de controle conforme exposto na Figura 16. O controle simulado é apresentado na Figura 20.

Figura 20 — Bloco MPPT e controle do inversor



Fonte: O autor (2020).

O sinal "pulso" da Figura 20 é conectado ao bloco do inversor na Figura 17.

Para expressar as principais configurações utilizadas na simulação de cada bloco da Figura 20, foram criadas tabelas sobre os blocos específicos do Matlab/Simulink.

Tabela 13 — Parâmetros do controlador PI

Constante	Inversor 15kW	Inversor 5kW
Proporcional	0,01	0,05
Integral	1	1

Fonte: O autor (2020).

As constantes proporcional e integral foram encontradas a partir de tentativas e erros, com pequenas mudanças em seus valores até a sua solução mais próxima.

Tabela 14 — BLOCO PWM

Tipo do Gerador	Modo de operação
Trifásico (6 pulsos)	Não sincronizado
Frequência 5 KHz	Fase inicial (em graus) 90°

Fonte: O autor (2020).

O filtro após o inversor teve seus valores calculados baseados nas equações 1 e 2, e seus valores estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 — FILTRO

Componentes	Valores
Capacitor - Cf (Inversor 1 ao 5 - 15kWp)	6,16 mF
Indutor - Lf (Inversor 1 ao 5 - 15kWp)	0,0057 H
Indutor - Lf 6 (Inversor 6 - 5kWp)	0,0171 H
Resistor - RLf (Inversor 1 ao 5 - 15kWp)	0,1426 Ω
Resistor - RLf 6 (Inversor 6 - 5kWp)	0,4279 Ω
Capacitor - Cf 6 (Inversor 6 - 5kWp)	2,79 mF

Fonte: O autor (2020).

Ressalta-se que tanto o período de coletas de dados da solarimétrica quanto o período de medição pelo analisador de energia, foram realizados durante a pandemia no ano de 2020. Fato esse que ocasionou numa atenuação da carga da universidade, fazendo com que a consumo da universidade fosse mínimo, deste modo para a simulação foi utilizado uma carga média mínima de 2671,34 kW de potência ativa e - 1377,92 VAR de potência reativa, baseado na medição do analisador de energia.

A simulação gera gráficos temporais de fator de potência, valor de tensão permanente, frequência, harmônicos totais de tensão, que serão expostos no tópico de resultados e discussões onde haverá uma comparação com os dados coletados em campo pelo analisador de energia.

O programa MATLAB foi utilizado como método de pesquisa do quanto seria o impacto da energia fotovoltaica na qualidade de energia. Para isso, foram realizadas análises diárias para coleta de dados, nas quais os inversores foram ligados gradualmente durante 7 (sete) dias.

No primeiro dia apenas o inversor 1 de 15 kWp, permaneceu ligado, no segundo dia permaneceu o inversor 1 e ligou o inversor 2, também de 15 kWp, e assim consecutivamente. Desta forma, no penúltimo dia de análise foi ligado o inversor 6 de 5 kWp, conforme Tabela 16. O que acarretou em um aumento de máximo potência na rede de 80 kWp pelo período analisado.

Tabela 16 — Ligação de inversores

Dias	Inversor 1 (15 kW)	Inversor 2 (15 kW)	Inversor 3 (15 kW)	Inversor 4 (15 kW)	Inversor 5 (15kW)	Inversor 6 (5 kW)
13/07/2020	X					
14/07/2020	X	X				
15/07/2020	X	X	X			
16/07/2020	X	X	X	X		
17/07/2020	X	X	X	X	X	
18/07/2020	X	X	X	X	X	X
19/07/2020	X	X	X	X	X	X

Fonte: O autor (2020).

4.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

De forma a comprovar e quantificar a eficiência energética foi utilizado o software PVsyst, pois com ele é possível fazer simulação de todos os parâmetros para geração e de perda, inclusive sombreamento devido ao local instalado.

Já para obter resultados a respeito da integração energética e descobrir quanto foi possível economizar com o sistema fotovoltaico, foi utilizado o PIMVP - Opção D, que trata do cálculo de economia energética baseado na energia sem as AEEs, ou seja, considera somente a energia consumida pela universidade.

O período da análise de economia foi de um ano antes da instalação (janeiro a dezembro de 2018) e um ano após a instalação (Abril de 2019 até Março de 2020).

A Tabela 17 apresenta os dados do consumo retirados da fatura de energia da universidade no ano de 2018.

Tabela 17 — Consumo no ano de 2018

Meses	HP	HFP	Total
Janeiro	2.658	21.996	24.654
Fevereiro	4.121	27.502	31.623
Março	2.797	21.720	24.517
Abril	4.372	25.434	29.806
Maio	4.958	25.596	30.554
Junho	4.979	25.920	30.899
Julho	4.578	25.356	29.934
Agosto	3.788	22.973	26.761
Setembro	4.656	26.280	30.936
Outubro	4.710	26.637	31.347
Novembro	4.194	25.011	29.205
Dezembro	4.243	26.224	30.467

Fonte: O autor (2020).

A Tabela 18 demonstra os dados do consumo retirados da fatura de energia da universidade no ano de 2019.

Tabela 18 — Consumo no ano de 2019

Meses	HP	HFP	Total
Abril	4.438	16.603	21.041
Maio	4.305	16.727	21.032
Junho	4.449	16.655	21.104
Julho	4.022	15.046	19.068
Agosto	3.039	12.574	15.613
Setembro	3.663	14.589	18.252
Outubro	3.578	14.475	18.053
Novembro	3.241	14.658	17.899
Dezembro	3.170	16.180	19.350

Fonte: O autor (2020).

A Tabela 19 demonstra os dados do consumo retirados da fatura de energia da universidade no ano de 2020.

Tabela 19 — Consumo no ano de 2020

Meses	HP	HFP	Total
Janeiro	1.473	11.521	12.994
Fevereiro	2.501	14.876	17.377
Março	3.417	14.142	17.559

Fonte: O autor (2020).

4.5 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Para a análise prática sobre o impacto da inserção de energia fotovoltaica foram feitas duas medições, antes e depois da instalação da miniusina, seguindo, para fins de padronização, a regulamentação brasileira (PRODIST - Módulo 8).

Para a obtenção das leituras para a análise da qualidade de energia, segundo a regulamentação brasileira, é exigido uma quantidade de 1008 leituras válidas,

obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, sendo por meio de equipamentos que operem segundo o princípio da amostragem digital (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). Deste modo, foram medidos 7 dias sem geração pela miniusina e 7 dias com a miniusina operando.

Toda a análise pode ser feita por um único instrumento, desde que o instrumento atenda os requisitos básicos de medição (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018), se destacando:

- Protocolos estabelecidos pelas normas vigentes da Internacional Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional - IEC) 61000 série 4 ou normas técnicas brasileiras;
- Método de medição Classe A ou S, conforme vigente da IEC 61000-4-30

Afim de atingir o objetivo pretendido e supracitado, foi utilizado o analisador de energia Fluke 435 série II, conforme pode ser visualizado na Figura 21.

O analisador de energia Fluke 435 série II trata-se de um equipamento adquirido pelo Laboratório Avançado em Pesquisa de Eficiência Energética (LAPEE) para a pesquisa e estudo da rede elétrica, em qualquer situação, sendo utilizado nesse trabalho para a análise da energia considerando a inserção do sistema fotovoltaico na universidade.

Figura 21 — Analisador de energia instalado no painel de entrada



Fonte: O autor (2021).

O analisador fornece um conjunto abrangente de medições como tensões e correntes de fase, harmônicos, oscilações, reduções e aumentos de tensão e corrente, frequência, desequilíbrio, eficiência do inversor de potência, potências,

dentre outros, além de armazenar os dados em memória de longa duração. Deste modo, é possível a verificação do sistema elétrico, dando detalhes específicos para uma análise mais profunda.

O Fluke 435 série II atende a regulamentação do Módulo 8 do PRODIST, conforme Tabela 20, sendo de suma importância para a veracidade da pesquisa sobre a inserção de sistemas fotovoltaicos a rede.

Tabela 20 — Padrões respeitados pelo Fluke 435 Série II

Método de medição usados	IEC61000-4-30 2ª edição classe A
Desempenho de medição	Fluke 435-II IEC61000-4-30 Classe A
Qualidade da energia	EN50160
Oscilação	IEC 61000-4-15
Harmônicas	IEC 61000-4-7
Shipboard (De Bordo) V/A/	HzMIL-STD-1399-300B

Fonte: Adaptado de Corporation.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme o acompanhamento de todo o processo, desde o pré-projeto à instalação total da mini usina, foram realizadas simulações para eficiência energética da planta, através do software PVsyst, que foram e comparadas com a eficiência da geração real, medida através do software Fronius Solar Web. Para a comprovação da economia obtida pela geração da energia foram recolhidos dados de consumo de um ano antes e após a geração, baseados na fatura da universidade.

De forma a solucionar possíveis problemas futuros foi realizada a simulação em MATLAB/Simulink do sistema fotovoltaico conectado à rede com a inserção gradual dos inversores. Desse modo, houve a comparação dos dados simulados e aqueles que foram coletados através do analisador de qualidade de energia.

Para análise da qualidade de energia após a instalação da mini usina foram feitas medições com o analisador de energia anterior e posterior a inserção do sistema fotovoltaico.

5.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

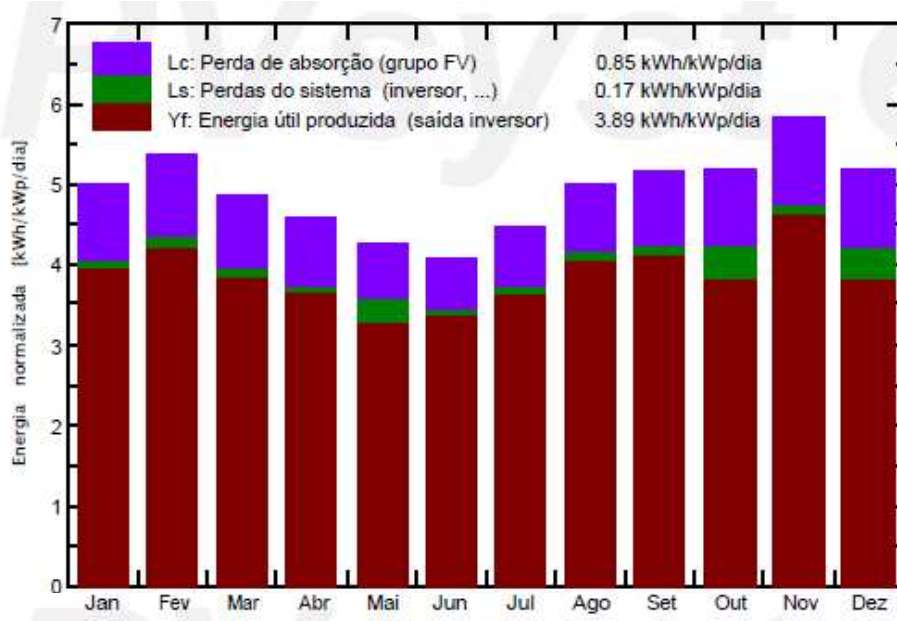
A eficiência do sistema nesse trabalho é baseada na eficiência do sistema em si, que dado pela relação da quantidade de energia gerada vem kWh, versus a potência instalada em kW. Na realidade, este é um indicativo conhecido como rendimento.

Como o método teórico foi baseado na simulação do software PVsyst, utilizou-se os dados dos painéis fotovoltaicos e seus inversores conforme suas marcas e suas características técnicas. Também foram utilizados os dados retirados da estação solarimétrica e ainda, para uma simulação mais precisa em relação a sua geração, foi utilizado os dados de perdas padrão do próprio software e por sombreamento através da simulação em 3D.

No gráfico retirado da simulação do software, pode-se visualizar a quantidade de energia normalizada, ou seja, a energia gerada (kWh) por kWp instalado por dia, durante o período de um ano, além de perdas por absorção e perdas no sistema, conforme Figura 22.

Nota-se que houve uma perda maior na absorção, em meses que tiveram maior irradiação, chegando a uma perda por absorção de 0,85 kWh/kWp/dia. Já outras perdas no sistema como no inversor, cabos, conectores entre outros, os valores são em média de 0,17 kWh/kWp/dia, com uma geração de energia útil de 3,89 kWh/kWp/dia.

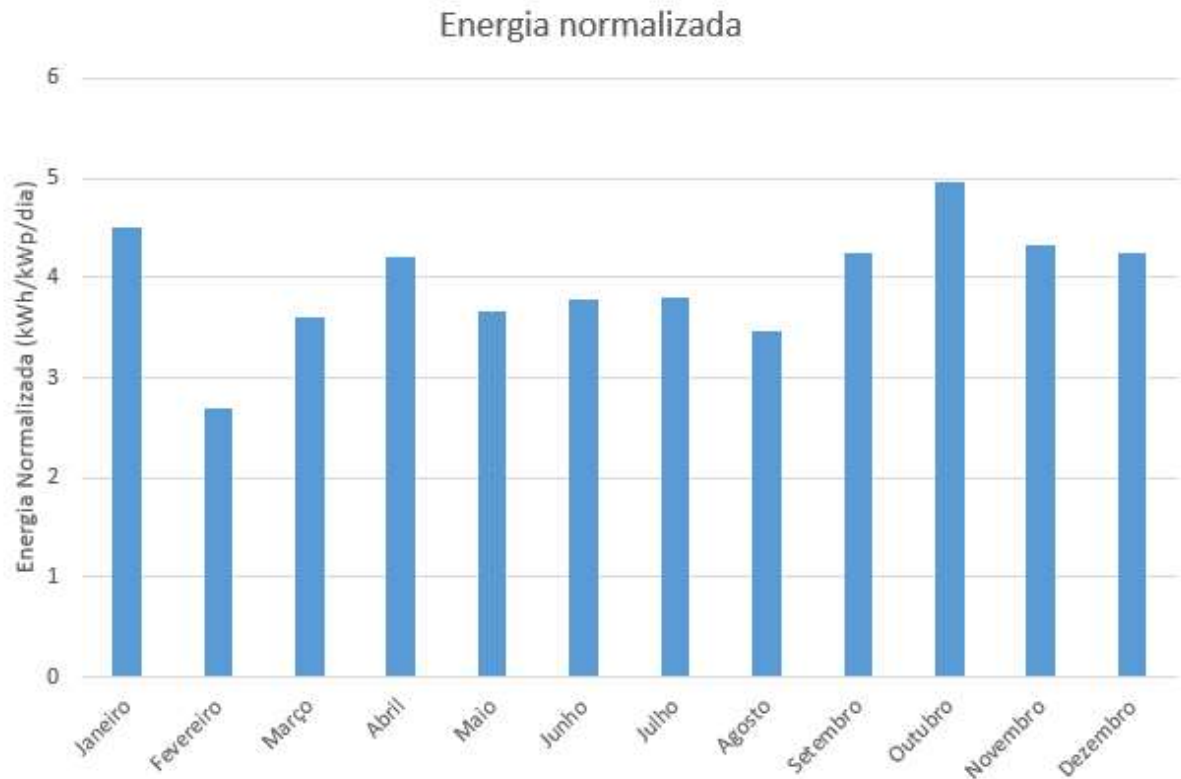
Figura 22 — Energia normalizada simulada



Fonte: O autor (2020).

Para fins de comparação do sistema simulado no software e o real gerado pela mini usina instalada, foram utilizados os dados retirados do software Solar Fronius Web, e gerou-se um gráfico conforme a Figura 23.

Figura 23 — Energia normalizada medida

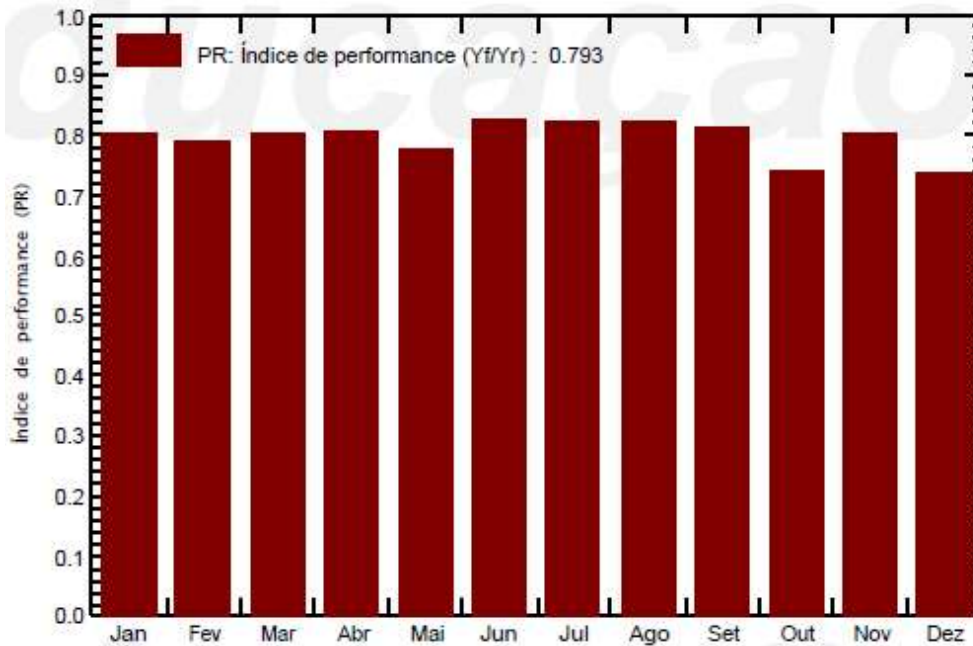


Fonte: O autor (2021).

Ao se comparar as Figuras 22 e 23 pode se notar que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico foi mais eficiente do que o teórico na maioria dos meses. Isto pode ser justificado pelos valores de perda padrão sugerido pelo software serem maiores que de fato são. Considerando que o inversor 5 de 15 KWp instalado no Prédio G, esteve em manutenção durante os meses de Fevereiro e Março que justifica a geração inferior ao teórico simulado.

A Figura 24 apresenta o Performance Ratio - Índice de performance (PR), também conhecido como taxa de desempenho, do sistema simulado durante um ano. O PR é um indicador da qualidade do próprio sistema, independentemente da entrada de irradiação no mesmo. O PR é a energia produzida pela instalação fotovoltaica, ou seja, energia injetada na rede elétrica (Y_f) pela produção de energia considerando que o sistema sempre funcionasse com eficiência nominal (Y_r).

Figura 24 — Índice de performance



Fonte: O autor (2020).

Pode se verificar a eficiência total de 79,3%, e os valores individuais de cada mês de análise durante o ano. O software ainda considera uma indisponibilidade no sistema de 7,3 dias e uma fração de 2% do tempo, simulando possíveis problemas que possam ocorrer durante o ano.

Como a aplicação web Fronius Solar.Web não demonstra tais índices de desempenho, é possível a comparação através do cálculo baseado na sua geração de energia anual conforme Tabela 21.

Tabela 21 — Energia gerada em um ano

Meses	Energia Gerada (kWh)
Janeiro	9340
Fevereiro	6700
Março	8980
Abril	10650
Mai	9280
Junho	9210
Julho	9530

Tabela 21 — Energia gerada em um ano

(conclusão)

Meses	Energia Gerada (kWh)
Agosto	8600
Setembro	8800
Outubro	10240
Novembro	8950
Dezembro	8820
Total	109100

Fonte: O autor (2020).

Para fins de comparação, foi analisado a produção de energia por ano e a produção específica que é a energia produzida dividida pela potência de pico nominal da usina, nas condições STC. Este é um indicador do potencial do sistema que leva em consideração a irradiância, orientação, localização e condições meteorológicas.

A produção total simulada em um ano foi de 117,1 MWh/ano e uma produção específica de 1419 kWh/kWp/ano. Já a energia real gerada por ano foi de 109,1 MWh/ano, e a produção específica calculada baseada na geração foi de 1322,42 kWh/kWp/ano, tendo uma taxa de 6,8% menor do que na simulada.

Ambos os valores foram próximos, porém demonstra que o sistema instalado pode ter perdas menores dos que sugeridos pelo software PVsyst. O que vale relembrar que durante esse período ocorreu um problema técnico no inversor 5 de 15 kWp, sendo que o mesmo permaneceu desligado pelo tempo de conserto.

Como método de quantificar a eficiência energética obteve-se os dados de consumo durante o ano de geração de energia (Abril de 2019 à Março de 2020) e o ano de 2018 sem a instalação fotovoltaica. Os resultados são demonstrados nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 — Consumo mensal dos anos 2018, 2019 e 2020



Fonte: O autor (2020).

Nota-se pela Figura 25 que o consumo do ano de 2018 (azul) é bem maior do que os anos seguintes, 2019 (laranja) e 2020 (cinza), até a presente data. Isto decorre devido a implementação da mini usina fotovoltaica, o qual apresentou-se uma média de 10.947kW por mês de economia.

A Figura 26 apresenta a economia em porcentagem referente a cada mês do ano de 2018 sem geração, em relação ao ano de 2019 e 2020 já com o sistema instalado.

Figura 26 — Porcentagem de economia de kWh/mês



Fonte: O autor (2020).

A Figura 26 apresenta uma economia de até 47% com a instalação da mini usina solar na universidade. Todavia, o valor da fatura mensal não é proporcional a economia em kWh, já que o valor de kWh varia conforme o horário de consumo de energia. O valor em horário de pico (18:00h – 20:59h) é superior podendo este ser triplicado em relação ao horário fora de pico (21:00h – 17:59h). Para uma economia significativa, o consumo deveria ocorrer fora deste horário ou o sistema ser redimensionado para atender 100% da universidade, já que o sistema foi baseado em um projeto de P&D da parceria entre UNIFAL-MG e a concessionária DME de Poços de Caldas. Em vista disso a usina foi acertada em 84,36kWp.

Deste modo, a instalação do sistema fotovoltaico se mostrou de grande importância para a economia da universidade, já que assim haverá menos consumo de energia da concessionária, e a fatura mensal da universidade poderá diminuir quase metade dependendo do horário de maior consumo de energia.

5.2 COMPARAÇÃO DOS DADOS SIMULADOS E DADOS MEDIDOS EM CAMPO

A geração fotovoltaica depende diretamente dos dados climáticos, principalmente da irradiação e temperatura, em vista disto utilizou os dados da

estação solarimétrica para a obtenção desses valores climatológicos no mesmo período de medição. Deste modo, os resultados gerados através da simulação puderam ser comparados com os dados práticos medidos através do analisador de energia.

Para efeito de comparação foram simulados cada um dos 7 dias de comparação da usina operando em partes, e na sua totalidade, com seu respectivo dado climático da estação solarimétrica e a potência instalada do sistema fotovoltaico, conforme apresentado na Tabela 16, da mesma forma como ocorrido na medição. Deste modo, e de forma a demonstrar os resultados obtidos, segue nos subitens 5.2.1 ao 5.2.4 a comparação do primeiro dia, em que apenas um inversor de 15kWp estava conectado à rede e o último dia, em que os 6 inversores estavam conectados. Com isto, foi possível observar a ocorrência de alterações referente a qualidade de energia, seja relacionado a tensão em regime permanente, fator de potência, frequência e harmônicos totais de tensão.

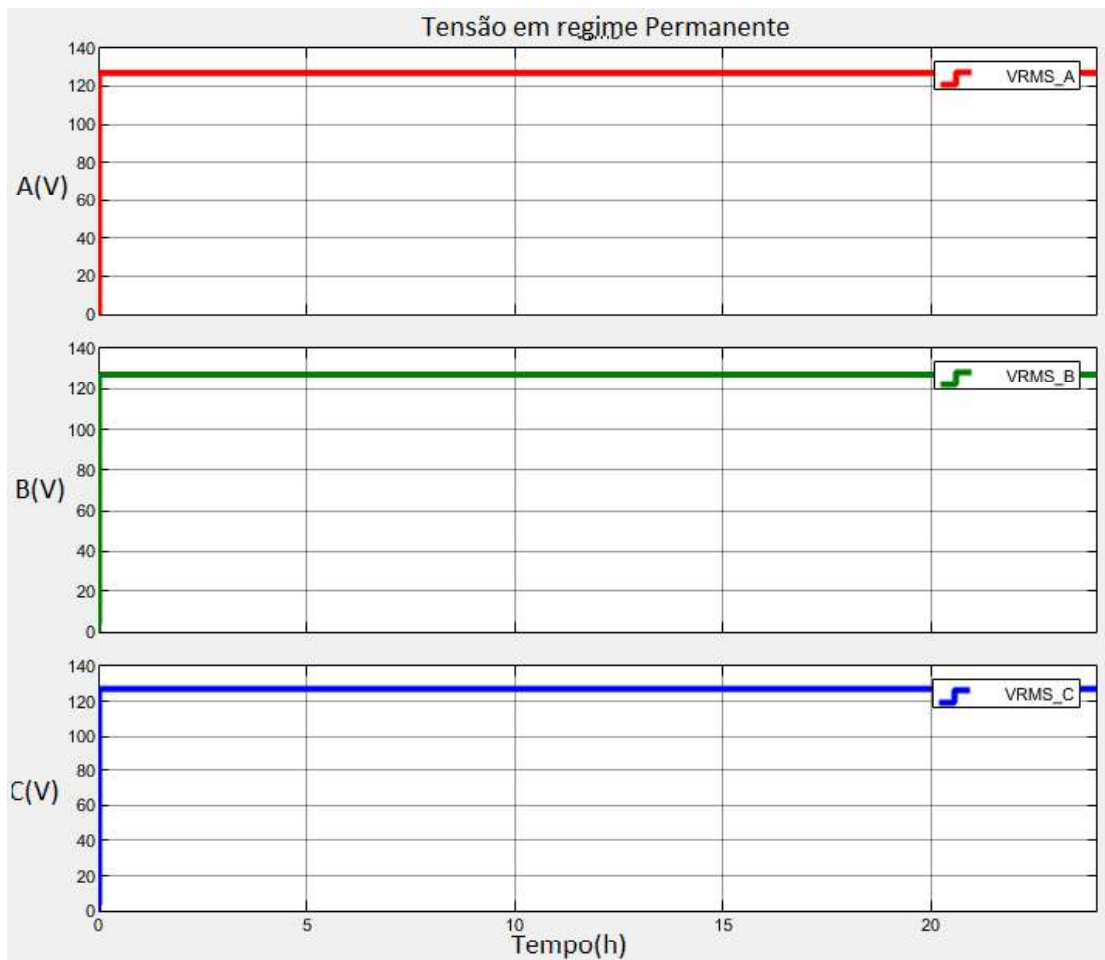
Os dados da estação solarimétrica, expostos no Apêndice A, demonstram o horário de início de irradiação e geração de energia fotovoltaica, o que torna possível comparar os parâmetros elétricos, deixando a simulação o mais próximo possível da realidade.

5.2.1 Comparação - Tensão em regime permanente

Como fator principal da análise de qualidade de energia, os valores de tensão foram simulados no MATLAB e medidos em campo através do analisador.

A tensão em regime permanente de cada fase, simulado no dia 13 de julho (primeiro dia) pode ser verificada conforme Figura 27.

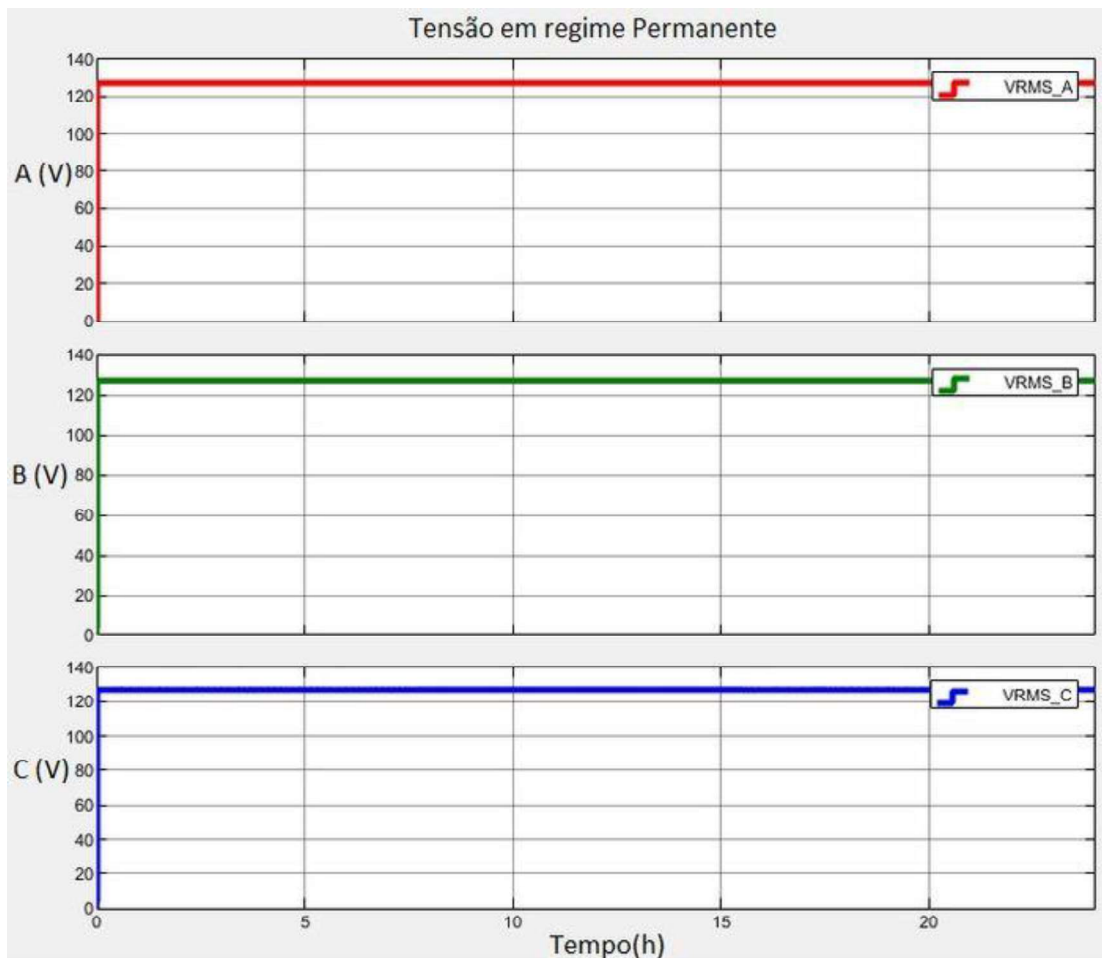
Figura 27 — Tensão em regime permanente simulada no dia 13 julho (primeiro dia)



Fonte: O autor (2021).

A Figura 28 demonstra a tensão em regime permanente no dia 19 de julho (sétimo dia) com a inclusão de todos os inversores.

Figura 28 — Tensão em regime permanente simulada no dia 19 de julho (sétimo dia)

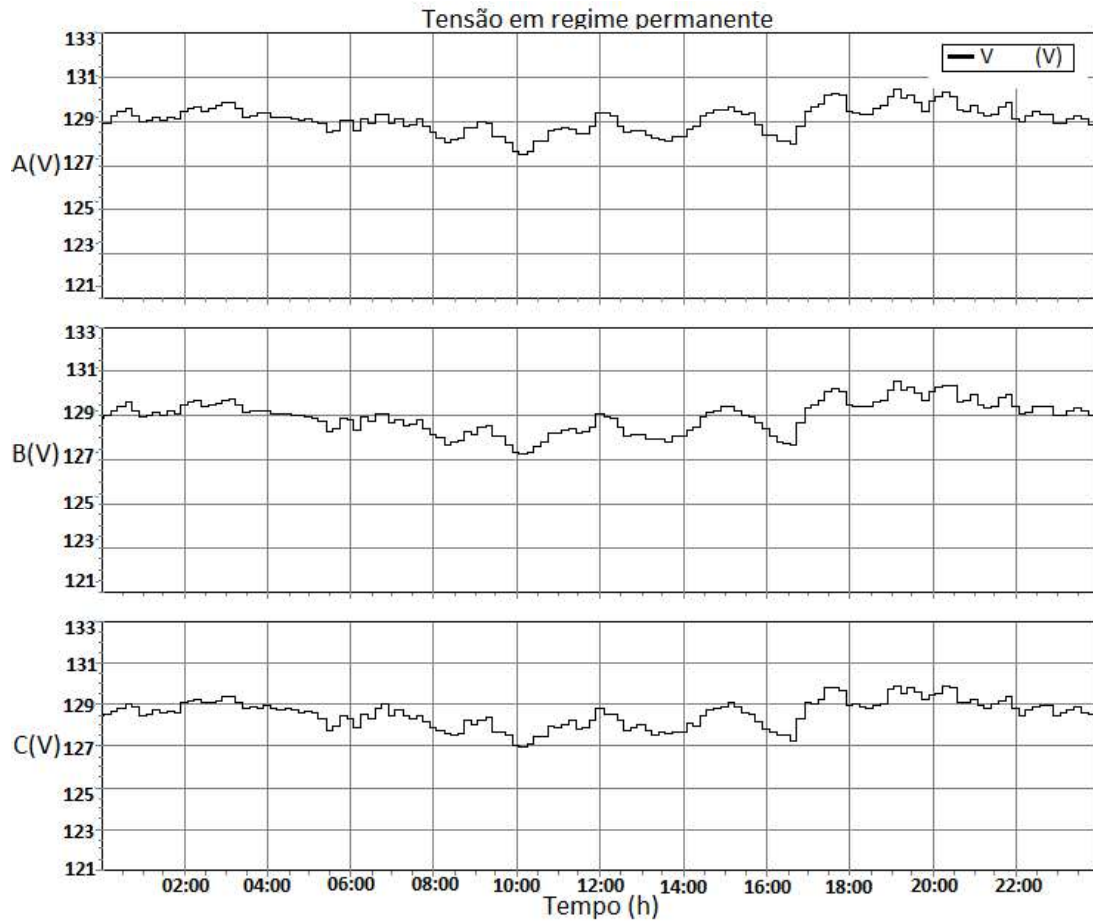


Fonte: O autor (2021).

Através das Figuras 27 e 28, é possível perceber que não houve variação de tensão em seu regime permanente na simulação, demonstrando que a tensão simulada não sofre impacto com a inserção do sistema fotovoltaico.

Para meio de comparação entre a tensão permanente simulada e gerada, as Figura 29 e 30, apresentam as medições realizadas em campo com a utilização do equipamento de análise de energia. Os dados, retirados do próprio equipamento, podem ser visualizados pela tensão de cada fase separadamente.

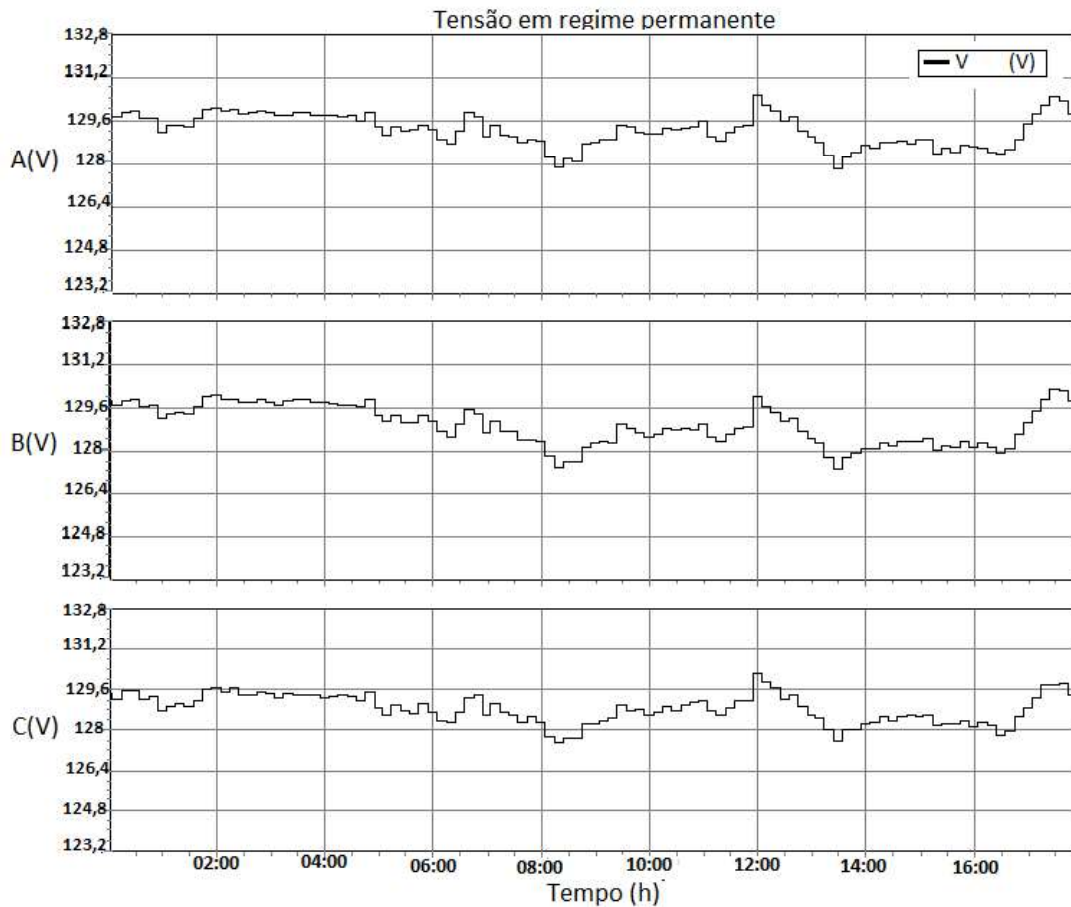
Figura 29 — Tensão em regime permanente medida no dia 13 de julho (primeiro dia)



Fonte: O autor (2020).

A Figura 30 apresenta a tensão em regime permanente no dia 19 de julho (sétimo dia) com a inclusão de todos os inversores.

Figura 30 — Tensão em regime permanente medida no dia 19 de julho (sétimo dia)



Fonte: O autor (2020).

Analisando as Figuras 29 e 30, nota-se que a tensão varia no tempo em valores baixos, o que é comum para sistemas reais. Observa-se que a tensão se mantém variando em todos os horários estando ou não com a geração fotovoltaica, ou seja, antes das 6h e após as 18h. Portanto, demonstrando que a mini usina não teve impacto na tensão permanente medida.

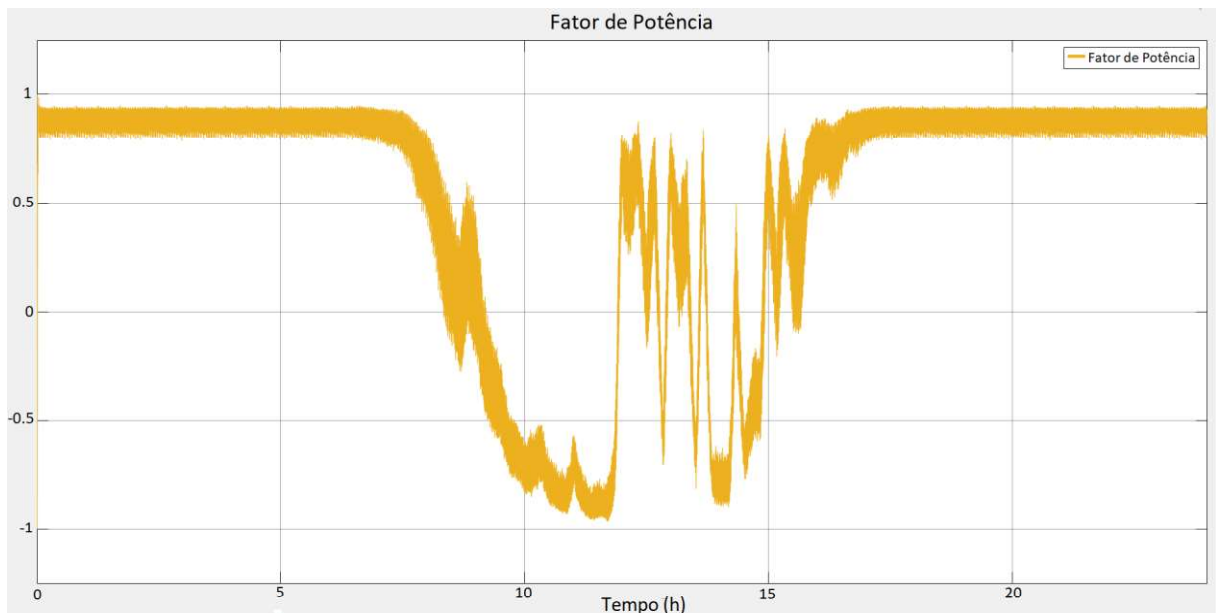
Realizando a comparação dos valores de tensão simulados e medidos, foi possível concluir que a geração de energia fotovoltaica não causa impacto na tensão em regime permanente. Já que tanto a simulação como os valores coletados pelo analisador apresentaram valor significativo entre o primeiro e último dia com uma inserção da geração fotovoltaica na rede elétrica.

5.2.2 Comparação - Fator de potência

Quanto ao fator de potência, os gráficos estão dispostos de forma a comparar os dados simulados bem como as medidas realizadas em campo. A Figura 31 apresenta o fator de potência simulado no dia 13/07, baseado na inserção de apenas um inversor de 15kWp na rede elétrica. A Figura 32 representa o fator de potência simulado referente a inserção de 80kWp na rede, que representa o sétimo dia de coleta de dados, com todos os inversores conectados.

Vale ressaltar que o fator de potência é calculado pela relação da potência ativa e reativa, o que está diretamente ligado a carga que a consome. Por fatores já citados anteriormente a carga simulada foi baseada no consumo médio através do analisador, o que pode não representar o que ocorre na prática.

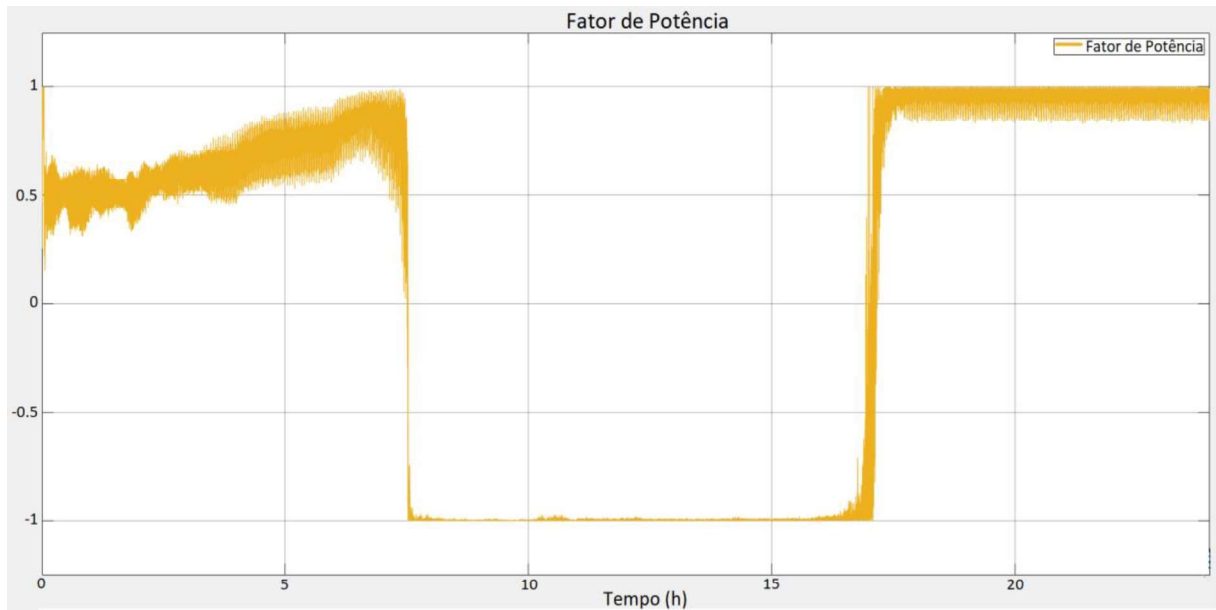
Figura 31 — Fator de potência simulado no dia 13 de julho (primeiro dia)



Fonte: O autor (2021).

A Figura 32 apresenta o fator de potência no dia 19 de julho (sétimo dia) com a inclusão de todos os inversores.

Figura 32 — Fator de potência simulado no dia 19 de julho (sétimo dia)



Fonte: O autor (2021).

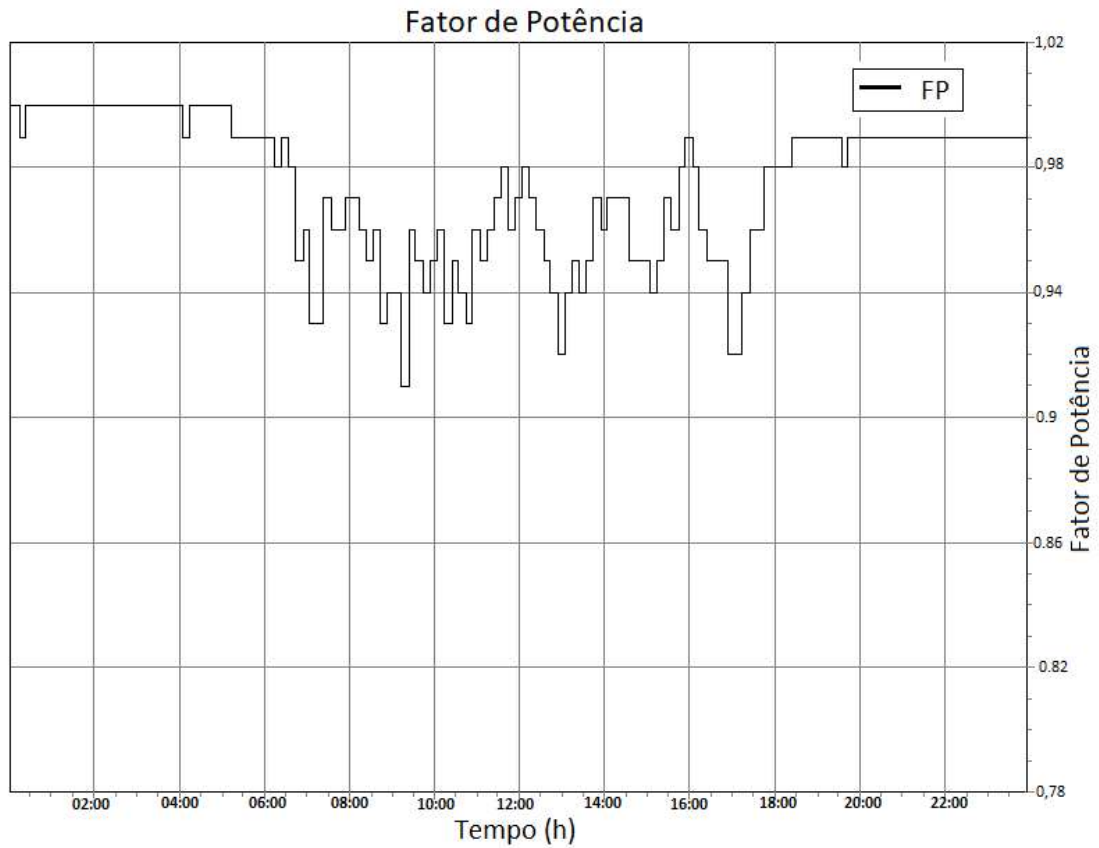
Na simulação do primeiro dia pode-se notar que o fator de potência nos horários sem geração teve um valor próximo a 1, e ao inserir a geração fotovoltaica, a carga começa a consumir de ambas gerações, tanto quanto da concessionária quanto da mini usina, deste modo, o fluxo de potência muda em relação a concessionária e torna o fator de potência indutivo tendendo ao valor de -1.

O fator de potência varia, já que no primeiro dia a potência gerada é menor por ser de apenas um inversor, o que se nota na Figura 32 após as 7 horas, é que o fator de potência fica melhor, ficando próximo de 1 e -1. O que ocorre no dia 19 é que a geração é suficiente para manter a carga simulada, então os valores tendem a ficarem mais definidos. A variação do fator de potência na Figura 32 anterior ao início da geração pode ter ocorrido pela quantidade de inversores conectados na rede e pela simulação que ocorreu uma demora maior para se estabilizarem, sendo umas das falhas que serão desenvolvidas em trabalhos futuros.

Para fins de comparação e verificação da simulação foi medido pelo analisador de energia nos dias 13 e 19 de julho.

A Figura 33 mostra o valor medido em campo de fator de potência no dia 13 de julho (primeiro dia).

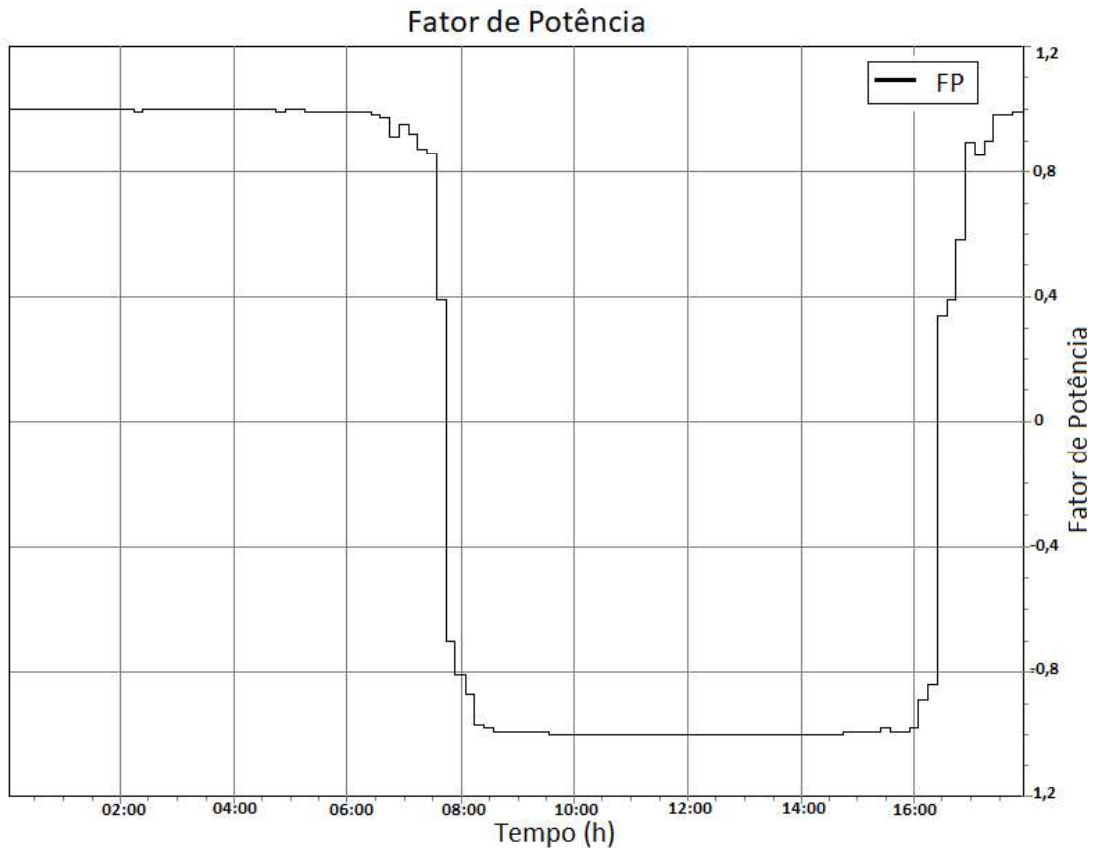
Figura 33 — Fator de potência medida no dia 13 de julho (primeiro dia)



Fonte: O autor (2020).

A Figura 34 mostra o valor medido em campo de fator de potência no dia 19 de julho (segundo dia).

Figura 34 — Fator de potência medida no dia 19 de julho (sétimo dia)



Fonte: O autor (2020).

Os valores do fator de potência variam conforme a entrada de potência ativa na rede através da geração fotovoltaica e a carga que consome esta energia. Os dados simulados não foram exatamente condizentes com a realidade, porém há fatores que justificam essa distinção, já que a simulação é feita com base em um sistema com carga média, baseada na medição do analisador na universidade.

Por se tratar de um sistema real as cargas na universidade não puderam ser mapeadas ou ter o conhecimento dos horários em que entraram em funcionamento durante o dia. Deste modo nota-se uma semelhança entre os dados simulados e gerados no primeiro e segundo dia, porém não exatamente os mesmos valores.

Através dos dados medidos é possível dizer que fator de potência foi melhorado com a inserção do sistema fotovoltaico, principalmente quando a geração é maior do que o consumido, na rede, já que o fator de potência ficou mais próximo dos valores de 1 e -1, dentro dos exigidos por norma.

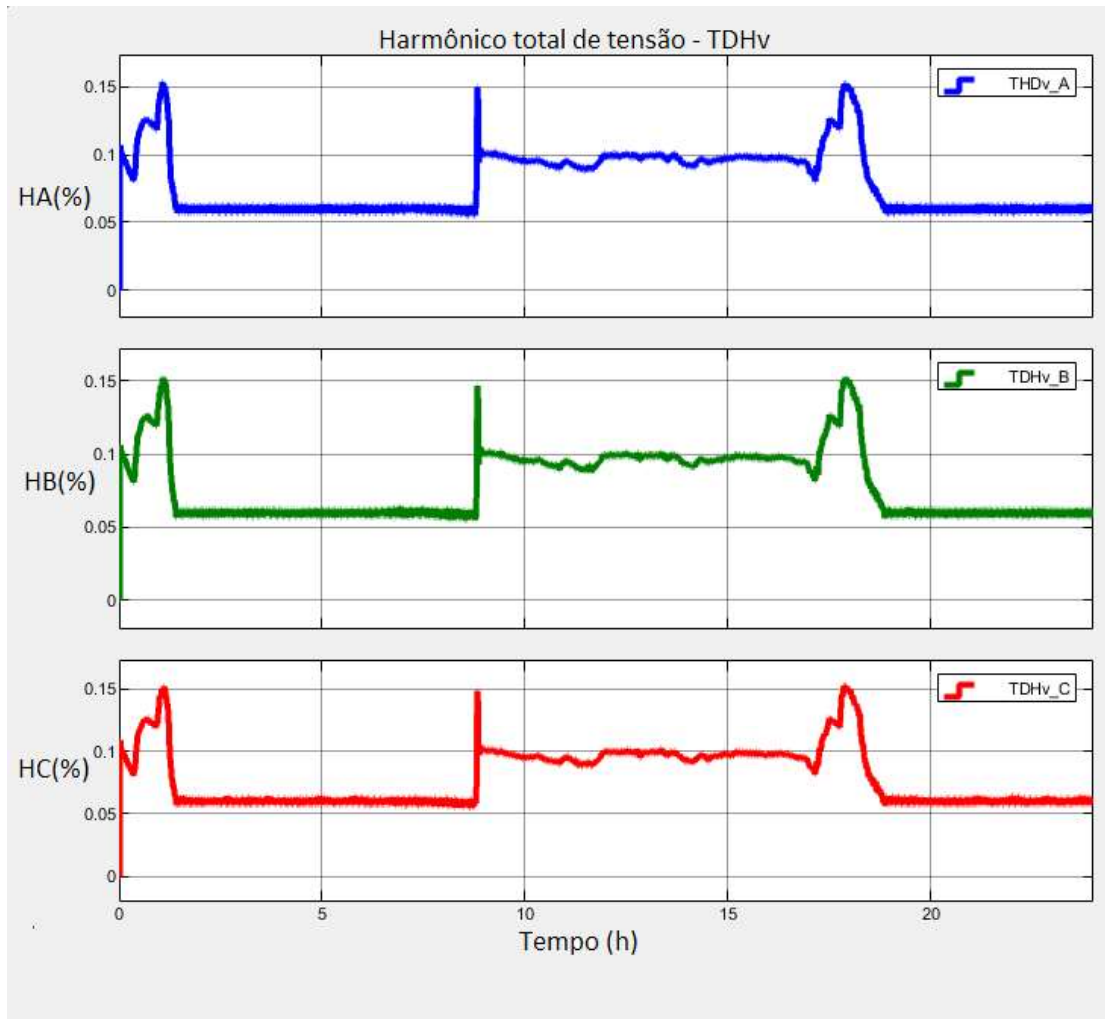
5.2.3 Comparação - Harmônicos de tensão total (THDv)

Os harmônicos são fatores que são gerados por cargas não lineares conectadas na rede elétrica, assim como também podem ser geradas por fontes de geração distribuída, desta forma é difícil saber a origem precisa dos impactos causados pelos harmônicos, devido a inserção dos sistemas fotovoltaicos quando analisados em um sistema real. Conforme citado anteriormente, a carga simulada foi baseada em uma média de consumo durante a medição em campo, não sendo uma carga real, ou seja, não linear, como fontes chaveadas, ou computadores entre outros que são os principais causadores de harmônicos. Porém a simulação torna capaz analisar os harmônicos gerados através da geração fotovoltaica, sendo o objetivo dessa pesquisa.

Deste modo, para fins de verificação dos dados dos componentes harmônicos de tensão total de cada fase simulados e medidos em campo, foram comparados os gráficos do primeiro dia com a inserção de um inversor de 15kWp e do sétimo dia com 6 inversores com um total de 80kWp.

A Figura 35 mostra o valor simulado da medição harmônica (THDv) em cada fase no dia 13 de julho (primeiro dia).

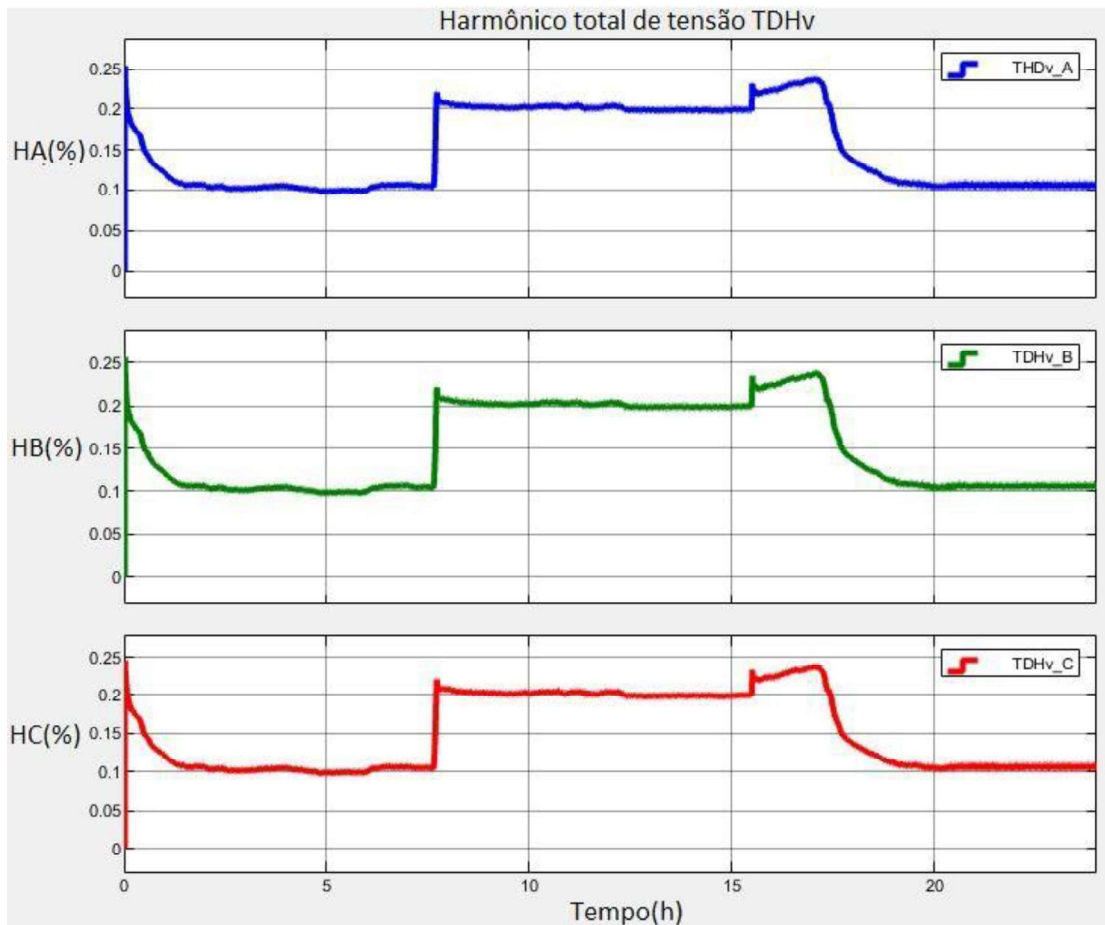
Figura 35 — Valor simulado de THDv no dia 13 de julho (primeiro dia)



Fonte: O autor (2021).

A Figura 36 apresenta o valor da medição harmônica (TDHv) no dia 19 de julho (sétimo dia) com a inclusão de todos os inversores.

Figura 36 — Valor simulado de THDv no dia 19 de julho (sétimo dia)

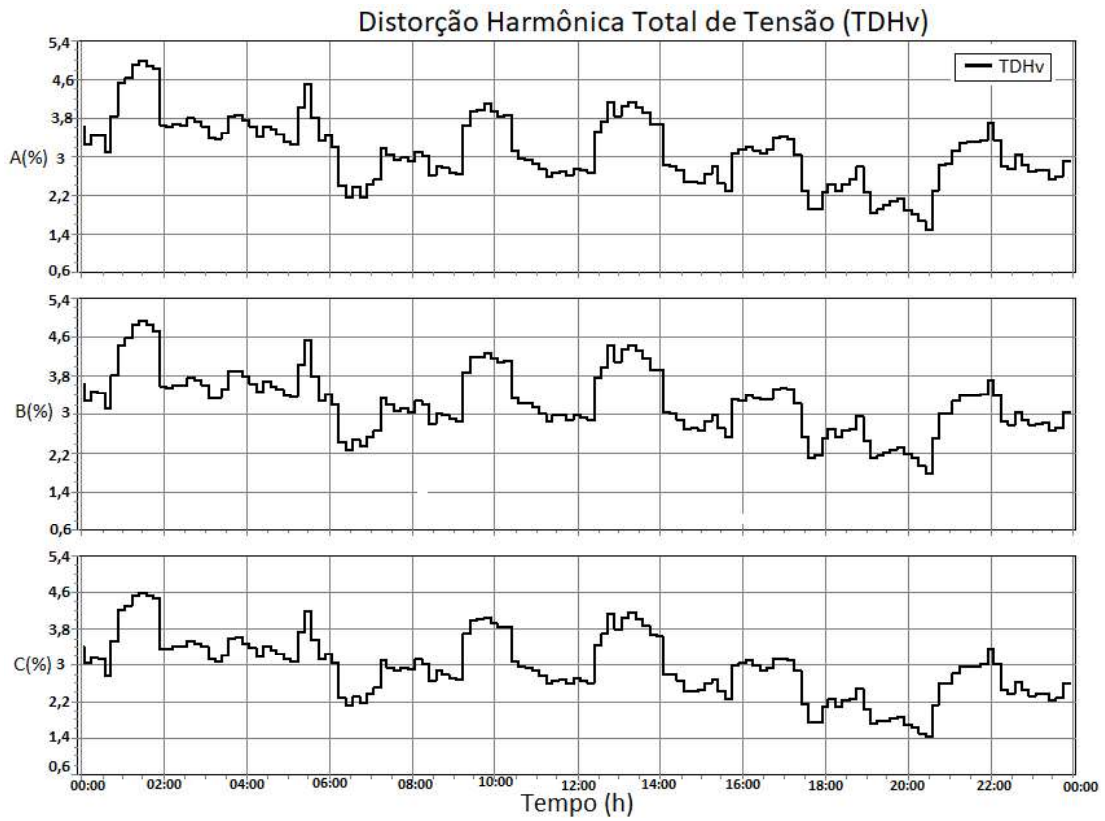


Fonte: O autor (2021).

De acordo com a simulação entre o primeiro e o sétimo dia houve um aumento dos valores de THDv durante o período de geração. A Figura 36 apresenta o acréscimo de até 0,09% em relação a Figura 37, sendo considerado um valor extremamente baixo comparado com o valor de 10% que a norma determina como limite para qualidade de energia.

Em comparação as Figuras 37 e 38 mostram os gráficos referentes aos dados obtidos em campo por fase do THDv pelo analisador de energia.

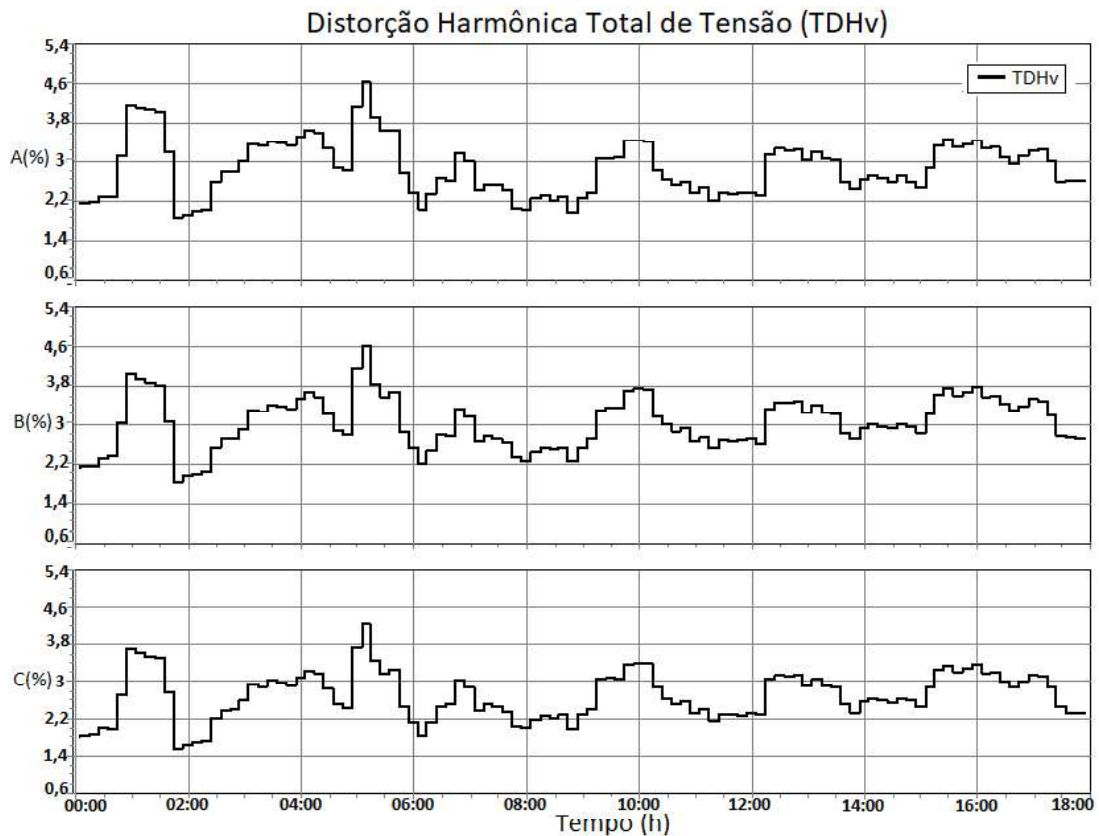
Figura 37 — Harmônicos totais de tensão (TDHv) medido no dia 13 de julho (primeiro dia)



Fonte: O autor (2020).

A Figura 38 apresenta o valor de TDHv no dia 19 de julho (sétimo dia) com a inclusão de todos os inversores.

Figura 38 — Harmônicos totais de tensão (TDHv) medido no dia 19 de julho (sétimo dia)



Fonte: O autor (2020).

A simulação demonstrou que a geração fotovoltaica aumenta o harmônico, porém em valores muito baixos com um pico máximo de 0,25% com todos os inversores da universidade ligados. Quando são comparados com os valores medidos pelo analisador se torna complexo, já que na realidade existem outras cargas na universidade que estão gerando harmônicos além do sistema fotovoltaico.

A carga pode ser ligada e desligada a qualquer momento não havendo meios para comparação já que no sistema não existe uma carga constante sem geração de harmônicos.

Deste modo, por mais que se tenha um aumento de harmônicos referente a inserção de geração fotovoltaico, ele é mínimo, conforme demonstrado na simulação, e uma carga simples na realidade pode sobrepor esse valor gerando harmônicos superiores ao gerado pela inserção do sistema fotovoltaico.

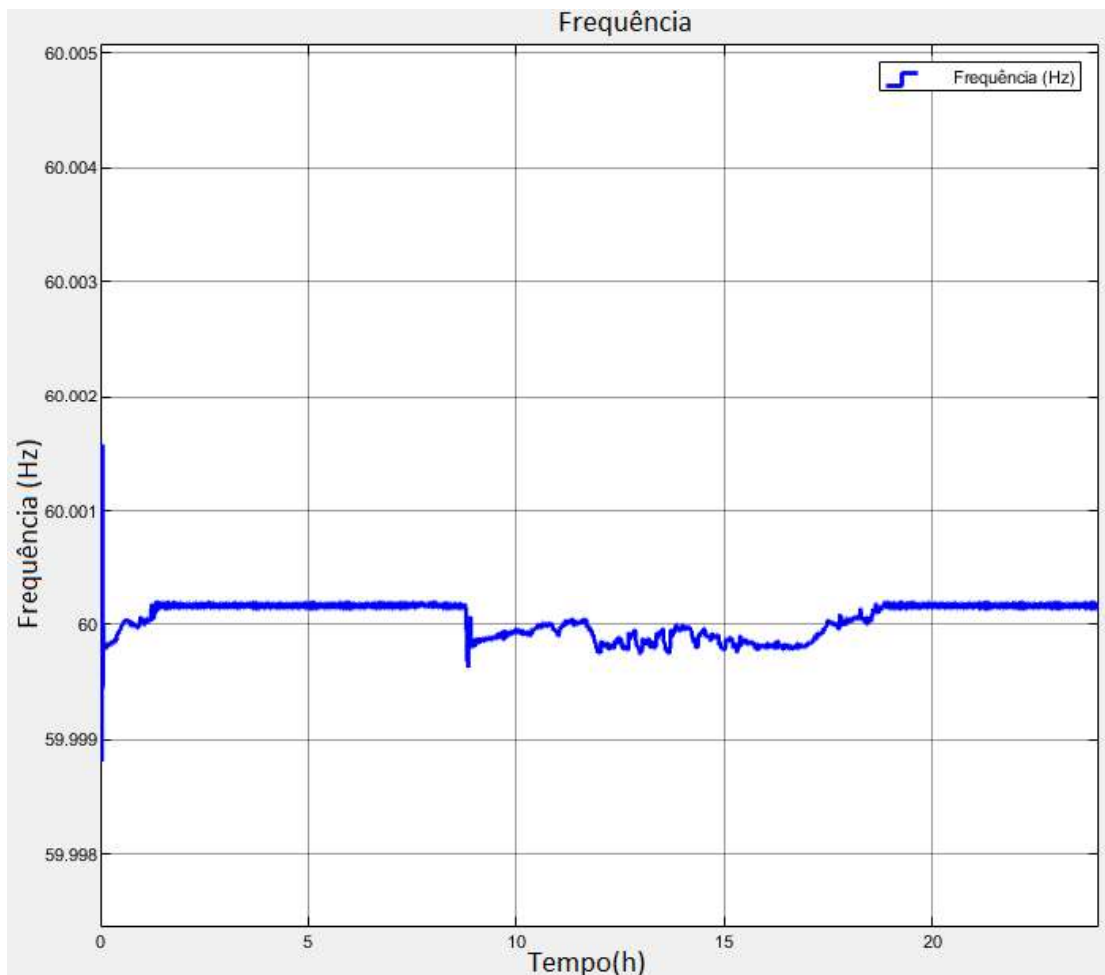
5.2.4 Comparação - Frequência

A análise de frequência na inserção de geração de energia fotovoltaica pode ser um fator de alto risco, já que a regulamentação pré-estabelece valores bem definidos.

Do mesmo modo para analisar os fatores de qualidade de energia, utilizou de simulações e medições em dois dias diferentes, sendo eles no dia 13 de julho com apenas um inversor de 15kWp e no dia 19 de julho com todos os inversores ligados com um total de 80kWp.

A Figura 39 apresenta os valores simulados de frequência no dia 13 de julho (primeiro dia).

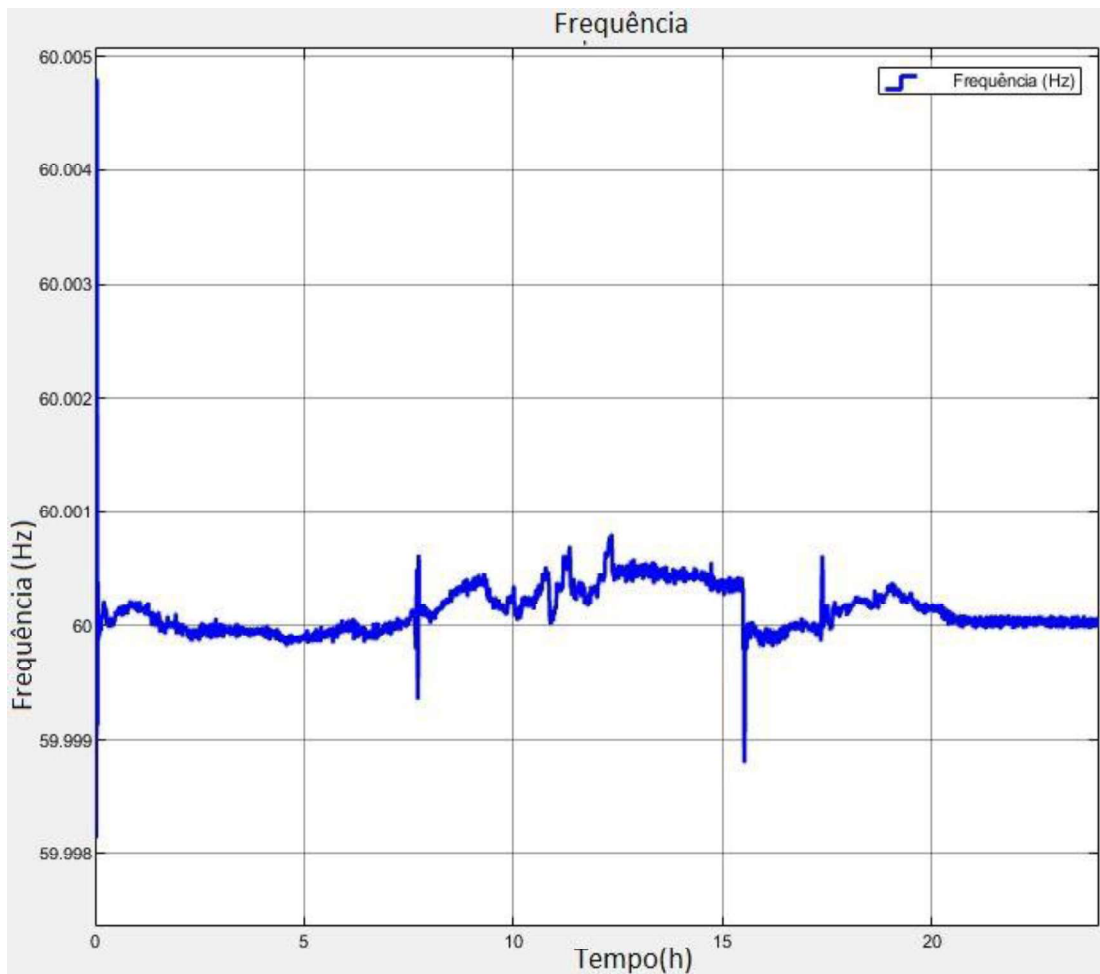
Figura 39 — Frequência da rede simulada no dia 13 de julho (primeiro dia)



Fonte: O autor (2021).

A Figura 40 apresenta a frequência no dia 19 de julho (sétimo dia) com a inclusão de todos os inversores.

Figura 40 — Frequência da rede simulada no dia 19 de julho (sétimo dia)

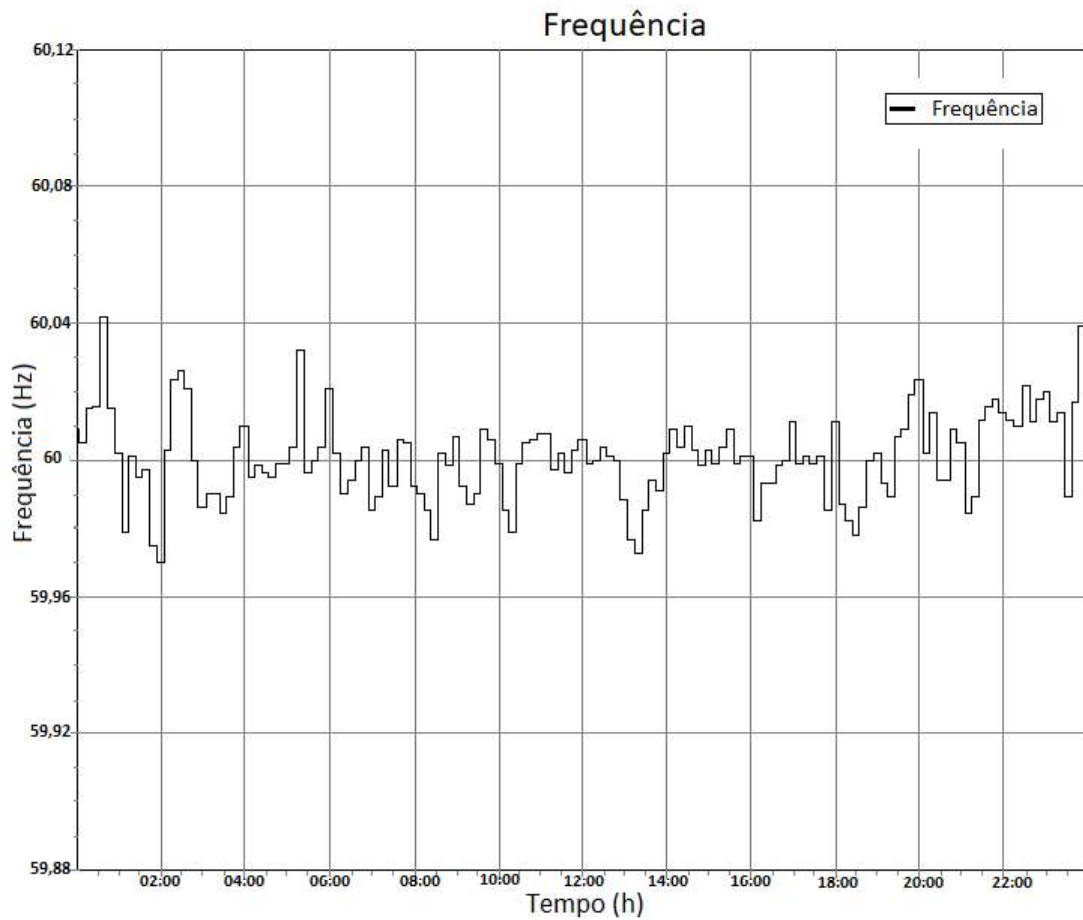


Fonte: O autor (2021).

Os valores de frequência simulados no primeiro e sétimo dia demonstraram uma variação de frequência maior com alguns picos quando houve uma quantidade maior de inversores ligados na rede, porém os valores variam na terceira casa decimal, sendo valores mínimos, e dentro dos limites regulamentados, não ocasionando nenhum problema para equipamentos ligados a essa rede elétrica.

Para comparação a Figura 41 da frequência medida no dia 13 de julho (primeiro dia) pelo analisador.

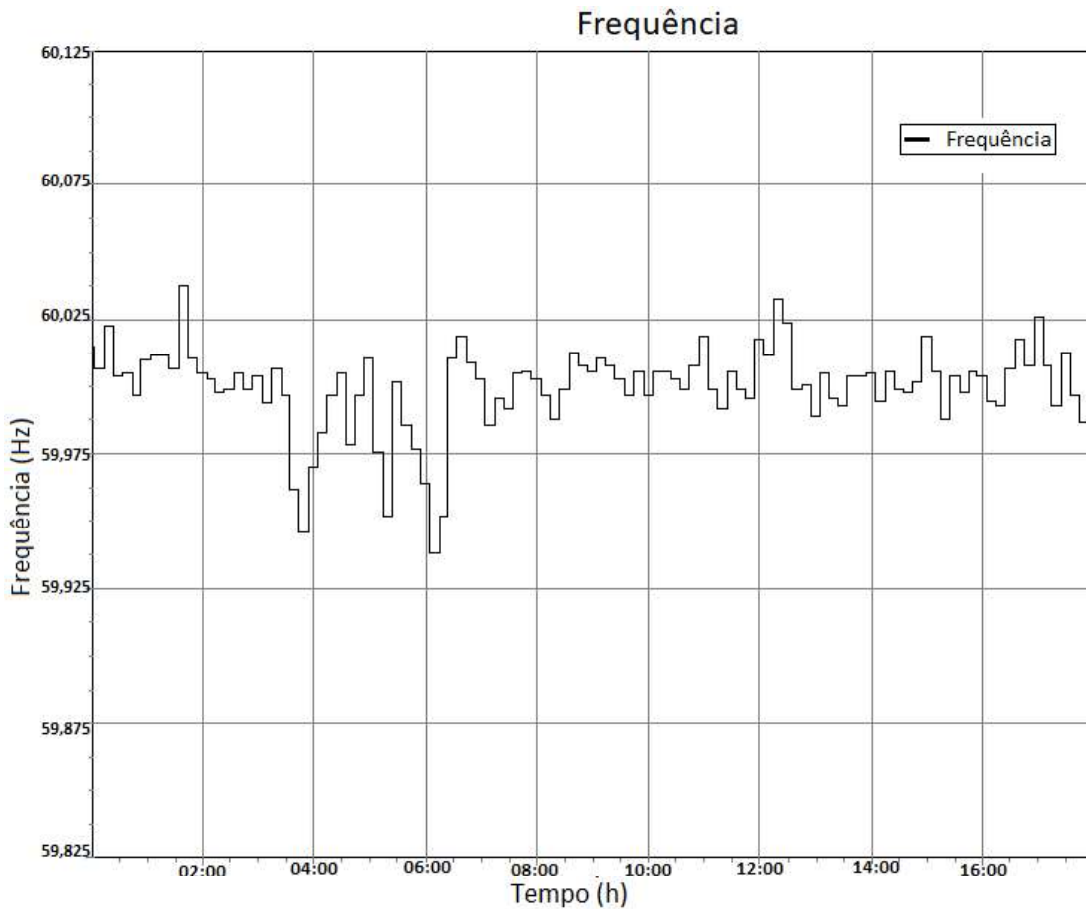
Figura 41 — Frequência da rede medida no dia 13 de julho (primeiro dia)



Fonte: O autor (2020).

A Figura 42 apresenta o valor de frequência medido no dia 19 de julho (sétimo dia) com a inclusão de todos os inversores.

Figura 42 — Frequência da rede medida no dia 19 de julho (sétimo dia)



Fonte: O autor (2020).

Nos valores simulados (Figuras 39 e 40) permanecem com pequenas influências devido a geração fotovoltaica. Os impactos continuam sendo considerados como desprezíveis, já que nos valores medidos (Figuras 41 e 42) a frequência varia de forma maior.

Os valores de frequência simulados e medidos variam com o tempo, porém o valor coletado pelo analisador de energia não demonstrou influência devido a inserção da geração fotovoltaica.

5.3 ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA

A coleta de dados foi realizada do dia 17/06/2020 ao dia 23/06/2020, com os equipamentos do sistema fotovoltaico desligados, estando apenas com a carga da universidade com alimentação da concessionária.

A segunda coleta de dados foi realizada do dia 13/07/2020 ao dia 19/07/2020, com a ligação gradual dos inversores.

Conforme a regulamentação do PRODIST - Módulo 8, cada uma das coletas deve ter 1008 leituras, sendo assim, houve uma análise dos impactos na qualidade de energia antes e depois da inserção da mini usina.

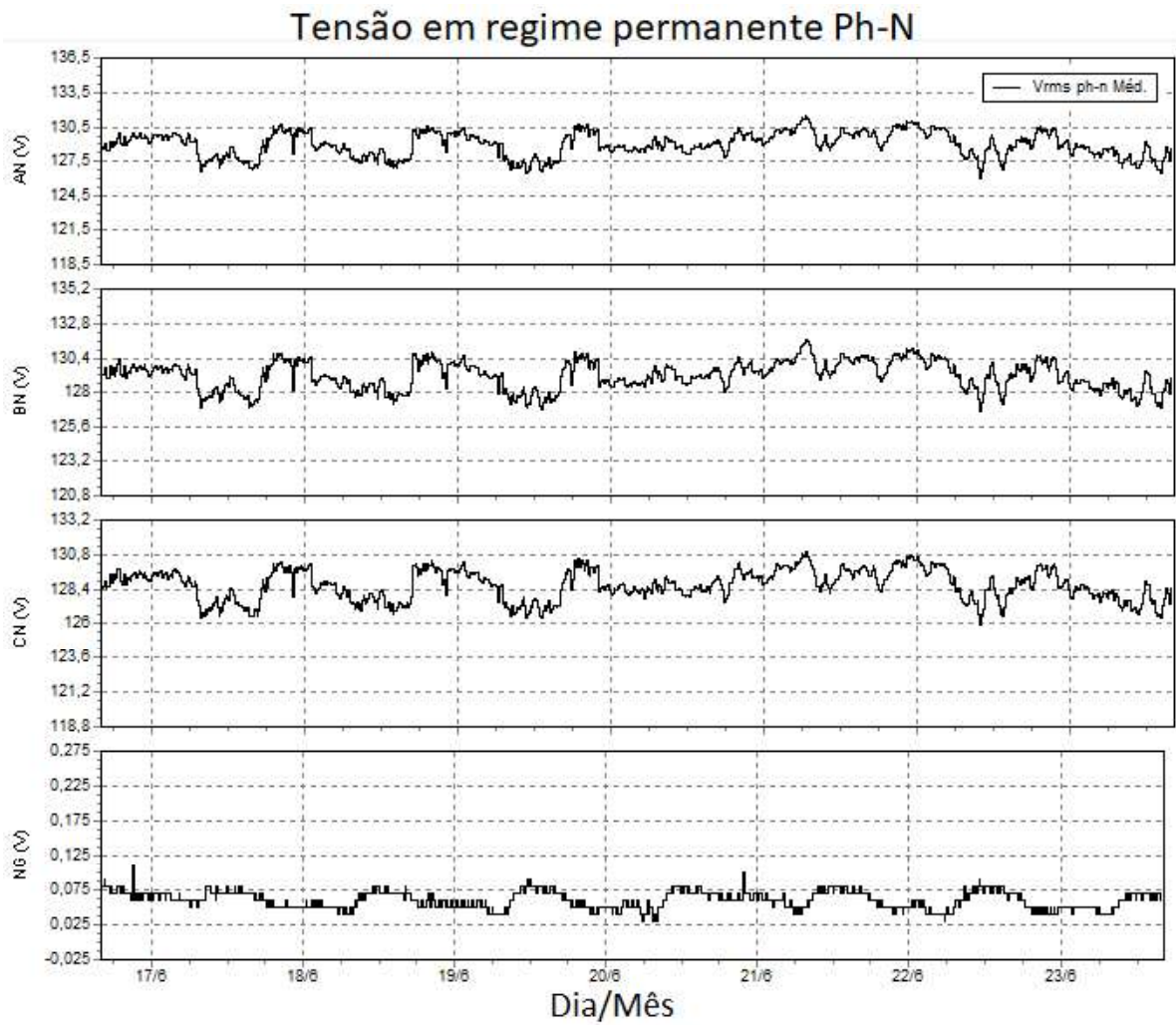
A seguir a análise detalhada de cada categoria.

5.3.1 Tensão em regime permanente

Para a análise em regime permanente, verificou-se inicialmente o gráfico temporal, demonstrados nas Figuras 43 e 44. Cada figura é composta por quatro gráficos, sendo sua referência o neutro, deste modo tem-se a fase AN, BN, CN e a tensão entre neutro e terra NG. A partir dos gráficos é possível notar a variação da tensão durante o tempo em que o analisador estava realizando a coleta de dados.

A Figura 43 refere-se a tensão medida anterior a geração fotovoltaica.

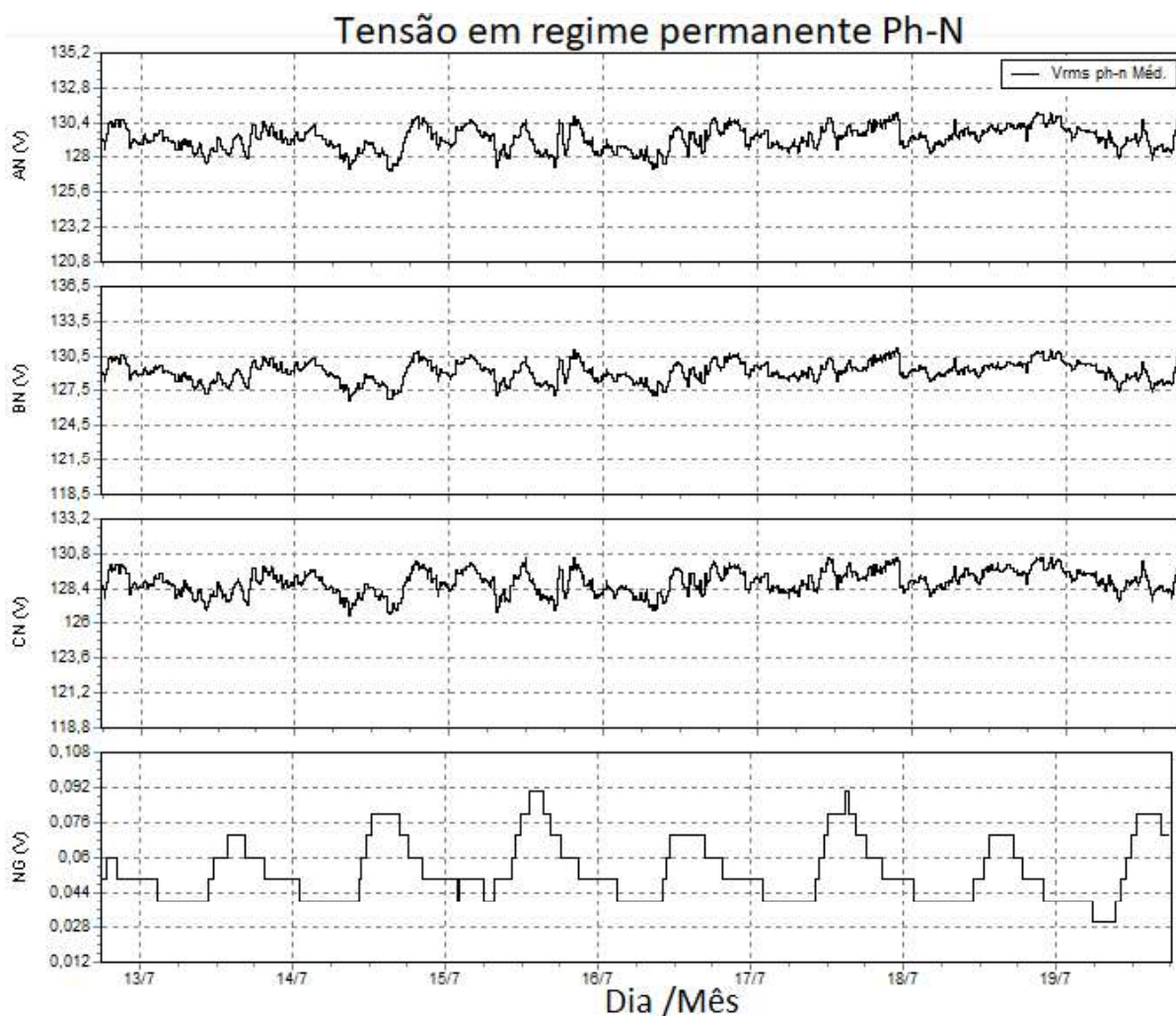
Figura 43 — Valores de tensão temporal sem geração de energia fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

A Figura 44 refere-se a tensão medida após a geração fotovoltaica.

Figura 44 — Valores de tensão temporal com geração de energia fotovoltaica

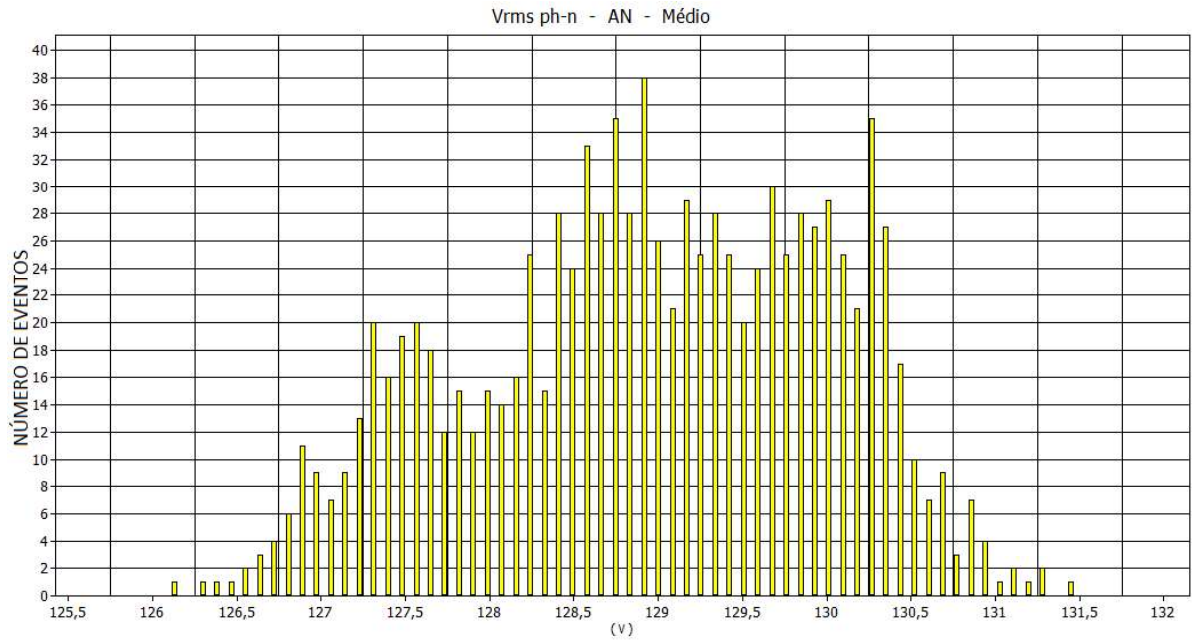


Fonte: O autor (2021).

A tensão varia ao longo do tempo, sendo comum em sistemas reais. Porém o que define sua qualidade é se os valores ultrapassam as faixas delimitadas. Além disso nota-se nas Figuras 43 e 44, que a tensão esteve a todo momento dentro dos parâmetros da faixa adequada, permanecendo entre 117V e 133V, sendo estes os limites estabelecidos pela regulamentação. Não houve nenhum momento em que a tensão esteve entre as faixas precária e crítica.

As Figuras 45 e 46 demonstram o histograma de tensão das fases A e neutro, exemplificando a confirmação do resultado acima obtido. Em cada figura, é possível notar os valores medidos e a quantidade de vezes em que ocorreram.

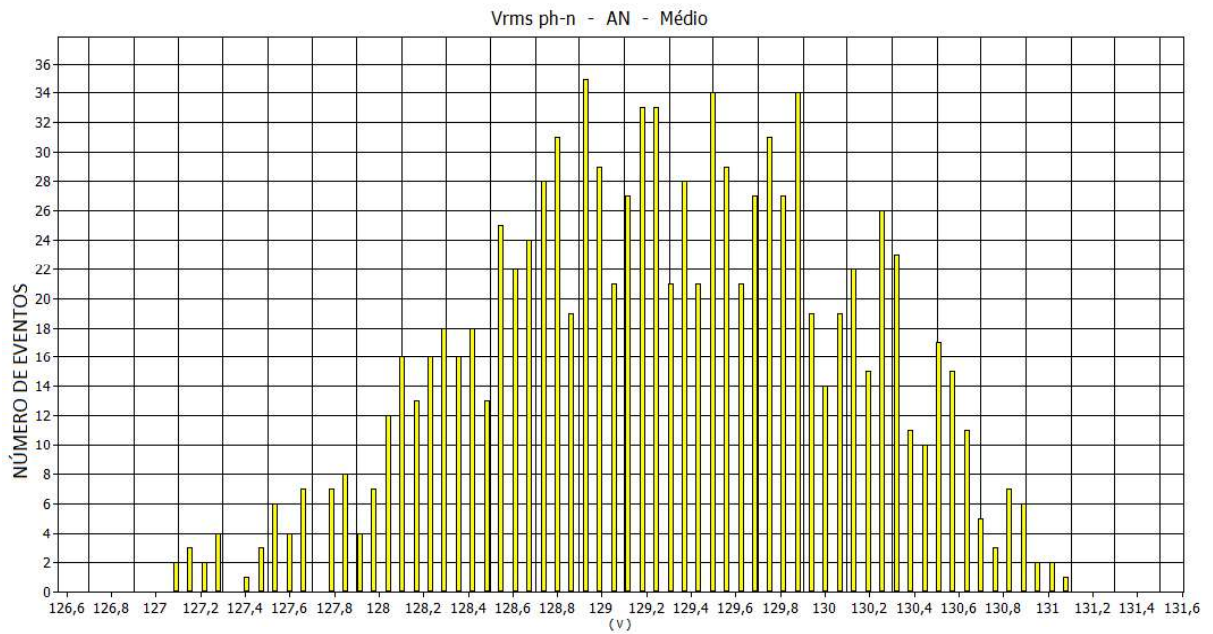
Figura 45 — Histograma da fase AN sem inserção da geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2020).

A Figura 46 refere-se ao histograma após a geração fotovoltaica.

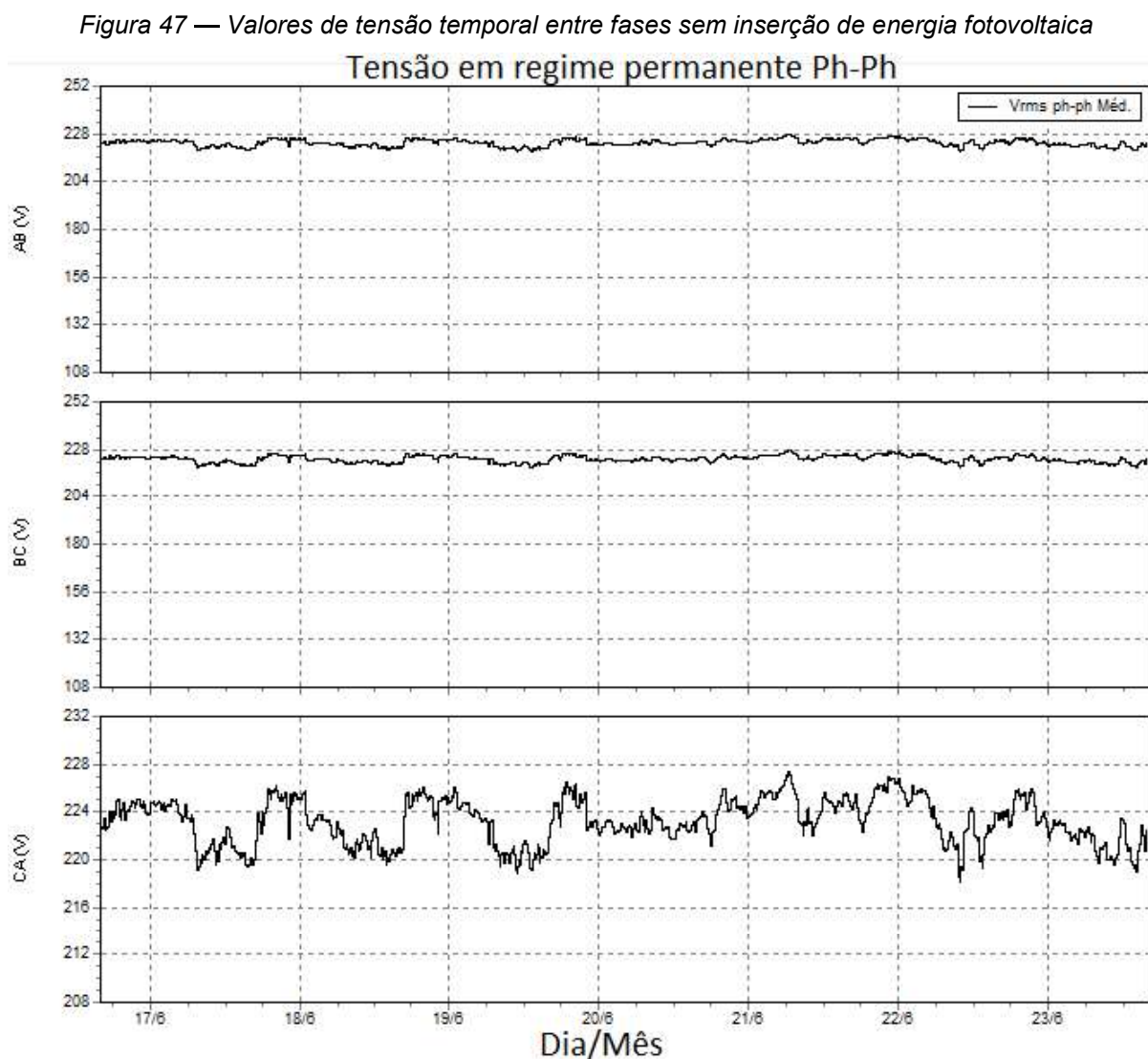
Figura 46 — Histograma da fase AN com inserção da geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2020).

A análise da tensão também foi realizada entre fases seguindo a regulamentação do setor brasileiro, estipulado no PRODIST - Módulo 8. Cada figura é composta por três gráficos, deste modo tem-se a fase A em relação a B (AB), a fase B em relação a C (BC) e a fase C em relação a A (CA).

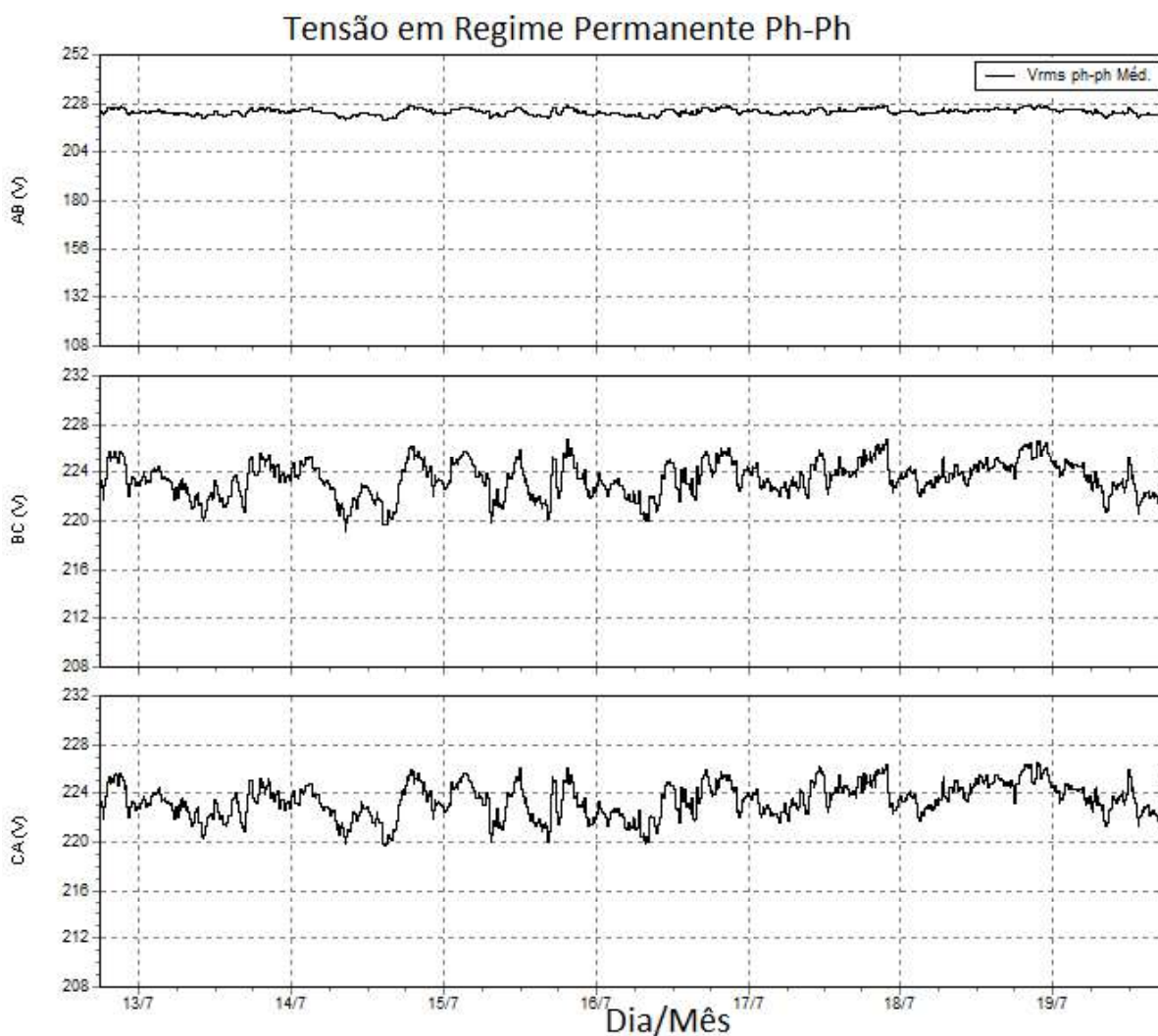
A Figura 47 refere-se a tensão temporal entre fases sem a inserção da geração fotovoltaica.



Fonte: O autor (2021).

A Figura 48 é referente aos valores de tensão temporal entre fases após a geração fotovoltaica.

Figura 48 — Valores de tensão temporal entre fases com inserção de energia fotovoltaica

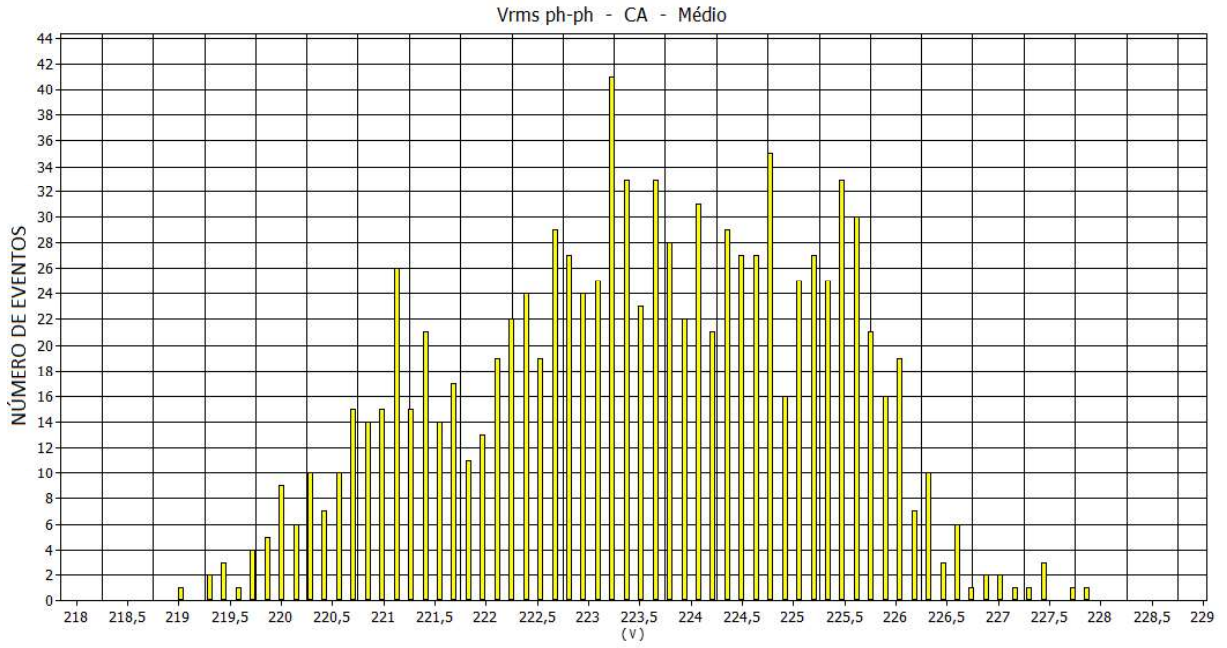


Fonte: O autor (2021).

Os valores de tensão entre fases, foram verificados assim como na análise entre fase e neutro através dos histogramas. De forma a demonstrar o resultado em que se obteve a qualidade de energia inferior, ou seja, as fases CA, foi criado o gráfico de histograma.

A Figura 49 é referente ao histograma de tensão entre as fases C e A anterior a geração fotovoltaica.

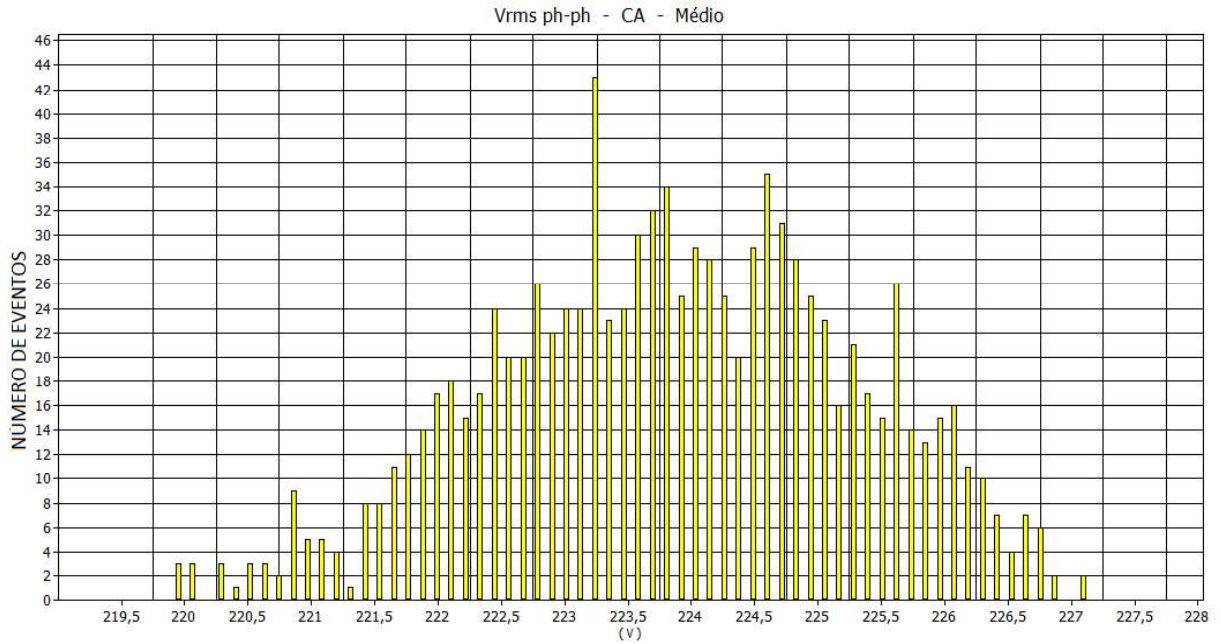
Figura 49 — Histograma da fase CA sem a inserção da geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2020).

A Figura 50 é referente ao histograma de tensão entre as fases C e A após a geração fotovoltaica.

Figura 50 — Histograma da fase CA com a inserção da geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2020).

Observou-se uma variação maior entre fases após a inserção da geração fotovoltaica, porém os valores permaneceram dentro da faixa regulamentada, ou seja, dentro da faixa adequada que tem seus parâmetros definidos entre 202V no mínimo e 231V no máximo.

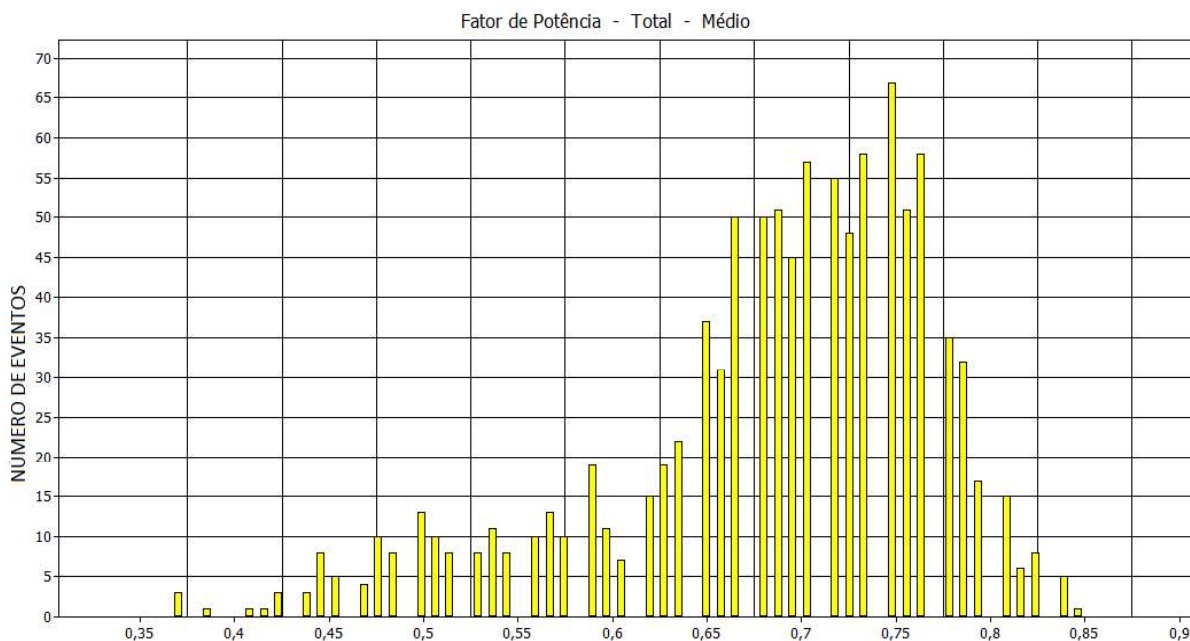
Ademais, não houve nenhum valor de tensão na faixa precária e crítica e o cálculo dos valores de DRP e DRC (Equações 4 e 5) foram considerados como zero, estando dentro dos valores da norma, o que indica uma boa qualidade em relação a tensão em regime permanente.

5.3.2 Fator de Potência

O fator de potência conforme regulamentação deve ficar entre os valores de 0,92 a 1 indutivo ou capacitivo. Para a análise do fator de potência pelo analisador, a comparação entre antes e depois da geração fotovoltaica, foram feitas através dos histogramas, que demonstram os valores medidos e a quantidade de vezes que ocorreu a medição.

A Figura 51 apresenta o fator de potência sem a geração de energia fotovoltaica, onde se pode observar, que os valores variaram entre 0,35 e 0,85, ficando abaixo do que permitido pelo PRODIST - Módulo 8.

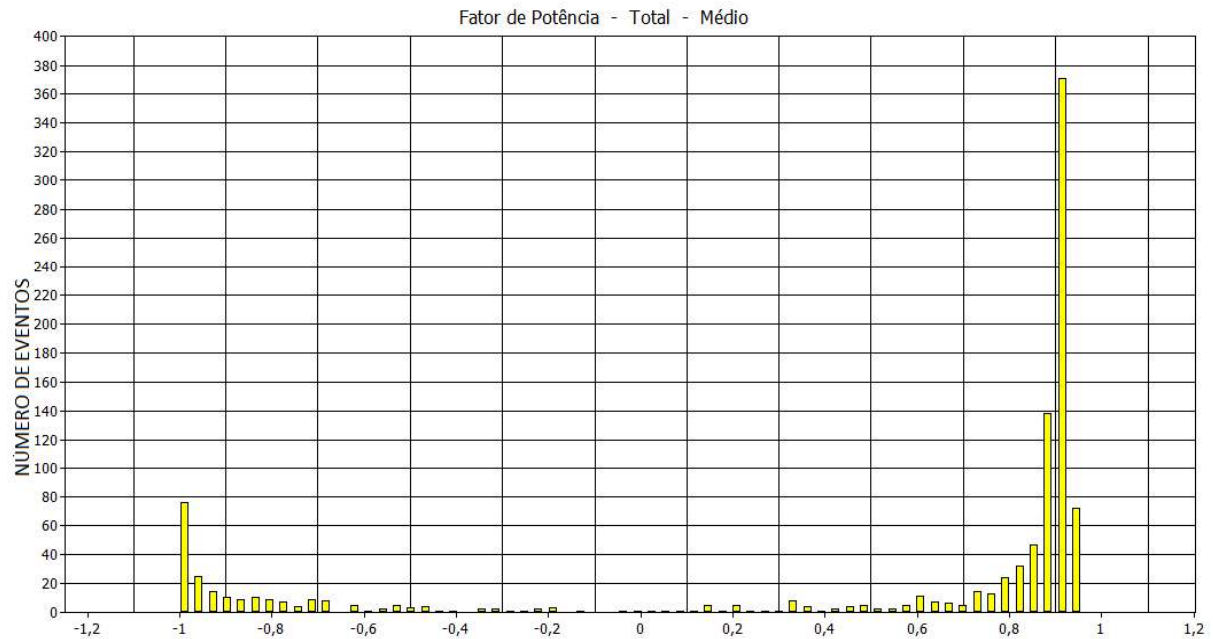
Figura 51 — Histograma do fator de potência sem inserção de geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2020).

Já a Figura 52 apresenta que os valores do fator de potência em sua maioria ficaram próximos a 1, isto deve-se a grande potência ativa injetada pela geração de energia fotovoltaica, o que faz com o que a variação fique dentro dos parâmetros permitidos pela regulamentação.

Figura 52 — Histograma do fator de potência com inserção de geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2020).

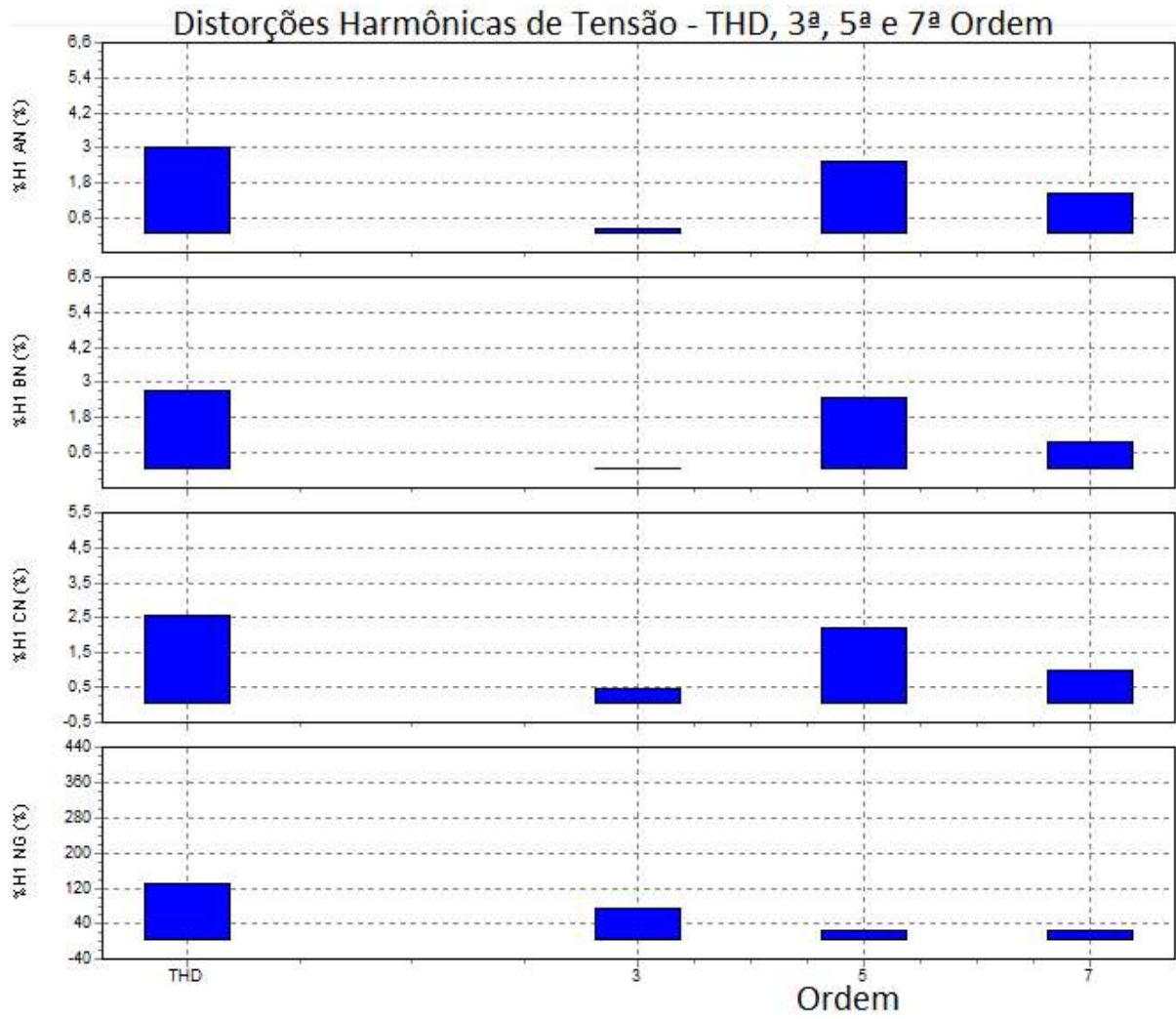
Mesmo que em alguns instantes o fator de potência esteja abaixo do regulamentado, não significa que o sistema tenha uma má qualidade de energia, visto que as cargas não são ideais e variam. Neste sentido nota-se que após a instalação da mini usina de geração de energia fotovoltaica ocorreram pequenos valores abaixo do esperado, contudo o número de vezes que ocorreram são insignificantes. Deste modo é possível afirmar nesse estudo de caso, a implementação da mini usina fotovoltaica foi de grande valia para a universidade, em termos de correção do fator de potência.

5.3.3 Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas, são resultados de equipamentos não-lineares conectados à rede. Foram analisadas as distorções totais de tensão (DTH%) e para os harmônicos individuais, analisou-se as ordens 3^a, 5^a e 7^a, ou seja, aquelas de maior importância, conforme pode ser visualizado nas Figuras 53 e 54.

A Figura 53 apresenta as distorções harmônicas de tensão sem a geração de energia fotovoltaica.

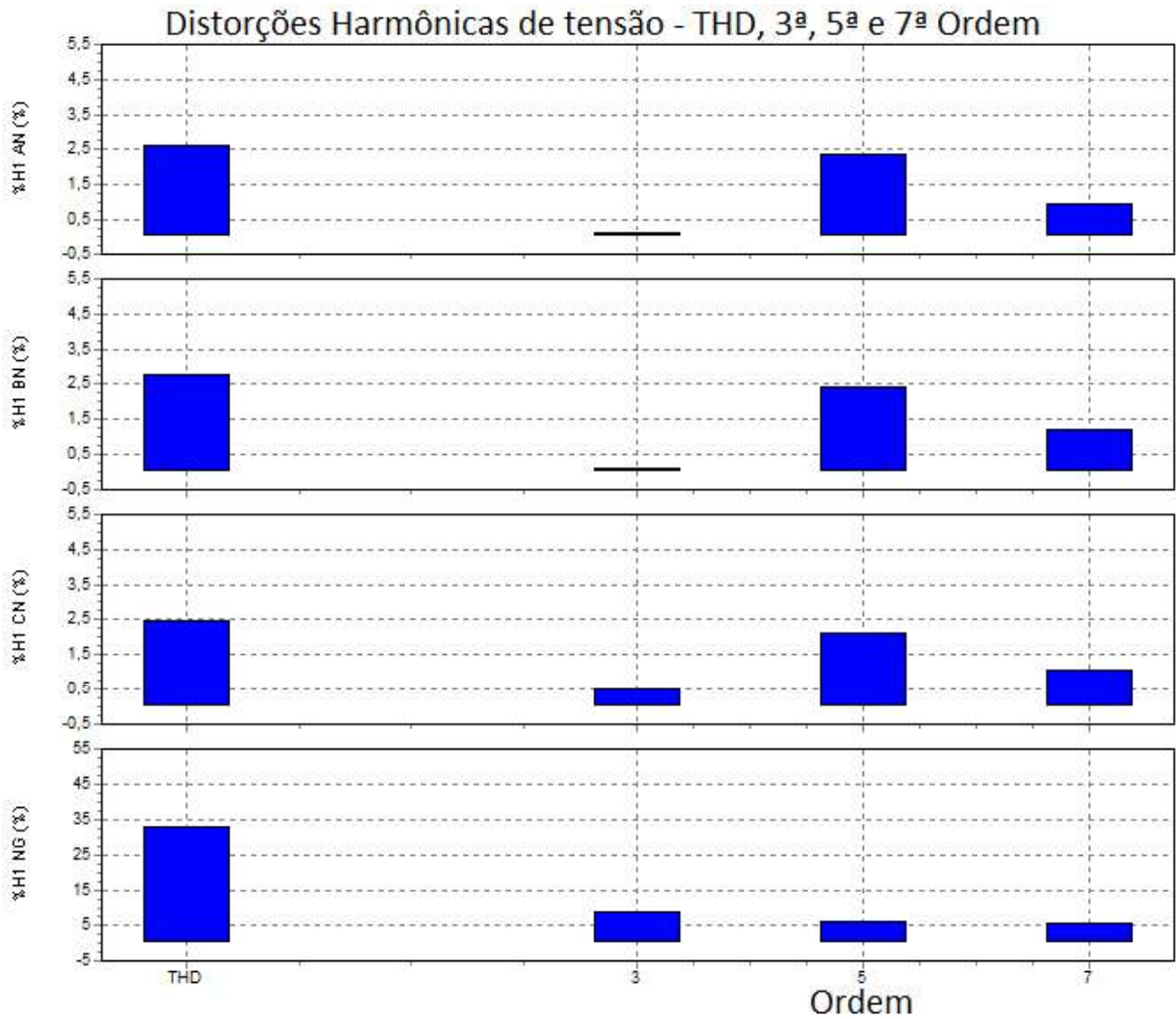
Figura 53 — Harmônicas totais e 3ª, 5ª e 7ª ordem - Sem inserção fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

A Figura 54 apresenta as distorções harmônicas de tensão com a geração de energia fotovoltaica.

Figura 54 — Harmônicas totais e 3ª, 5ª e 7ª ordem - Com inserção fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

Através da análise das Figuras 53 e 54 é possível perceber que em ambas os harmônicos totais (TDH) permaneceram nos parâmetros definidos por norma ficando abaixo de 10%, exceto as distorções harmônicas que circulam através do aterramento (NG), visto que o aterramento é uma parte de proteção e por ele circula qualquer tipo de distúrbio elétrico para que assim evite passar pelos equipamentos instalados.

Observa-se também que os harmônicos individuais de 3ª, 5ª e 7ª ordem mesmo após a instalação da miniusina mantiveram os valores abaixo do que é pré-estabelecido pela regulamentação PRODIST. Ficando abaixo de 6,5% para harmônicos de 3ª ordem, 7,5% para harmônicos de 5ª ordem e 6,5% para harmônicos de 7ª ordem.

Mesmo estando de acordo com o requerido, a quantidade de distorções deve-se ao fato de que os equipamentos utilizados na universidade serem de diferentes tipos, podemos destacar os reatores para lâmpadas, motores e aparelhos eletrônicos para pesquisas que em sua maioria são cargas não-lineares.

A Tabela 22 apresenta os valores médios e máximos, antes e após o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR).

Tabela 22 — THDi e THDv- Distorção harmônica total da corrente e tensão

	Valores de medição DHTv sem SFCR	Valores de medição DHTv com SFCR	Valores de medição DHTi sem SFCR:	Valores de medição DHTi com SFCR:
FASE A	valor médio de 3,04% e valor máximo de 5,5 %	valor médio de 2,63% e valor máximo de 4,98%	valor médio de 25,49% e valor máximo de 70,69%	valor médio de 18,17% e valor máximo de 65,08%
FASE B	valor médio de 2,73% e valor máximo de 5,47%	valor médio de 2,79% e valor máximo de 4,93%	valor médio de 33,74% e valor máximo de 54,6%	valor médio de 38,52% e valor máximo de 279.43%
FASE C	valor médio de 2,59% e valor máximo de 4,98%	valor médio de 2,47% e valor máximo de 4,61%	valor médio de 17,85% e valor máximo de 90,47%	valor médio de 30,94% e valor máximo de 105,36%

Fonte: O autor (2020).

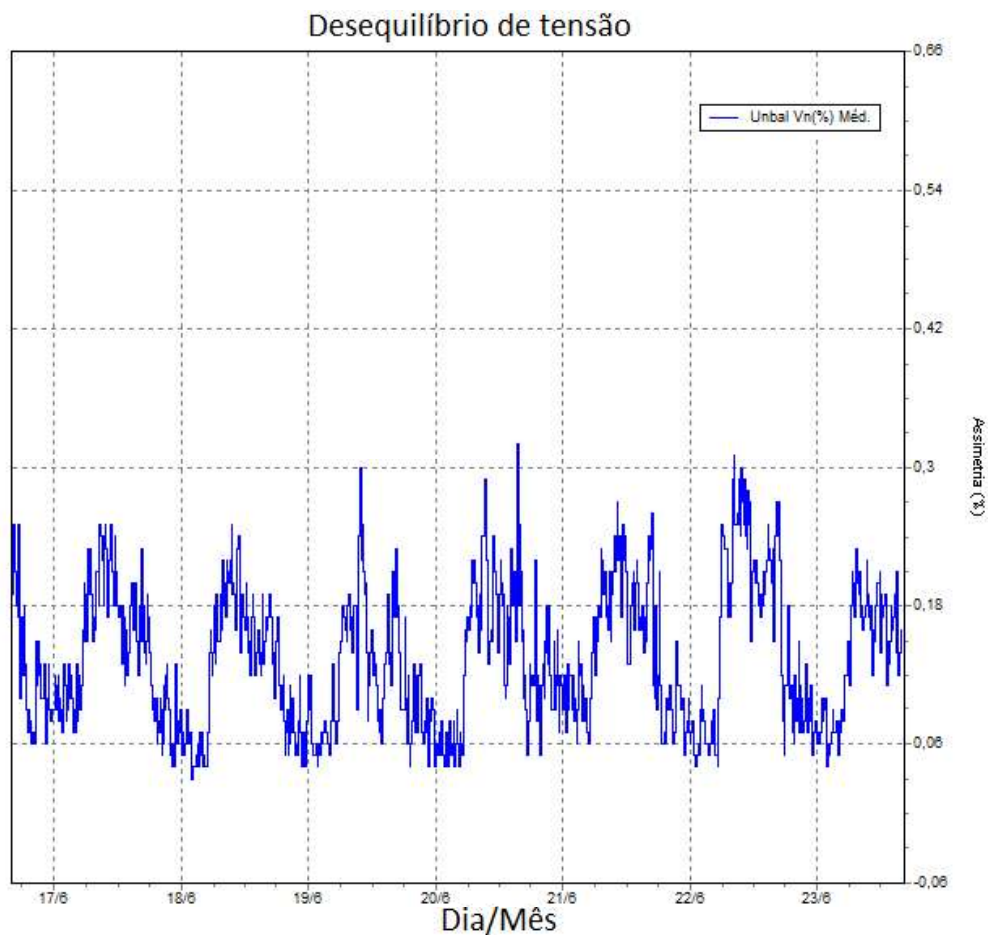
Os valores supracitados na Tabela 22 não demonstram variações significantes de harmônicos presente na tensão e corrente com a inserção do sistema fotovoltaico, o que pode variar com quaisquer tipos de cargas que causam as distorções que estavam ligadas durante as medições. No entanto devido ser, uma universidade a complexidade de saber quais cargas estão ligadas é grande, visto que na universidade há salas trancadas onde executam pesquisas que não se tem acesso aos equipamentos ligados.

5.3.4 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão é um fenômeno associado as alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. Para esse fenômeno, o PRODIST - Módulo 8 define que o ideal deve ser abaixo de 3%.

A Figura 55 apresenta o desequilíbrio de tensão antes da inserção da geração fotovoltaica.

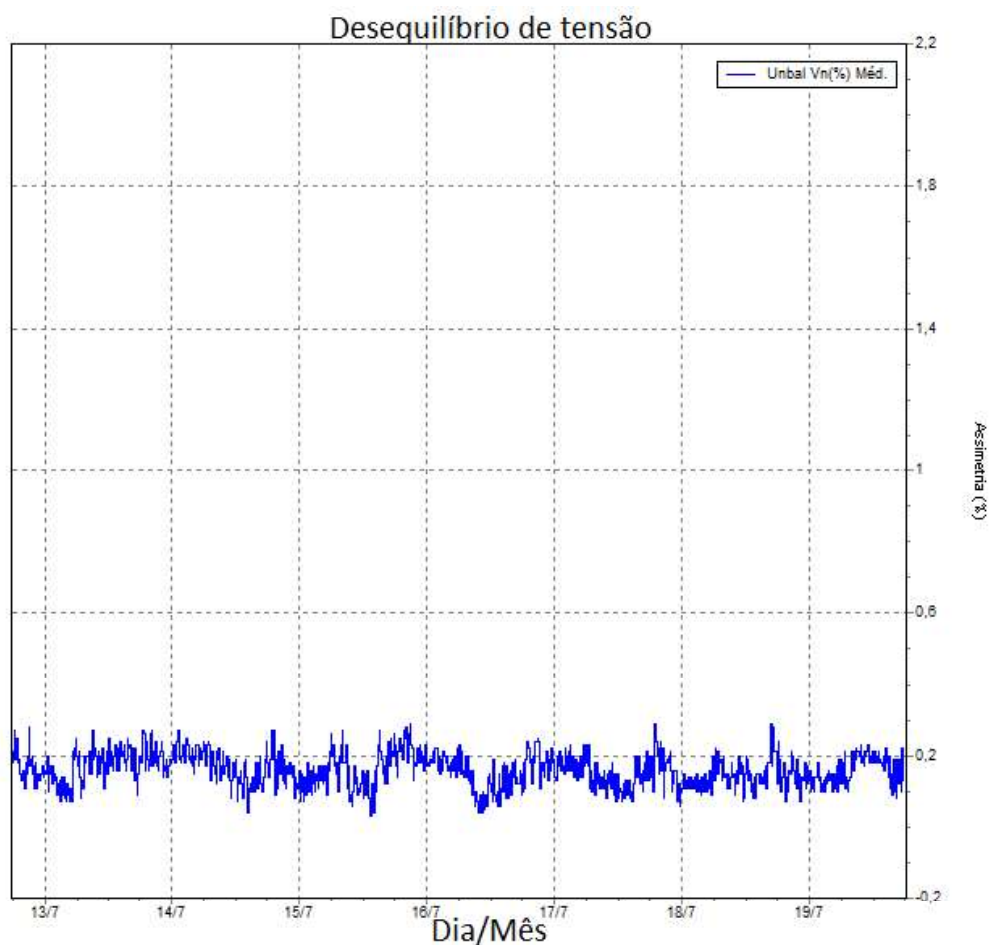
Figura 55 — Desequilíbrio de tensão sem inserção de geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

A Figura 56 apresenta o desequilíbrio de tensão depois da inserção da geração fotovoltaica.

Figura 56 — Desequilíbrio de tensão com inserção de geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

Antes da geração de energia, ocorreram picos de desequilíbrio de tensão, todavia estes se encaixam dentro do valor previsto, estando em conformidade com o exigido pela regulamentação brasileira.

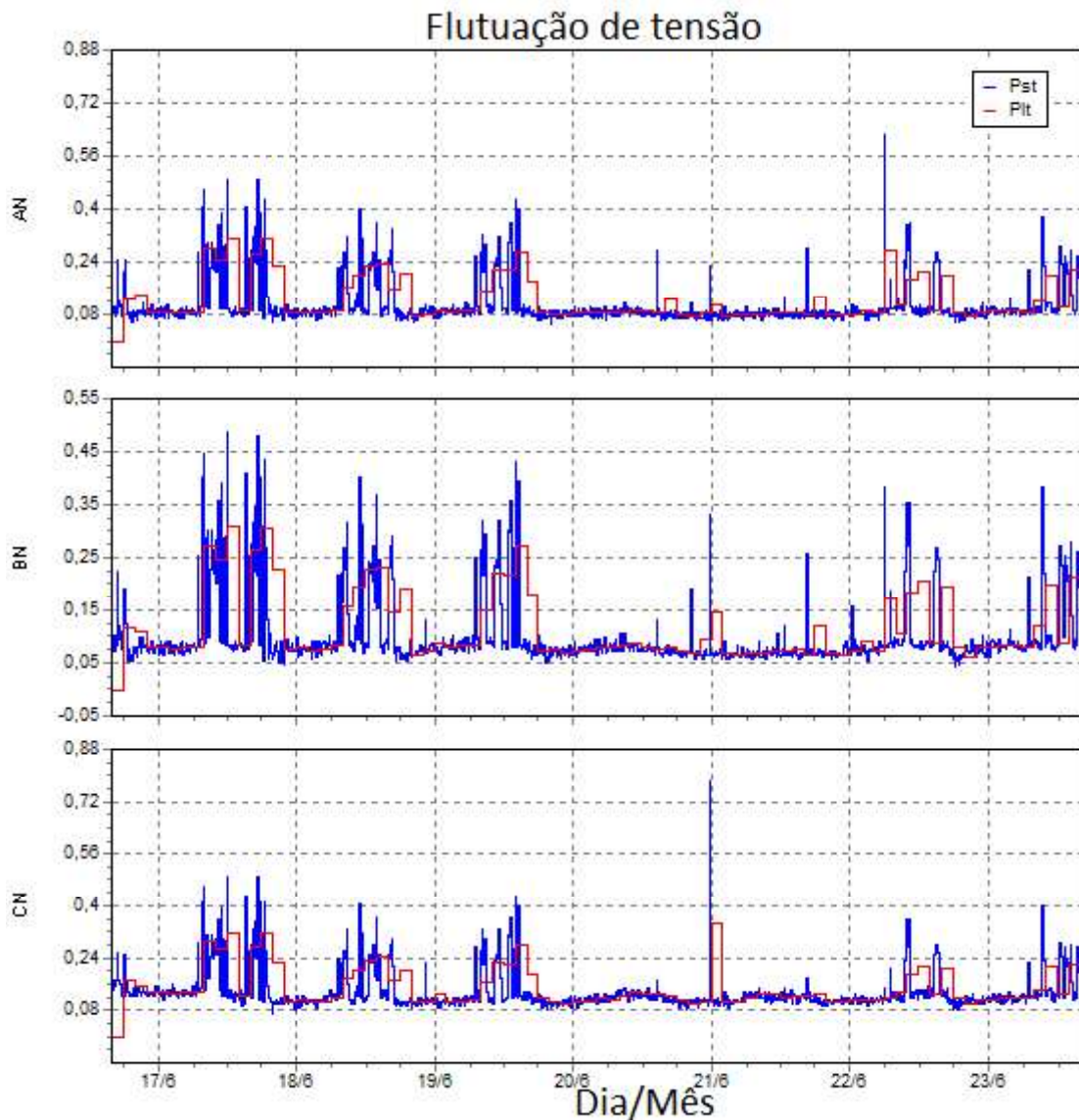
Mesmo com geração de energia fotovoltaica não ocorreram grandes variações, pelo contrário os valores atingidos foram menores do que aqueles observados na Figura 55. Deste modo, a inserção de um sistema fotovoltaico pode melhorar o desequilíbrio de tensão, já que está instalado próximo a carga, realizando o equilíbrio entre as tensões.

5.3.5 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão ocorre quando há a variação da tensão, ocorrendo geralmente em momentos de ligação de grandes cargas, podendo ocorrer de maneira esporádica, repetitiva ou aleatória. Uma característica visível desse fenômeno é o incômodo provocado no consumidor final pelo efeito da cintilação luminosa, além de causar grandes prejuízos em sistemas industriais complexos que precisam trabalhar com valores precisos de tensão.

A Figura 57 apresenta o gráfico de Pst (Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração) e Plt (Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração) anterior a instalação da mini usina.

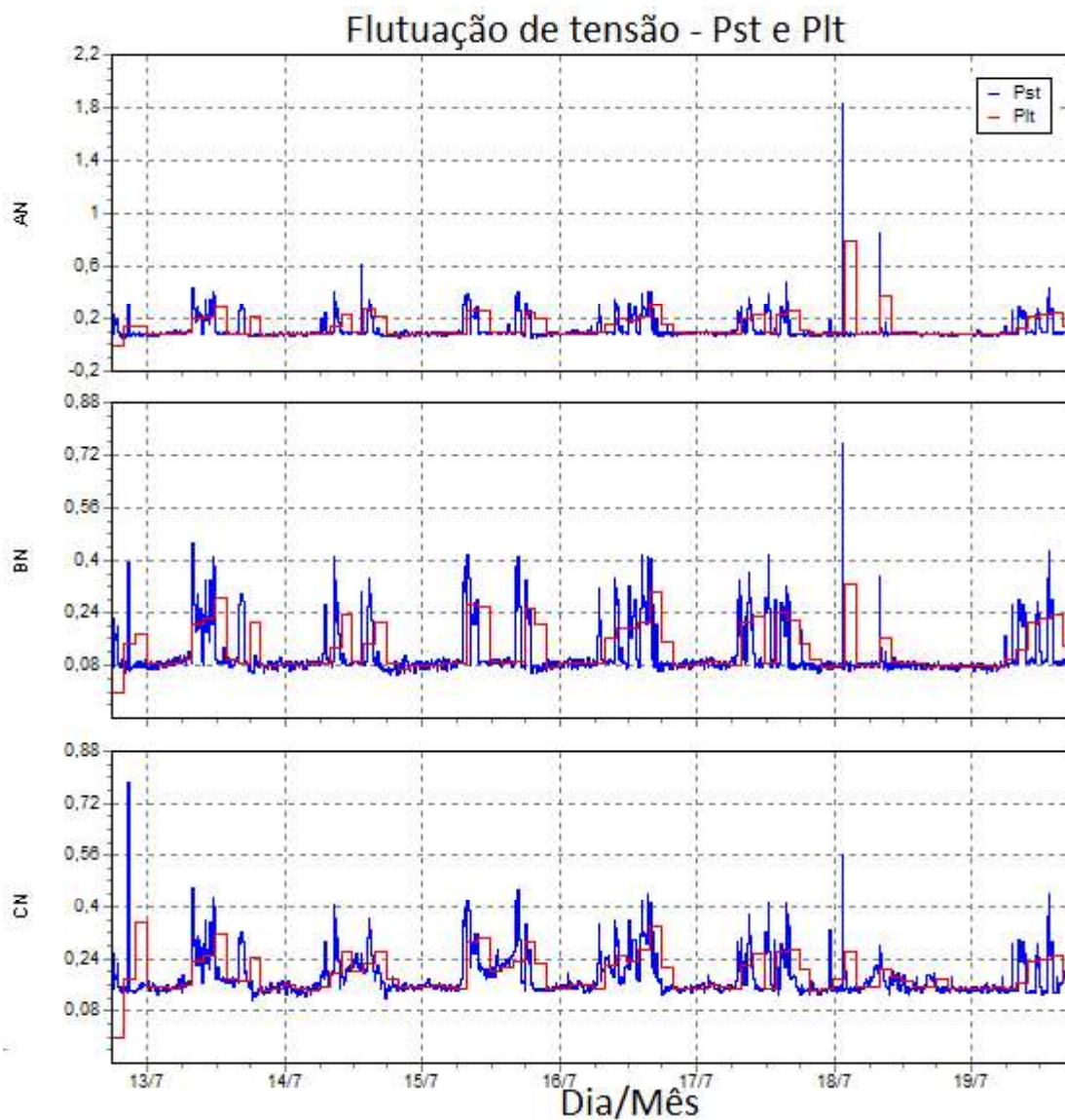
Figura 57 — Plt E Pst sem energia fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

A Figura 58 apresenta o gráfico de Pst e Plt após a instalação da mini usina.

Figura 58 — Plt E Pst com energia fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

Pela Figura 57 nota-se uma variação maior de Pst e Plt nos três primeiros dias, porém nos dias subsequentes, os valores diminuem, o que pode ser fatores causados por equipamentos ligados. Já na Figura 58 a variação ocorre de modo constante.

Para uma avaliação melhor sobre os dados apresentados nas Figuras 57 e 58. A Tabela 23 mostra os valores médios de Plt e Pst em cada fase.

Tabela 23 — Valores de Pst e Plt médios antes e após a inserção fotovoltaica

Fases	Pst - sem SFCR	Pst - com SFCR	Plt - sem SFCR	Plt - com SFCR
A	0,11	0,11	0,13	0,14
B	0,10	0,11	0,12	0,13
C	0,13	0,18	0,15	0,19

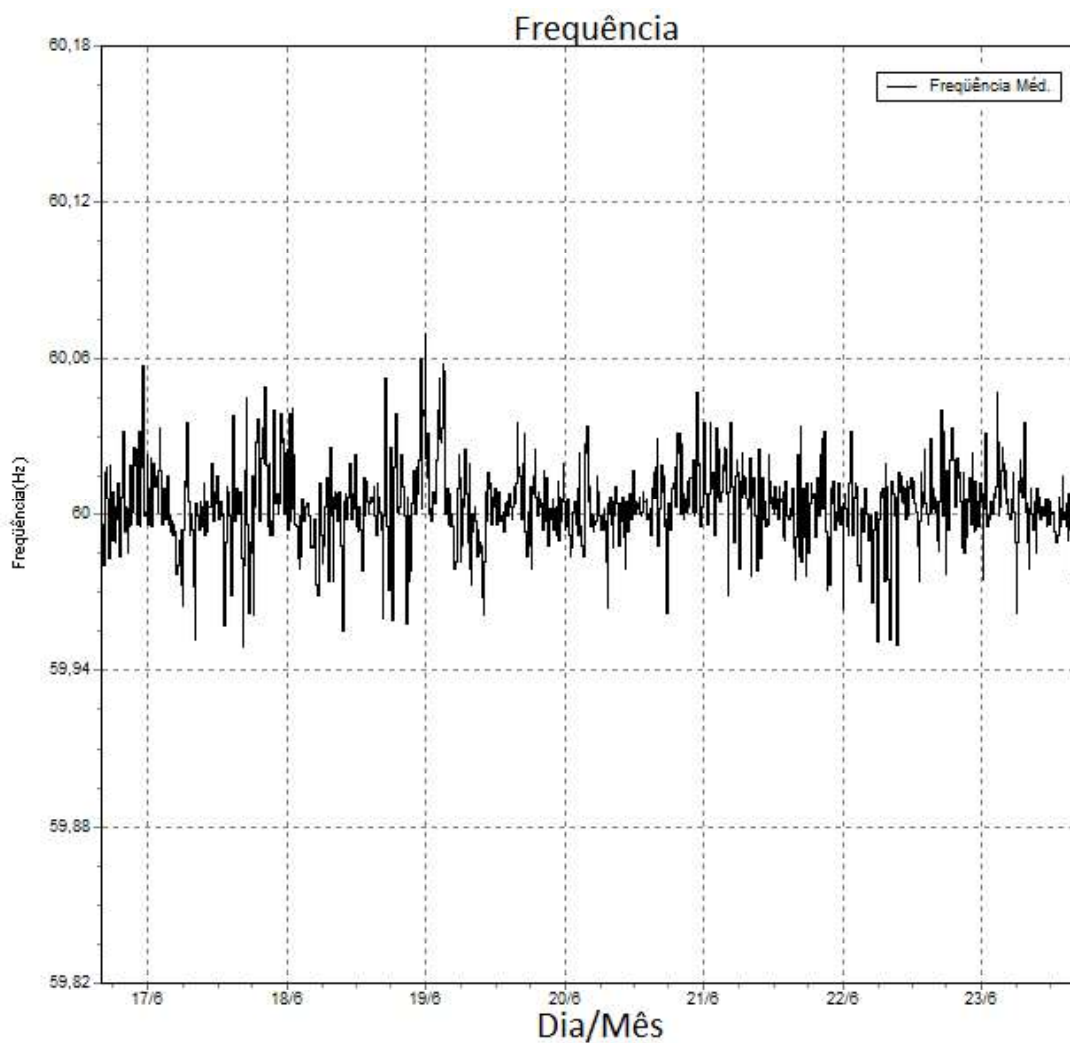
Fonte: O autor (2021).

Deste modo, pode se afirmar que os valores de Pst e Plt pioram com a inserção do sistema fotovoltaico, porém de maneira quase imperceptível. Os valores obtidos antes e após a inserção estão dentro dos parâmetros exigidos na regulamentação PRODIST, ficando abaixo de 1 pu.

5.3.6 Variação de frequência

A frequência deve variar o mínimo possível, desse modo analisou cada período verificando a variação e o tempo que em a frequência permaneceu diferente de 60 Hz. A Figura 60 apresenta as variações de que ocorreram na frequência no período sem a geração de energia.

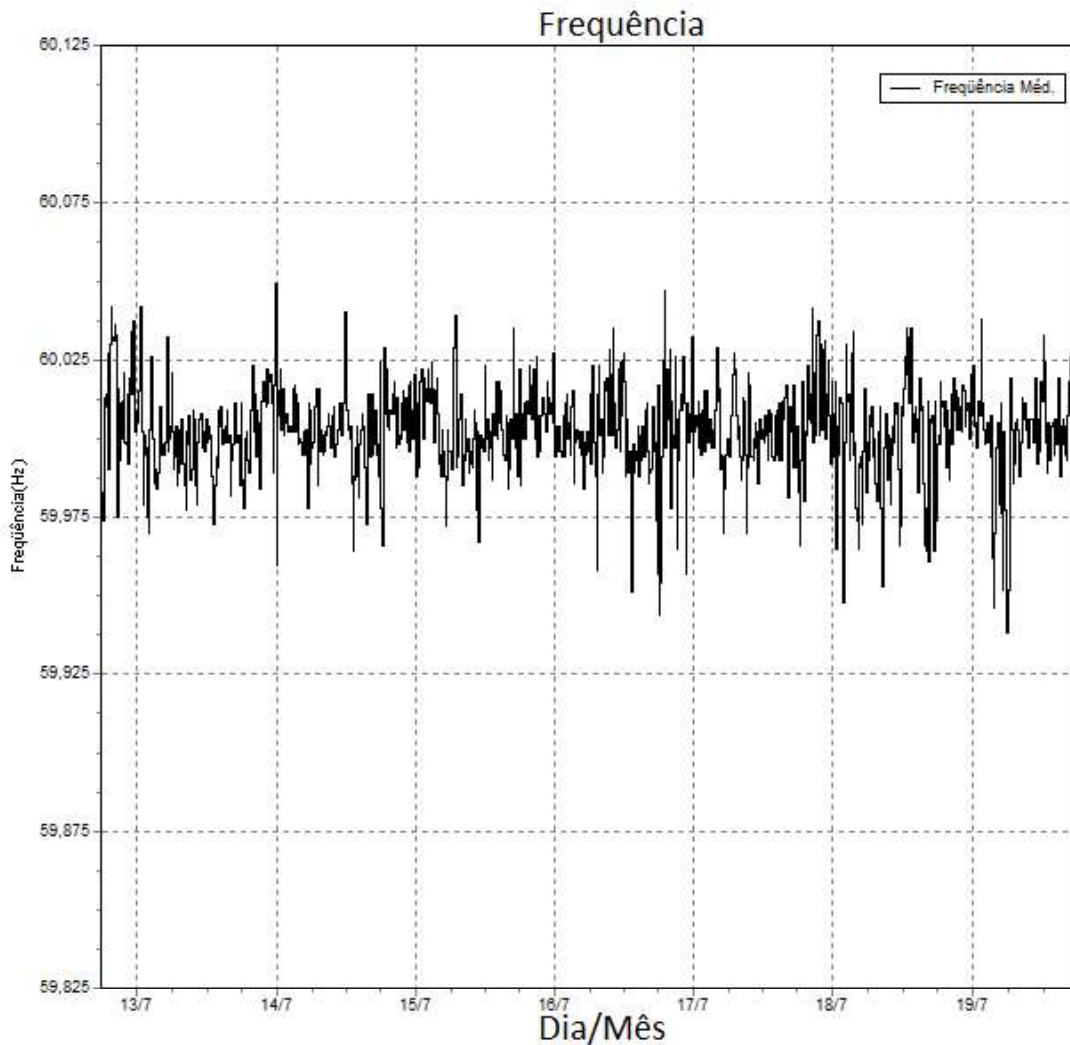
Figura 59 — Frequência sem geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

A Figura 60 apresenta as variações de que ocorreram na frequência no período com a geração de energia.

Figura 60 — Frequência com geração fotovoltaica



Fonte: O autor (2021).

Nota-se que a frequência ficou entre os valores de 59,9 Hz e 60,1 Hz. Todavia em alguns pontos a frequência ficou abaixo, chegando ao valor próximo de 59,8 Hz, o que ocorreu por milésimos de segundos e não interfere na qualidade de energia elétrica. Observa-se também que a frequência aumentou sua variação conforme os inversores eram ligados o que é normal considerando que os inversores injetam na rede uma energia gerada com a frequência necessária parametrizada pela rede.

5.3.7 Variação de tensão de curta duração

Para a avaliação da qualidade de energia referente a variação de tensão de curta duração são analisados eventos esporádicos que podem ocorrer entre 0,5 ciclos

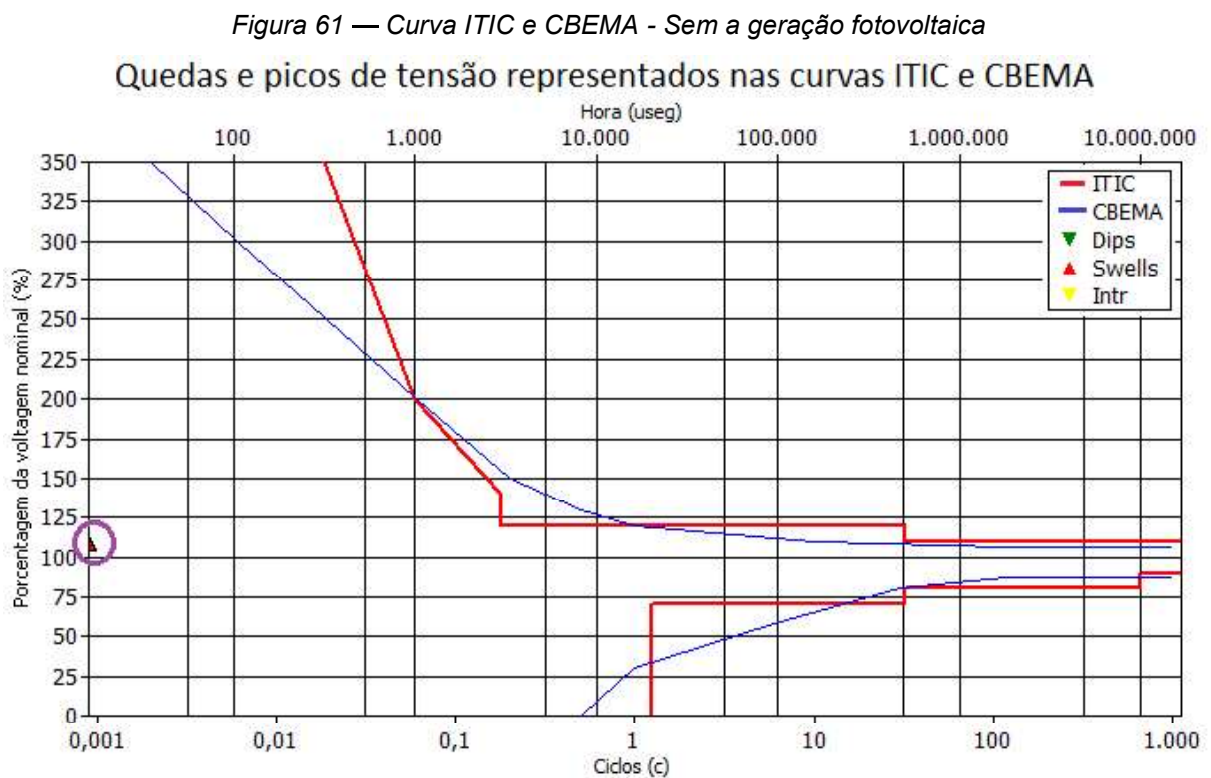
e 1 minuto. As variações de tensão também podem ser conhecidas por DIP ou SAG quando são relacionadas a afundamentos de tensão ou então SURGE e SWELL quando há elevação de tensão e como serão demonstrados nas legendas das curvas CBEMA e ITIC a seguir.

Deste modo, foram analisados e classificados os eventos de variação de curta duração ocorridos antes e após a inserção fotovoltaica, para que seja verificado se a miniusina causaria essa variação de tensão em algum ponto de seu funcionamento.

Por serem uma das principais fontes de problemas para os consumidores, é de total interesse a análise para sua qualidade de energia, visto que afundamentos ou elevações de tensões bruscas podem ser responsáveis por queimas de equipamentos e eletrônicos, sendo um fato preocupante quando se trata de uma universidade que necessita de equipamentos com funcionamento adequado.

As Figuras 61 e 62 apresentam as curvas CBEMA e ITIC, responsáveis por demonstrar se o evento ocorrido teve risco em equipamentos.

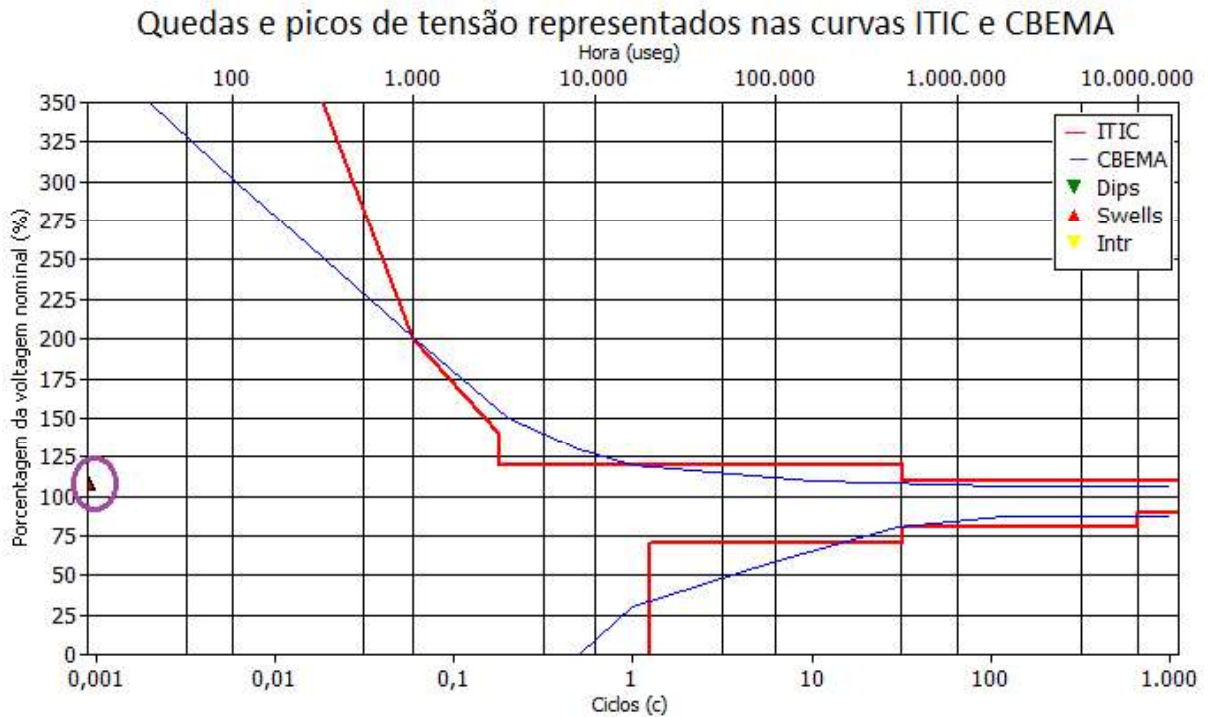
A Figura 61 apresenta as curvas e os eventos ocorridos antes da geração de energia. A curva CBEMA (em azul) e a curva ITIC (em vermelho).



Fonte: O autor (2021).

A Figura 62 apresentam as curvas CBEMA e ITIC após a geração de energia.

Figura 62 — Curva ITIC e CBEMA - Com a geração fotovoltaica



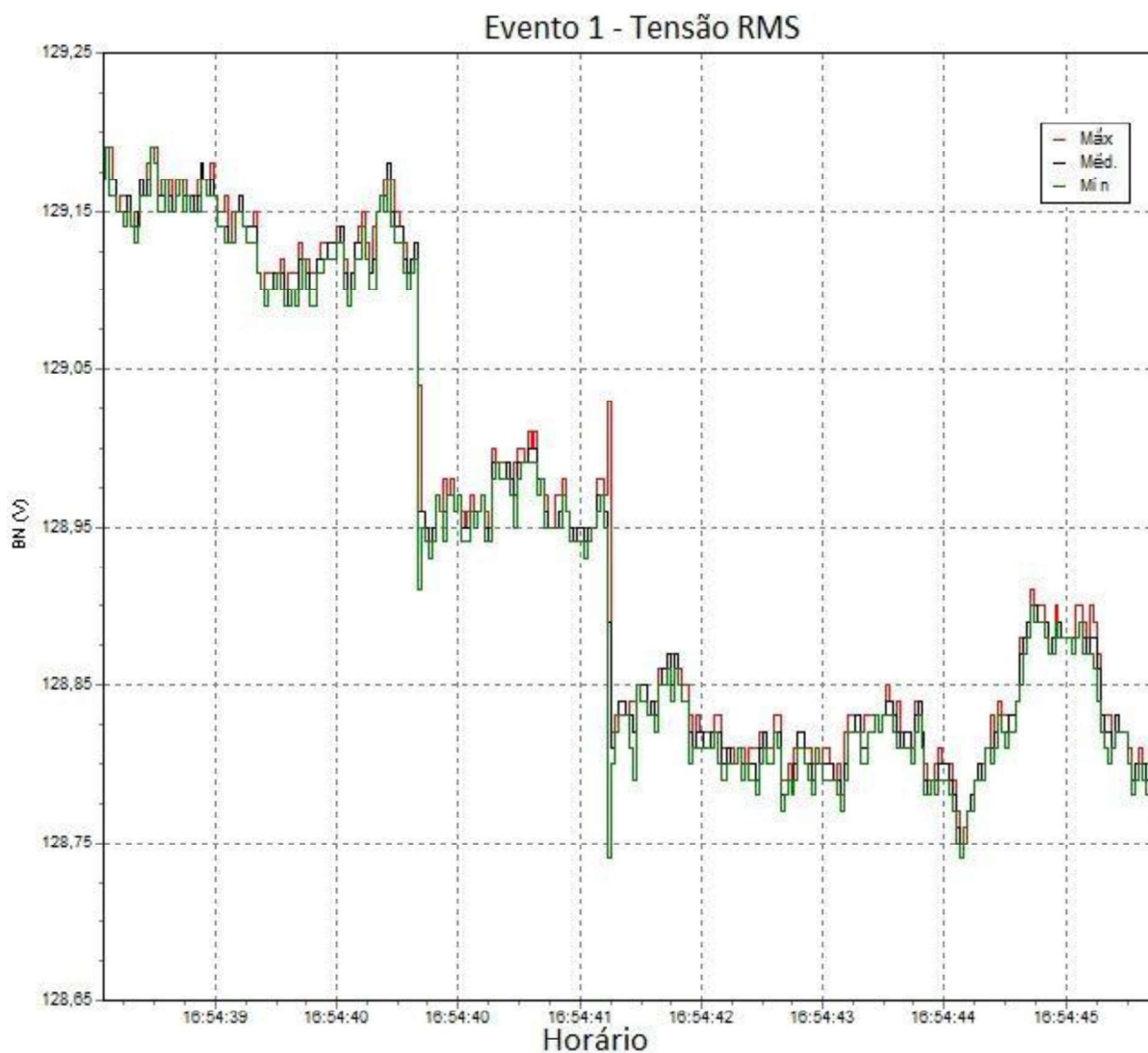
Fonte: O autor (2021).

Pequenos triângulos aparecem próximo ao valor 100 no eixo vertical, onde estão circulado em roxo, o qual é o local onde mostra a posição que os eventos de variação de tensão de curta duração ocorreram. Por estarem dentro da curva, considera-se que não houve perigo de danos aos equipamentos eletroeletrônicos.

As variações de tensão de curta duração são irregularidades significativas em pequenos intervalos de tempo no que condiz ao valor eficaz da tensão. Para exemplificar, abaixo são demonstrados na tensão RMS os eventos ocorridos antes e após a inserção do sistema fotovoltaico.

A Figura 63 apresenta o evento no qual houve um abaixamento de tensão no dia 16/06/2020 às 16:54:41 e durou cerca de 972msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Afundamento Momentâneo de Tensão.

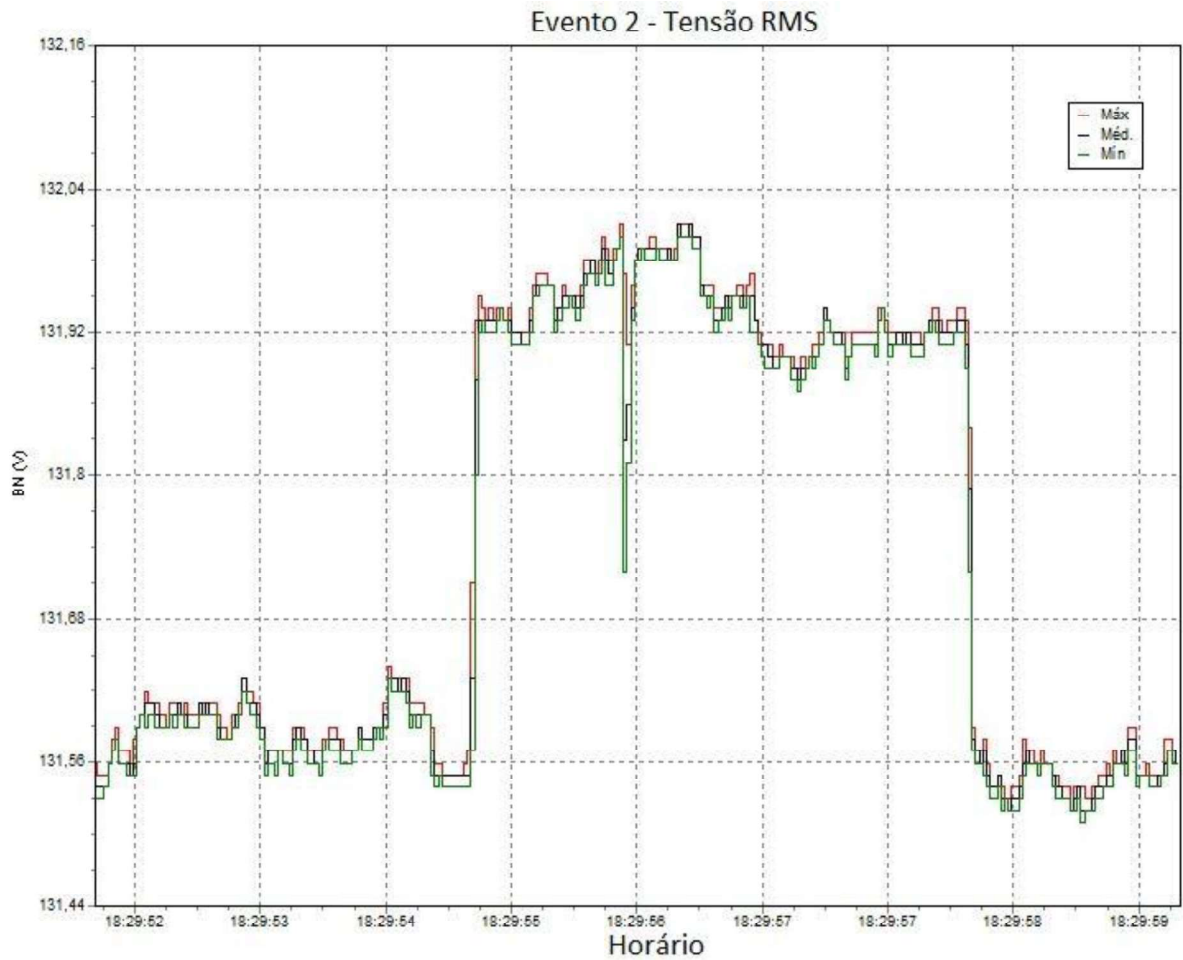
Figura 63 — Evento 1 sem inserção do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor (2021).

A Figura 64 mostra o evento no qual houve um abaixamento de tensão no dia 16/06/2020 às 18:29:56 e durou cerca de 156msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Elevação Momentânea de Tensão.

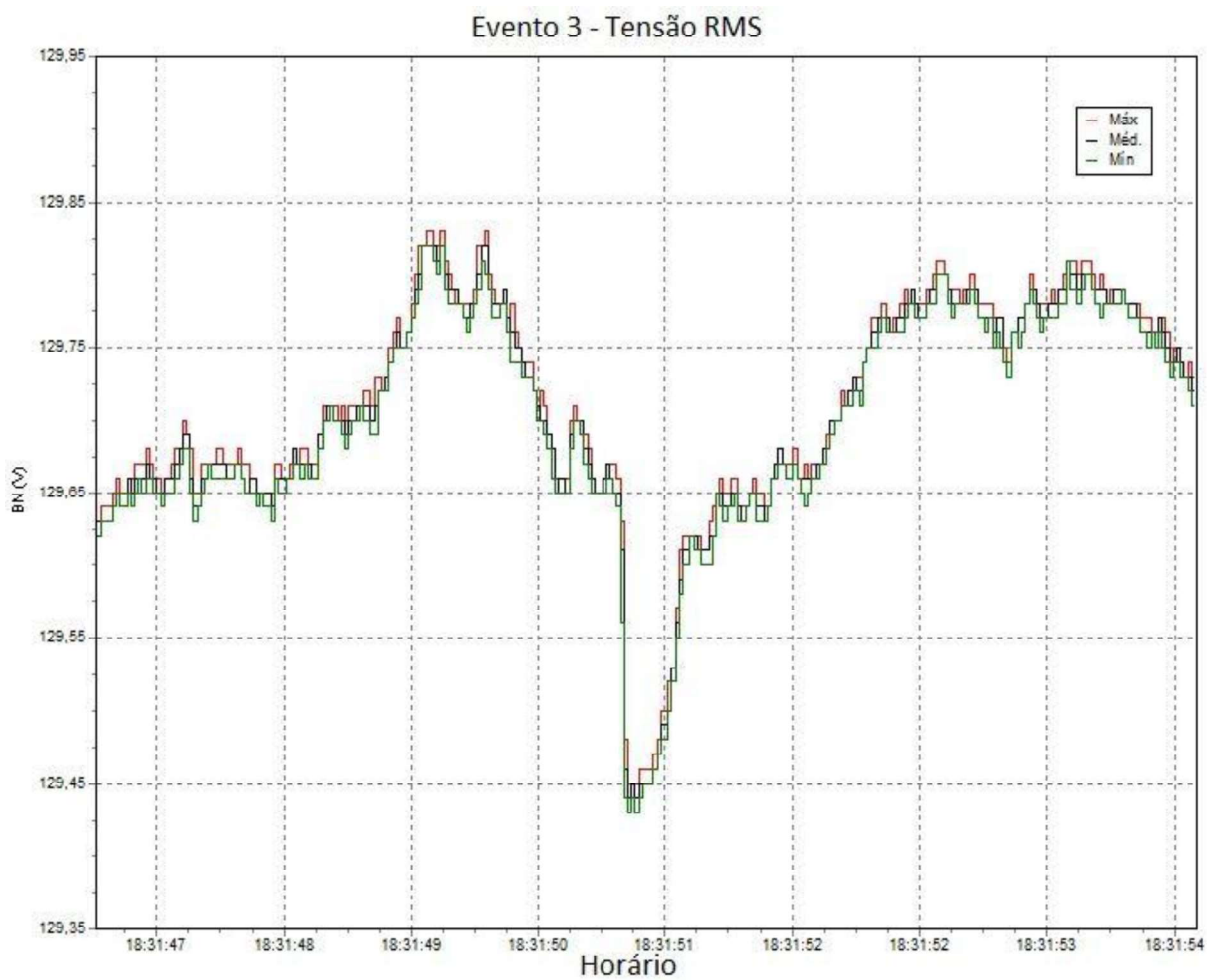
Figura 64 — Evento 2 sem inserção do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor (2021).

A Figura 65 apresenta o evento no qual houve um abaixamento de tensão no dia 16/06/2020 às 18:31:50 e durou cerca de 890 msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Afundamento Momentâneo de Tensão.

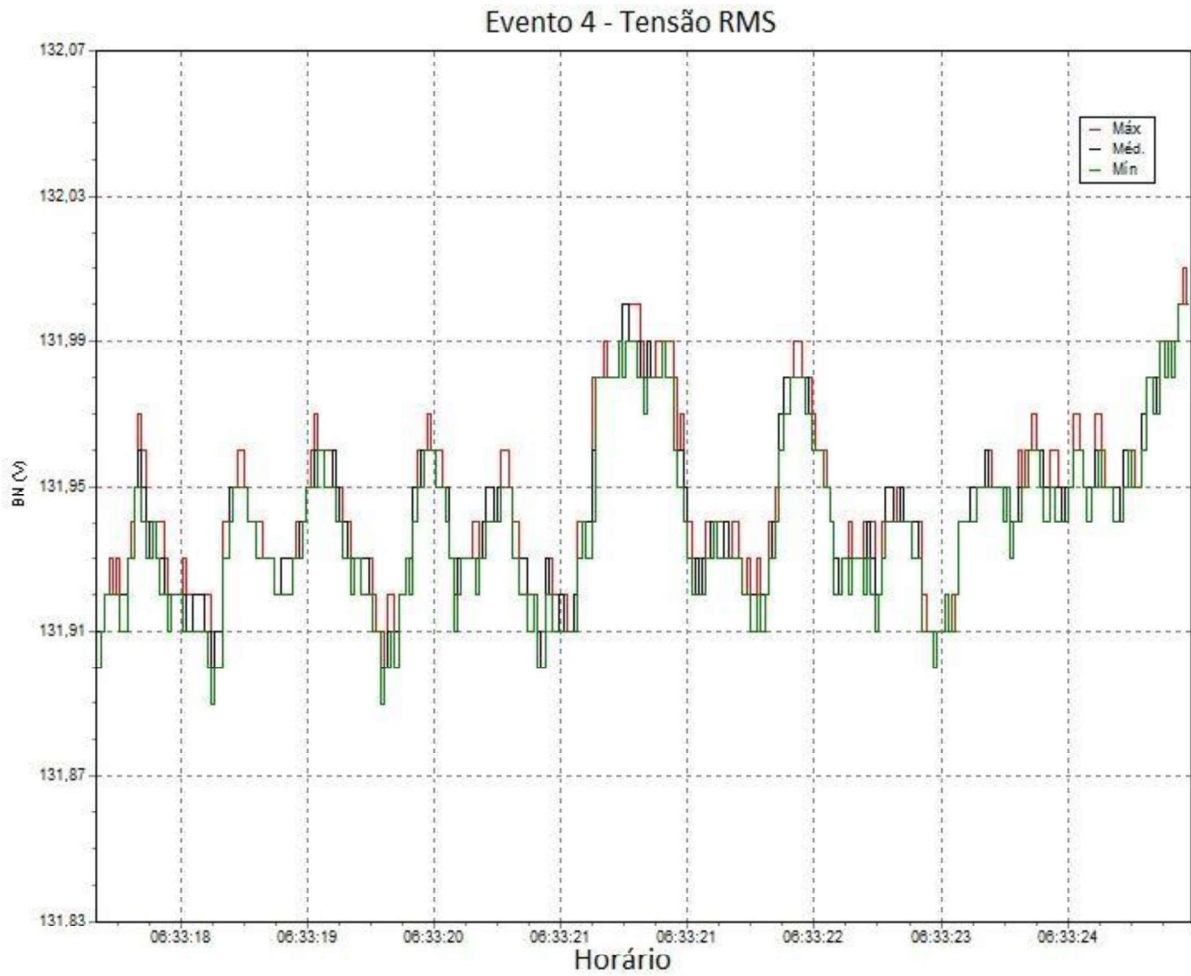
Figura 65 — Evento 3 sem inserção do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 66 faz referência ao evento no qual houve um abaixamento de tensão no dia 21/06/2020 às 06:33:21 que durou cerca de 460msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Elevação Momentânea de Tensão.

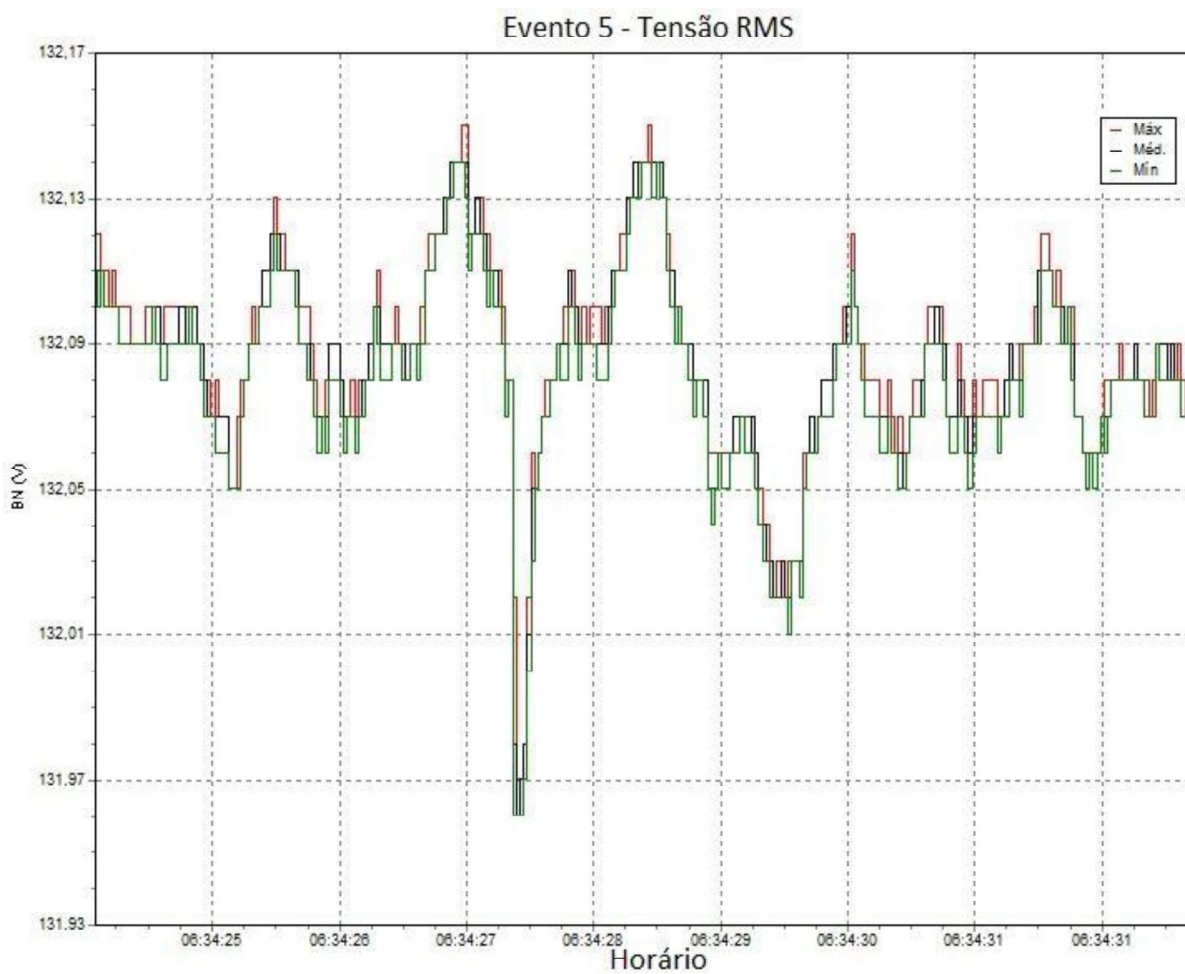
Figura 66 — Evento 4 sem inserção do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor (2021).

A Figura 67 apresenta o evento no qual houve um abaixamento de tensão no dia 21/06/2020 às 06:34:28 e que durou cerca de 714 msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Elevação Momentânea de Tensão.

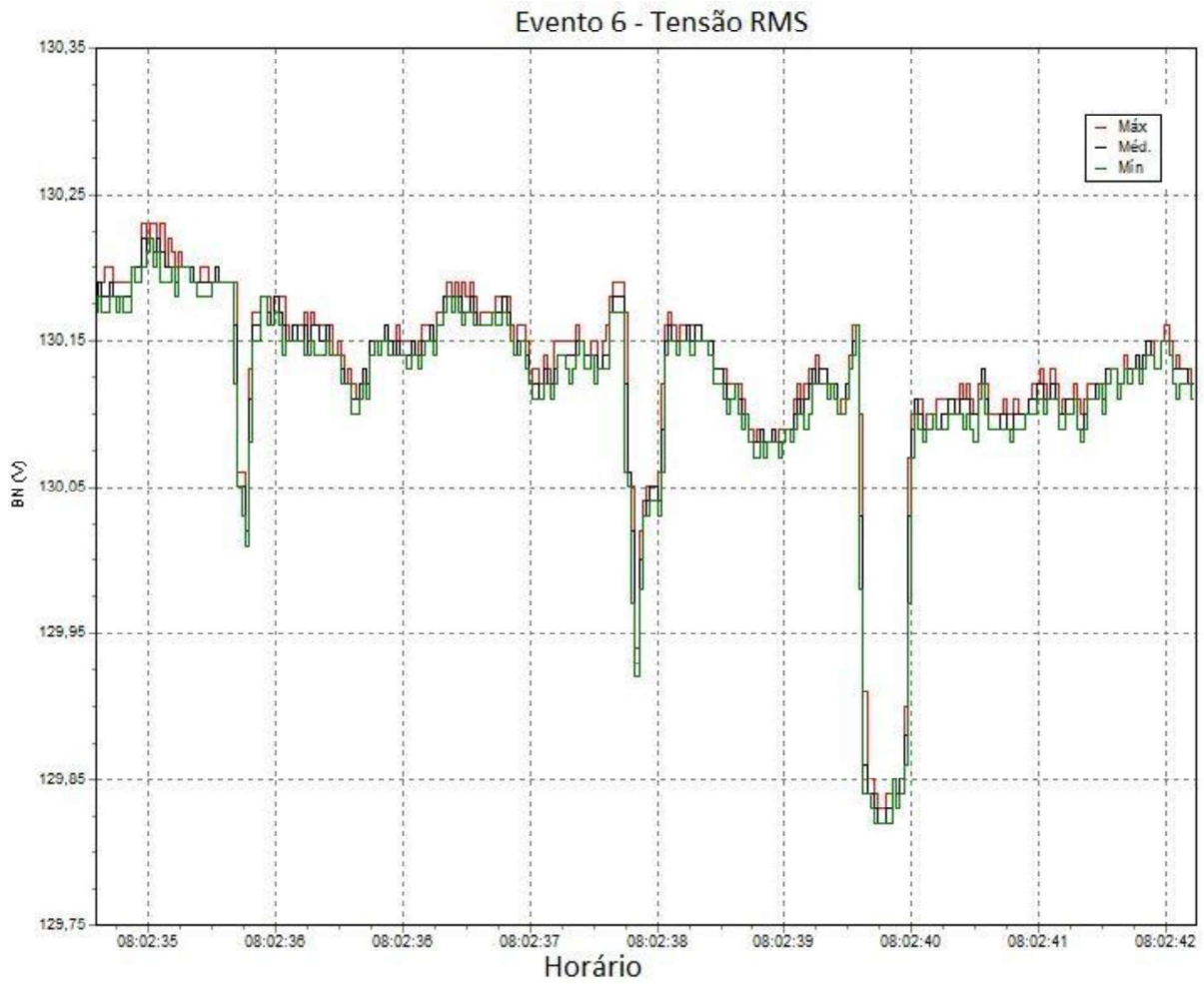
Figura 67 — Evento 5 sem inserção do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor (2021).

A Figura 68 mostra o evento no qual houve um abaixamento de tensão no dia 21/06/2020 às 08:02:38 e que durou cerca de 557 msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Abaixamento Momentâneo de Tensão.

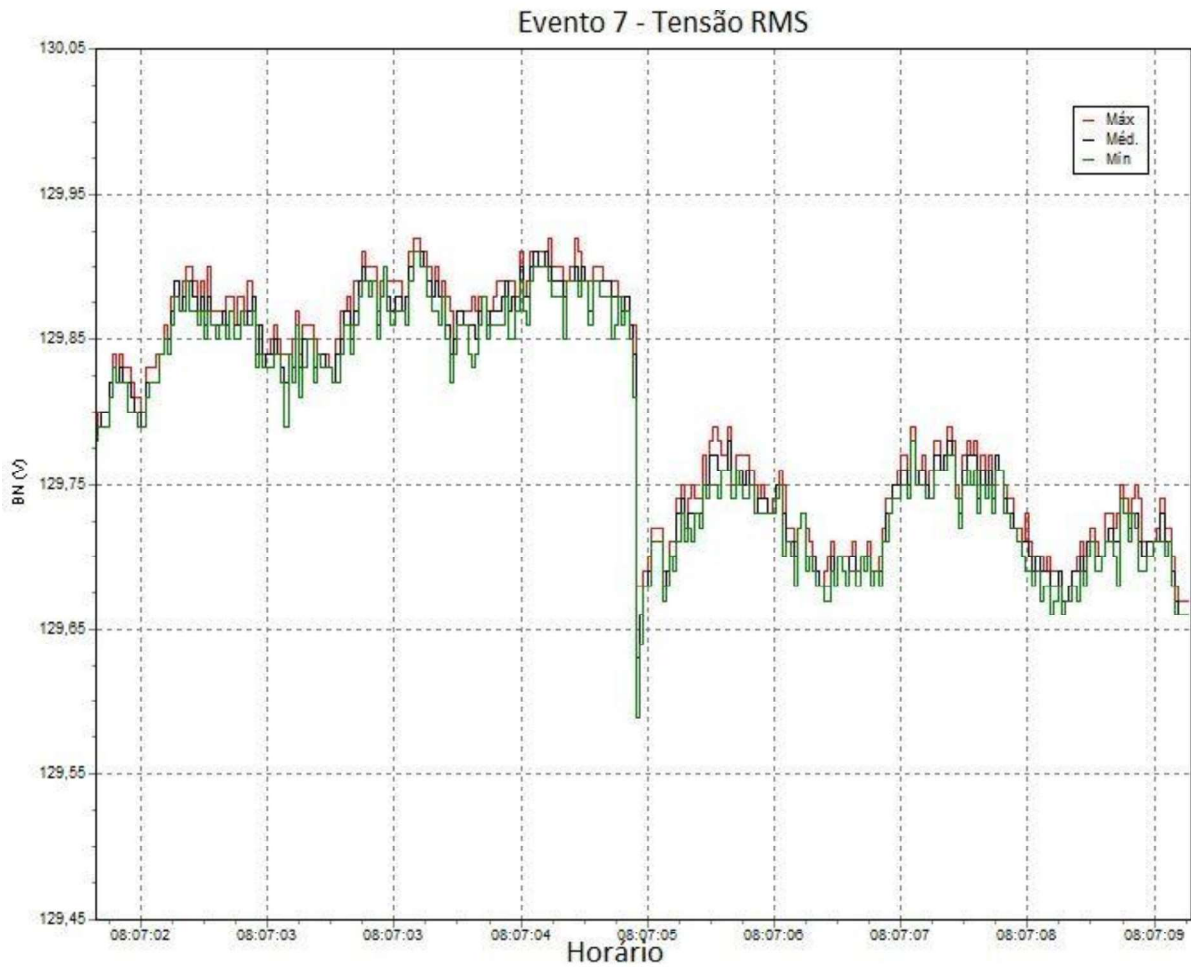
Figura 68 — Evento 6 sem inserção do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor (2021).

Já a Figura 69 faz referência ao evento no qual foi um abaixamento de tensão no dia 21/06/2020 às 08:07:05 e que durou cerca de 603 msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Abaixamento Momentâneo de Tensão.

Figura 69 — Evento 7 sem inserção do sistema fotovoltaico

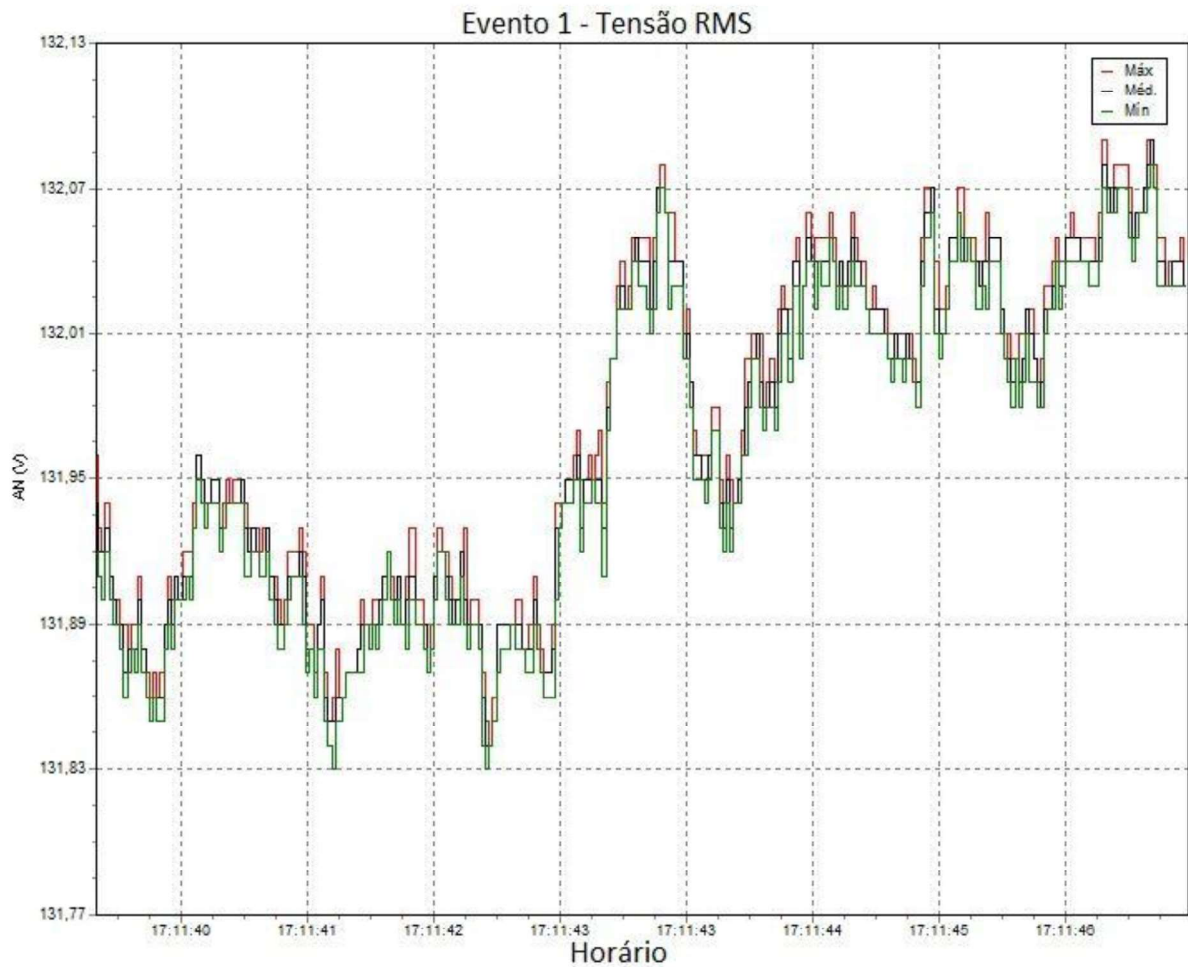


Fonte: O autor (2021).

As Figuras 70 e 71 fazem referência aos dois eventos de variação de curta duração que ocorreram durante a medição com o sistema fotovoltaico interligado a rede.

A Figura 70 apresenta o evento no qual houve um abaixamento de tensão no dia 15/07/2020 às 17:11:43 e que durou cerca de 389 msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Afundamento Momentâneo de Tensão.

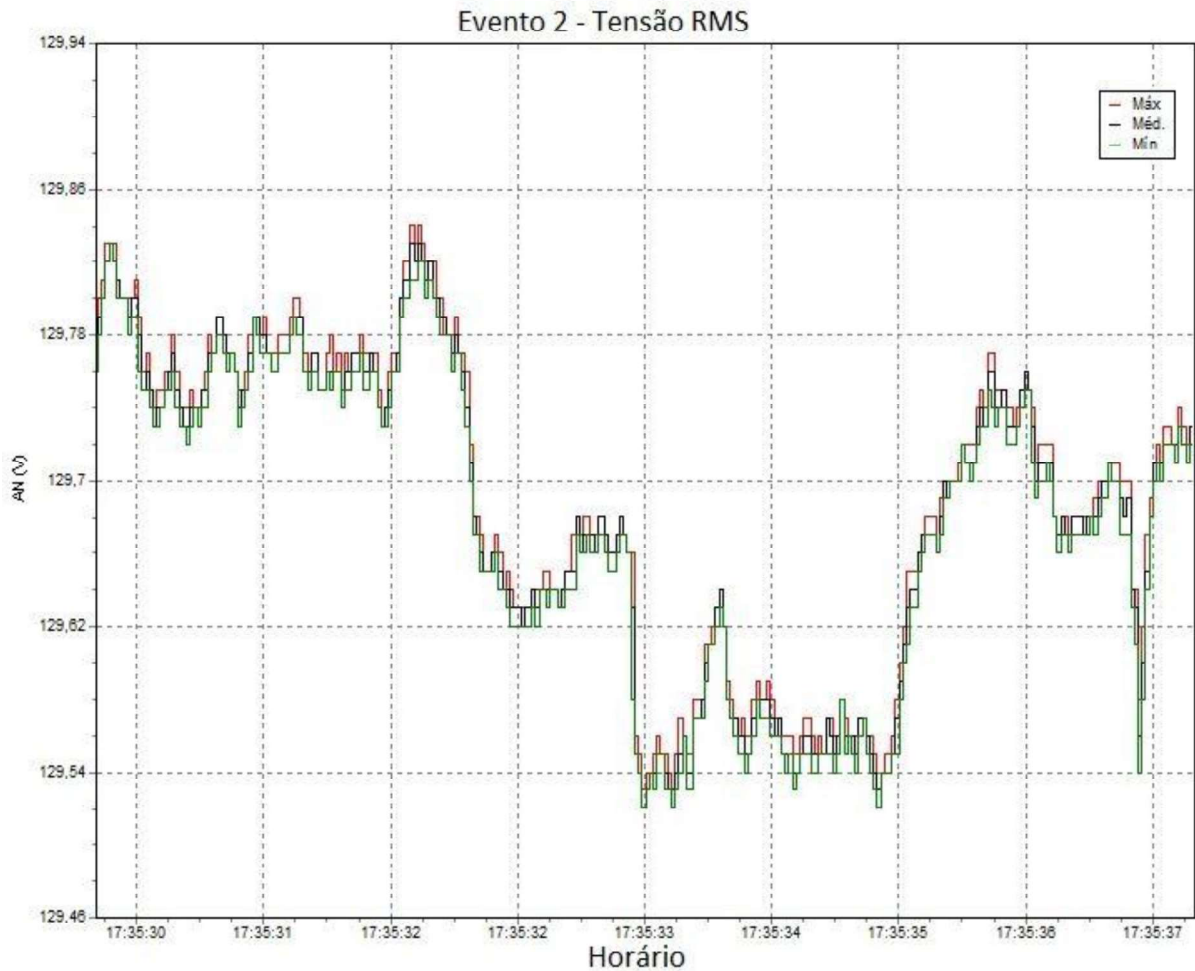
Figura 70 — Evento 1 de onda com inserção do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor (2021).

Já Figura 71 traz o evento no qual houve um abaixamento de tensão no dia 15/07/2020 às 17:35:33 e que durou cerca de 726 msec, sendo classificado como Variação Momentânea de Tensão - Afundamento Momentâneo de Tensão.

Figura 71 — Evento 2 com inserção do sistema fotovoltaico



Fonte: O autor (2021).

Os eventos que ocorreram sem a inserção de energia fotovoltaica, são os que normalmente acontecem após entradas e saídas de grande carga ou com a ocorrência de problemas na rede da concessionária, porém não interferem no estudo quanto aos impactos da rede com energia fotovoltaica.

Já com a planta fotovoltaica conectada à rede obteve-se menos eventos de curta duração, contudo, não chegam a comprovar que os eventos são decorrentes da instalação de energia fotovoltaica, já que podem ocorrer por diversos fatores, como descargas elétricas, entradas de cargas de grande porte e até curtos circuitos ocasionados por animais silvestres na rede de distribuição. Como essas ocorrências decorrem de modo esporádicos e não contínuos, demonstram que a instalação da mini usina fotovoltaica não traz nenhum impacto na rede elétrica.

6 CONCLUSÃO

O avanço dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede demonstra a importância desse trabalho principalmente no que se refere ao impacto que esse tipo de geração pode trazer ao sistema elétrico.

Através da pesquisa foi possível acompanhar e participar do projeto da mini usina fotovoltaica instalada na universidade federal de alfnas no campus Poços de Caldas e para desenvolvimento do trabalho foi realizado o acompanhamento, a medição, a simulação e a análise do sistema fotovoltaico. Todo este processo foi essencial para adquirir o conhecimento sobre a funcionalidade de cada parte do sistema de geração fotovoltaica.

Os equipamentos foram adquiridos pensando em precisão e qualidade, e o sistema de instrumentação e automação funcionou conforme esperado, após instalado tornou possível auxiliar em soluções de erros ou defeitos ocorridos na parte física do sistema fotovoltaico. Além disso a boa qualidade dos equipamentos facilitou nas medições climáticas e elétricas e na obtenção de dados específicos para que fosse executada as simulações.

Para que fosse possível quantificar a energia que seria produzida pela miniusina fotovoltaica, que considera valores de perdas, utilizou-se de uma simulação no software PVsyst e comparou-se após o início da geração os dados simulados e os medidos pelo Fronius Solar web.

A simulação obteve confiabilidade em seus resultados, onde os valores de rendimento fora de 79,3% e a produção total simulada em um ano foi de 117,1 MWh/ano e uma produção específica de 1419 kWh/kWp/ano, em contrapartida dos valores de geração medidos pelo Fronius Solar Web, que foi de 109,1 MWh/ano, e a produção específica calculada baseada na geração de 1322,42 kWh/kWp/ano, correspondendo a uma diferença de 6,8% a menor, em relação aos valores simulados, estes resultados demonstraram uma grande proximidade entre os valores reais e simulados. Esta diferença deve ao fato do software levar em consideração todos os tipos de perdas no sistema.

O Fronius Solar Web demonstrou que a eficiência do sistema instalado é maior que o simulado quando comparados mês a mês, porém ocorreram diferenças substanciais em dois meses do período de análise, ocorrido devido a falha em um dos

inversores da miniusina, devido a um defeito de fábrica, que precisou ser levado para manutenção.

Quanto a eficiência energética global do sistema, foi quantificado a economicidade da energia gerada na miniusina fotovoltaica de 84,36 kWp instalada no campus da Unifal. Os valores de economia mensal ficaram acima de 40% em meses como janeiro, fevereiro, agosto, setembro e outubro, representando uma economia média mensal de 10.947kW.

Referente aos futuros problemas que podem ser causados na rede elétrica pela instalação do sistema fotovoltaico, utilizou o software MATLAB/Simulink para simular o sistema conectado à rede, possibilitando, com isto, cumprir com um dos objetivos principais deste trabalho.

Após a inserção dos inversores na simulação e comparado com a medição em campo concluiu-se que o impacto causado seria mínimo e que não ocorreria interferência da miniusina na qualidade de energia, podendo, na realidade, ocorrer uma melhoria no fator de potência devido ao aumento da energia ativa na rede. Os dados de fator de potência não puderam ser confrontados, visto que a carga simulada baseou em uma carga média mínima e equilibrada, o que não ocorre em sistemas reais. Entretanto, diversos dos parâmetros avaliados obtiveram semelhanças interessantes entre valor simulado e real, que possibilitaram constatar que o impacto causado pela inserção de um sistema fotovoltaico pode causar, é muito baixo. Tão baixa que, qualquer pequena carga conectada à rede pode causar um impacto maior do que o da miniusina, vindo até a ocultar a perturbação causada pela miniusina fotovoltaica.

Para análise da qualidade de energia foi utilizado as medições em campo antes e após a instalação do sistema fotovoltaico, através disso foi possível concluir que mesmo antes da instalação da miniusina a qualidade de energia da universidade se encontrava, na maior parte do tempo, dentro dos parâmetros regulamentados pelo PRODIST e a inserção do sistema fotovoltaico não alterou negativamente a qualidade de energia, pelo contrário alterou positivamente. Os eventos negativos, fora dos padrões regulamentados, foram curtos e de pouco impacto, como por exemplo, as ocorrências de variações de tensão de curta duração que, em ambas as medições, demonstraram que a geração fotovoltaica não é responsável pelos distúrbios causados na rede.

Cabe ressaltar que o único distúrbio que se apresentou fora dos limites regulamentados pelo PRODIST foi o fator de potência que variava abaixo do especificado, contudo, após a inserção do sistema fotovoltaico, este chegou a valores próximos do ideal. Deste modo pode-se concluir que os resultados positivos foram comprovados, prevenindo a universidade de receber uma possível penalidade da concessionária, caso este estivesse abaixo de 0,92.

Como não foi verificado impactos negativos e nem distúrbios fora do padrão, constatou-se que não havia necessidade de intervenção afim de melhorar os parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica na universidade.

Diante dos resultados obtidos, verificou-se que a inserção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede é de grande valia, visto que trazem economia, eficiência e não trouxeram problemas em relação a qualidade de energia no local da instalação.

7 TRABALHOS FUTUROS

Os estudos sobre sistemas fotovoltaicos conectados à rede é um tema vasto, com possibilidades de pesquisa de diversos tipos, tanto na criação de simulações quanto na parte de análise de medições em campo. A universidade possui equipamentos adequados e placas fotovoltaicas de diferentes tipos, o que auxilia no desenvolvimento de pesquisas.

Este estudo trouxe resultados interessantes que podem ser futuramente desenvolvidos a fim de possíveis melhorias e adaptações no sistema.

Como sugestões podem ser citados:

- Simulação com valores de cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas reais identificados na universidade, demonstrando como um sistema desequilibrado pode influenciar na qualidade de energia em um local com a geração fotovoltaica instalada;
- Simulação dos distúrbios como descargas atmosféricas ou ligamento de grandes cargas e comparados com distúrbios que ocorreram e puderam ser medidos pelo analisador de energia para verificação dos impactos que podem ser causados a longo prazo nos equipamentos fotovoltaicos;
- Análise aprofundada na eficiência de cada inversor, baseando-se na potência instalada e do tipo de tecnologia da placa fotovoltaica conectada a ele;
- Análise aprofundada na variação de tensão de curta duração, de modo a conseguir identificar cada tipo de evento e estudar o seu impacto nos inversores fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, Amit; SINGH, Dharmendra Kumar. Harmonic Impact of Grid Connected Photovoltaic system on Low Voltage Power system. In: 3 INTERNATIONAL CONFERENCE FOR CONVERGENCE IN TECHNOLOGY. 2018. **Proceedings** [...] The Gateway Hotel, XION Complex, Wakad Road, Pune, India, 2018. 1-5 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). **Geração Distribuída**. Brasília, DF: ANEEL, 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 15 ago. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade da energia elétrica**. Brasília, DF: ANEEL, 2018. 88 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 18 ago. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). **Resolução normativa nº414/2010**. Brasília, DF: ANEEL, 2010/2018. 85 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15201072/ren2010414+-+Texto+Atualizado+Compacto+%28rev+823+2018%29/b8ad993e-d34a-1b5d-20da-5a912c9ee89f>. Acesso em: 24 ago. 2019.

AHMED, Cheikhne Cheikh; CHERKAOUI, Mohamed; MOKHLIS, Mohcine. MPPT control for photovoltaic system using hybrid method under variant weather condition. In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS TECHNOLOGIES, EMBEDDED AND INTELLIGENT SYSTEMS (WITS). 2019. **Proceedings** [...] Fez, Morocco, 2019. 1-5 p.

AMMONIT. **AmmonitOR - AMMONIT ONLINE REPORT**. Ammonit. 2019. Disponível em: <https://www.ammonit.com/pt/>. Acesso em: 8 nov. 2020.

ARISTIZABAL, A. J. et al. Development of Equipment for Monitoring PV Power Plants, Using Virtual Instrumentation. In: Institute of Electrical and Electronic Engineers. 2006. **Proceedings** [...] Waikoloa, HI, USA, 2006. 2367-2370 p.

BEGA, Egídio Alberto (Org) et al. **Instrumentação Industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2011. 694 p.

BOLTON, William. **Instrumentação & Controle**. Tradução: Luiz Roberto de Godoi Vidal. Curitiba, PR: Hemus, 2002. 197 p. Título original: Engineering Instrumentation and Control.

BOYLESTAD, Robert L.. **Introdução à análise de circuitos**. 10. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

CASARIN, Ricardo. Brasil ultrapassa marca de 300 mil sistemas fotovoltaicos de geração distribuída conectada a rede. **ABSOLAR**, 2020. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/brasil-ultrapassa-marca-de-300-mil-sistemas-fotovoltaicos-de-geracao-distribuida-conectados-a-rede.html#:~:text=A%20ABSOLAR%20destaca%20que%20nos,em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20ao%20%C3%BAltimo%20ano..> Acesso em: 8 dez. 2020.

CEAKI, Oana et al. Analysis of electromagnetic disturbances for grid-connected PV plants. In: IN PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN ELECTRIC POWER SYSTEMS, (MEPS2015). 2015. **Proceedings** [...] Polan, Wroclaw, 2015. 1-5 p.

CORPORATION, Fluke . **Fluke 434-II/435-II/437-II**: Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos - Manual do Usuário. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analises-da-qualidade-de-energia/435-series-ii#>. Acesso em: 29 set. 2019.

COSTA, Diego Marques Ribeiro Carvalho. **Monitorização e análise da performance de duas centrais fotovoltaicas em Inglaterra**. 2019. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2019.

DALIENTO, Santolo et al. **Monitoring, Diagnosis, and Power Forecasting for Photovoltaic Fields: A Review**. **International Journal of Photoenergy**, v. 2017, 2017, p. 1-13.

DANTAS, Stefano Giacomazzi; POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. **Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil e Possíveis Efeitos no Setor Elétrico**. Brasília: Livraria Ipea, 2018.

DEHBONEI, H.; LEE, SR; NEHRIR, H.. Transferência direta de energia para sistemas de energia fotovoltaica de alta eficiência, parte I: conceitos e hipótese. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, p. 31-45. 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Eficiência Energética. EPE - Empresa de Pesquisa Energética**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>. Acesso em: 12 nov. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Matriz Energética e Elétrica. Empresa de Pesquisa Energética**. 2019. Disponível em:

<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ELETRICA>. Acesso em: 13 out. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **O mercado fotovoltaico brasileiro está amadurecendo mais rápido que o esperado. Empresa de Pesquisa Energética**. 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/imprensa/epe-na-midia/o-mercado-fotovoltaico-brasileiro-esta-amadurecendo-mais-rapido-que-o-esperado>. Acesso em: 12 out. 2019.

EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION – EVO. **Protocolo internacional de medição e verificação de performance PIMVP – Conceitos e opções para a determinação de economias de energia e de água**. Sofia: EVO, v. 1, 2012. (EVO 10000 – 1:2012 (Br)).

FARES, Dalila; FATHI, Mohamed; MEKHILEF, Saad. Comparison of Two Hybrid Global Maximum Power Point Algorithms for Photovoltaic Module Under Both Uniform and Partial Shading Condition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMMUNICATION, AND COMPUTER ENGINEERING (ICECCE). 2020. **Proceedings** [...] Istanbul, Turkey.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Instrumentação industrial: Conceitos, Aplicações e Análises**. 7. ed. São Paulo: Érica Ltda, f. 140, 2010. 280 p.

FILHO, José Bione de Melo; AZEVEDO, José Genilson de. Qualidade da Energia na Geração Fotovoltaica Através de Inversores de Diferentes Tipos e Fabricantes Conectados à Rede Elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VII. 2018. **Anais** [...] Gramado, RS, 2018. 10 p.

FORTES, Rárisson Roberto Acácio. **Distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica em condição de ressonância paralela**. Ilha Solteira, 2016. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2016.

FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. **Por que Fronius Solar.Web? Fronius Solar.web**. 2020. Disponível em: <https://www.solarweb.com/>. Acesso em: 26 nov. 2020.

FRONTIN, Sergio de Oliveira (Org) et al. **Usina Fotovoltaica Jaíba Solar: Planejamento e Engenharia**. 1ª. ed. Brasília: Teixeira Gráfica e Editora LTDA, 2017. 528 p.

GRANJA, Agustín Valverde et al. Study of power quality at the point of common coupling of a low voltage grid and a distributed generation system of 7.8 kWp in a tropical region. **Energies**, p. 20, 13 Junho 2018.

GÜLER, Naki; IRMAK, Erdal. MPPT Based model predictive control of grid connected inverter for PV systems. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY RESEARCH AND APPLICATIONS. 2019. **Proceedings** [...] Brasov, ROMANIA: IEEE, 2019.

FARANADIA, A. H.; OMAR, A. M.; NOOR, S. Z.. Voltage Flicker Assessment of 15.3kWp Grid Connected Photovoltaic Systems. In: 8TH CONTROL AND SYSTEM GRADUATE RESEARCH COLLOQUIUM. 2017. **Proceedings** [...] Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2017.

IMPLEMENT PV array modules. **MathWorks**. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html?s_tid=srchtitle. Acesso em: 24 fev. 2021.

IMPLEMENT universal power converter with selectable topologies and power electronic devices. **MathWorks**. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/universalbridge.html?s_tid=srchtitle. Acesso em: 24 fev. 2021.

INTERNATIONAL, Fronius. **Manual Fronius Symo 5.0-3-M, 15.0-3-M**. Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/produtos/todos-os-produtos/inversor/fronius-symo/fronius-symo-15-0-3-m>. Acesso em: 29 set. 2019.

IRMAK, Erdal; GÜLER, Naki. A model predictive control-based hybrid MPPT method for boost converters. **International Journal of Electronics**, p. 1-16, ano 19, 20 fev. 2019.

KAGAN, Nelson ; ROBBA, Ernesto João ; Hernan Prieto Schmidt. **Estimação de Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica**. 3. ed. Editora Blucher, f. 230, 2013, p. 3-4.

KHATIB, Tamer; ELMENREICH, Wilfried. **Modeling of Photovoltaic Systems Using Matlab**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016.

LIMA, Fábio Soares de. **A automação e sua evolução. Redes para automação industrial DCA2401 - PPGEE**. Natal, 2003. Disponível em: https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho1/trabalho1_16.pdf. Acesso em: 8 dez. 2020.

MARTINHO, EDSON. **Distúrbios da energia elétrica**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2019. 142 p.

MATLAB. **Mathworks**. 2019. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 31 out. 2020.

MILLS-PRICE, Michael; HAO, Kei . The Importance of Coordinated Control Systems in Solar Generation Plants. In: 1ST ANNUAL PAC WORLD AMERICAS CONFERENCE. 23-25 September of 2014. **Proceedings** [...] Raleigh, North Carolina, 2014.

MIRANDA, Raul Figueiredo Carvalho. **Análise da Inserção de Geração Distribuída de energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro**. Rio de Janeiro, 2013. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

NUNES, Evandro Ailson de Freitas. **Análise de Impactos na Rede de Distribuição de Energia Elétrica Decorrentes da Inserção de Sistemas de Geração Fotovoltaicos**. Natal, RN, 2017. 107 p. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, 2010. 809 p.

PALUDO, Juliana Aramizu. **Avaliação dos Impactos de Elevados Níveis de Penetração da Geração Fotovoltaica no Desempenho de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em Regime Permanente**. São Carlos, 2014. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

PATIL, Rajkumari R.; PATIL, Smita P.. **Designing Of Z-source inverter for photovoltaic system using MATLAB/SIMULINK**. **IEEE Xplore**. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8074331>. Acesso em: 17 jan. 2020.

PATSALIDES, Minas et al. **The Effect of Solar Irradiance on the Power Quality Behaviour of Grid Connected Photovoltaic Systems**. **Researchgate**. 2014. 8 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228863997_The_Effect_of_Solar_Irradiance_on_the_Power_Quality_Behaviour_of_Grid_Connected_Photovoltaic_Systems/citations. Acesso em: 19 out. 2019.

PENDEM, Suneel Raju; MIKKILI, Suresh. **Modeling, simulation and performance analysis of solar PV array configurations (Series, Series–Parallel and Honey-Comb) to extract maximum power under Partial Shading Conditions**. **Science Direct**. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484717302378>. Acesso em: 9 jan. 2020.

PETRONE, Giovanni; RAMOS-PAJA, Carlos Andrés; SPAGNUOLO, Giovanni. **Photovoltaic Sources Modeling**. 1. ed. John Wiley & Sons Ltd, 2017.

PLACHTA, Kamil. Autonomous Tracking Controller for Photovoltaic Systems Using Global Positioning System. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING. 2018. **Proceedings** [...] Palermo, Italy, 2018. 1-5 p.

RAHMAN, Rafiza Abdul et al. Performance Analysis of 45.36 kWp Grid-Connected Photovoltaic Systems at Malaysia Green Technology Corporation. In: 3 INTERNATIONAL SYMPOSIUM & EXHIBITION IN SUSTAINABLE ENERGY & ENVIRONMENT. 2011. **Proceedings** [...] Melaka, Malaysia, 2011. 1-3 p.

ROPP, Michael E.; GONZALEZ, Sigifredo. **Development of a MATLAB/Simulink Model of a Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System**. IEEE Xplore. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4785259>. Acesso em: 2 jan. 2020.

ROUIBAH, N. et al. A low-cost monitoring system for maximum power point of a photovoltaic system using IoT technique. In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS TECHNOLOGIES, EMBEDDED AND INTELLIGENT SYSTEMS (WITS). 2019. **Proceedings** [...] Fez, Morocco, 2019. 1-5 p.

SANTOS, Afonso Henriques Moreira et al. **Eficiência Energética: Teoria & Prática**. 1ª. ed. Itajubá, MG: FUPAI, 2007. 225 p.

SAUAIA, Rodrigo; KOLOSZUK, Ronaldo. **A energia solar que faz o Brasil crescer: Setor fotovoltaico é um protagonista relevante para uma retomada econômica sustentável e competitiva do país no curto, médio e longo prazos**. **Cenários Solar**. 2021. Disponível em: <https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/a-energia-solar-que-faz-o-brasil-crescer/>. Acesso em: 1 fev. 2021.

SCHONARDIE, MATEUS FELZKE . **Sistema fotovoltaico trifásico conectado à rede com controle de potência ativa e reativa utilizando transformada dq0**. Florianópolis, f. 276, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SEME, Sebastijan et al. Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks. **Energy**, v. 139, p. 1261-1266, 15 Novembro 2017.

SHEVCHENKO, Serhii Yu.; VOLOKHIN, Vitalii V.; DIAHOVCHENKO, Illia M.. Power quality issues in smart grids with photovoltaic power stations. **Energetika**, v. 4, p. 146-153, 2017.

SOFTWARE PVSYST. **Instituto Solar**. 2019. Disponível em: <https://institutosolar.com/software-pvsyst/>. Acesso em: 9 set. 2020.

SOUZA, Arthur Costa de. **Análise dos Impactos da Geração Distribuída por Energia Sola Fotovoltaica na Qualidade da Energia Elétrica**. Uberlândia, 2016. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

URBANETZ, Jair; BRAUN, Pricila; RÜTHER, Ricardo. Power quality analysis of grid-connected solar photovoltaic generators in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 64, p. 8-14, Dezembro 2012.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 1ª. ed. Campinas, SP: ELEKTRO Eletricidade e Serviços S.A., 2012. 315 p.

WEG. **Manual para Correção de Fator de Potência** . WEG. 2009. 40 p. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>. Acesso em: 24 ago. 2019.

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectado à Rede Elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 208 p.

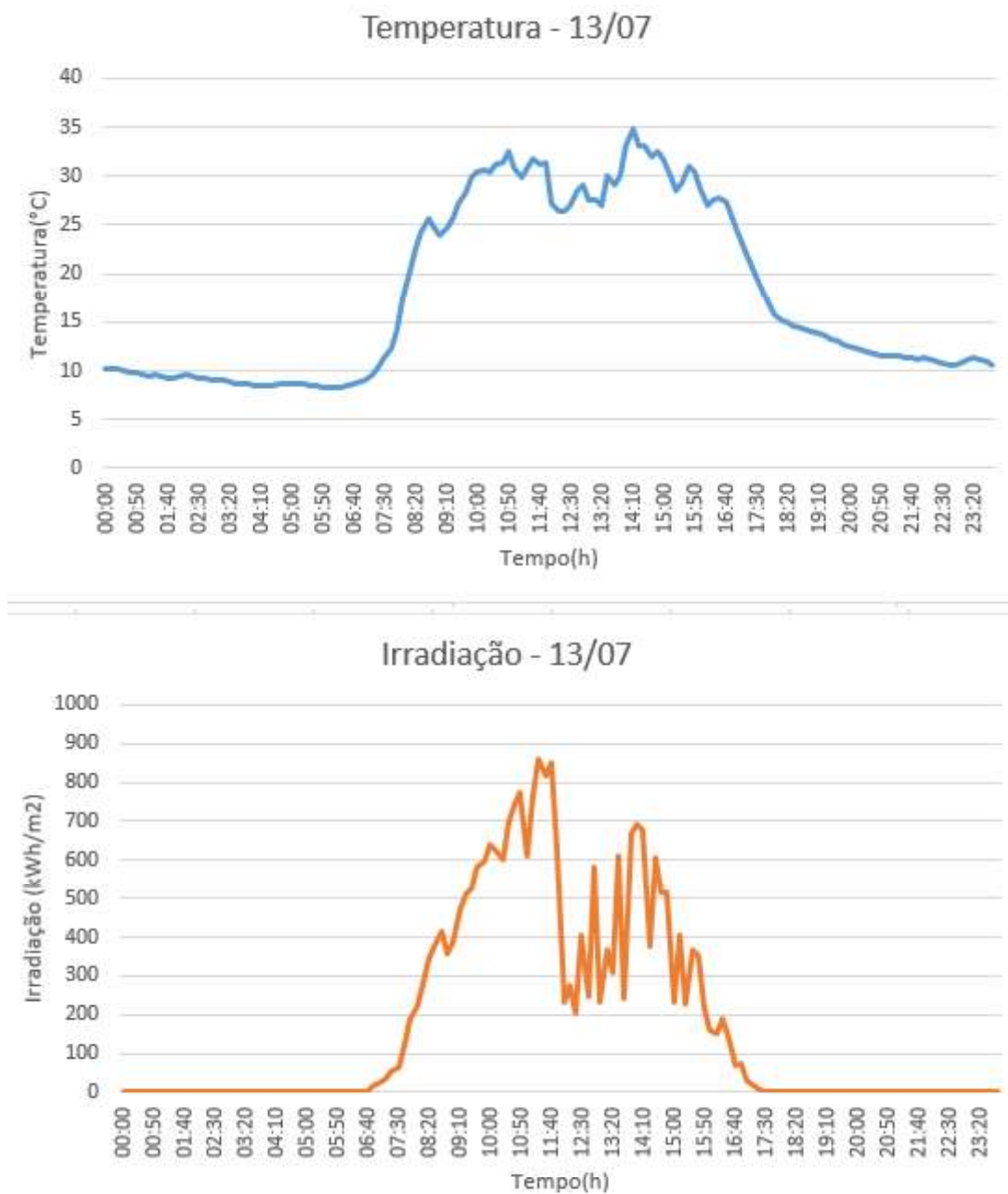
APÊNDICE A — Dados da estação solarimétrica - Irradiação e Temperatura

Como parte da pesquisa necessitou de dados climáticos para as simulações dos softwares utilizados. Os dados foram coletados da estação solarimétrica no período de 13 a 19 de julho de 2020 para a simulação de cada dia no software MATLAB/Simulink.

Os dados de temperatura e irradiação são expostos nos gráficos e demonstrados nas Figuras A-1 a A-7.

A Figura A-1 apresenta os dados de irradiação e temperatura do dia 13/07.

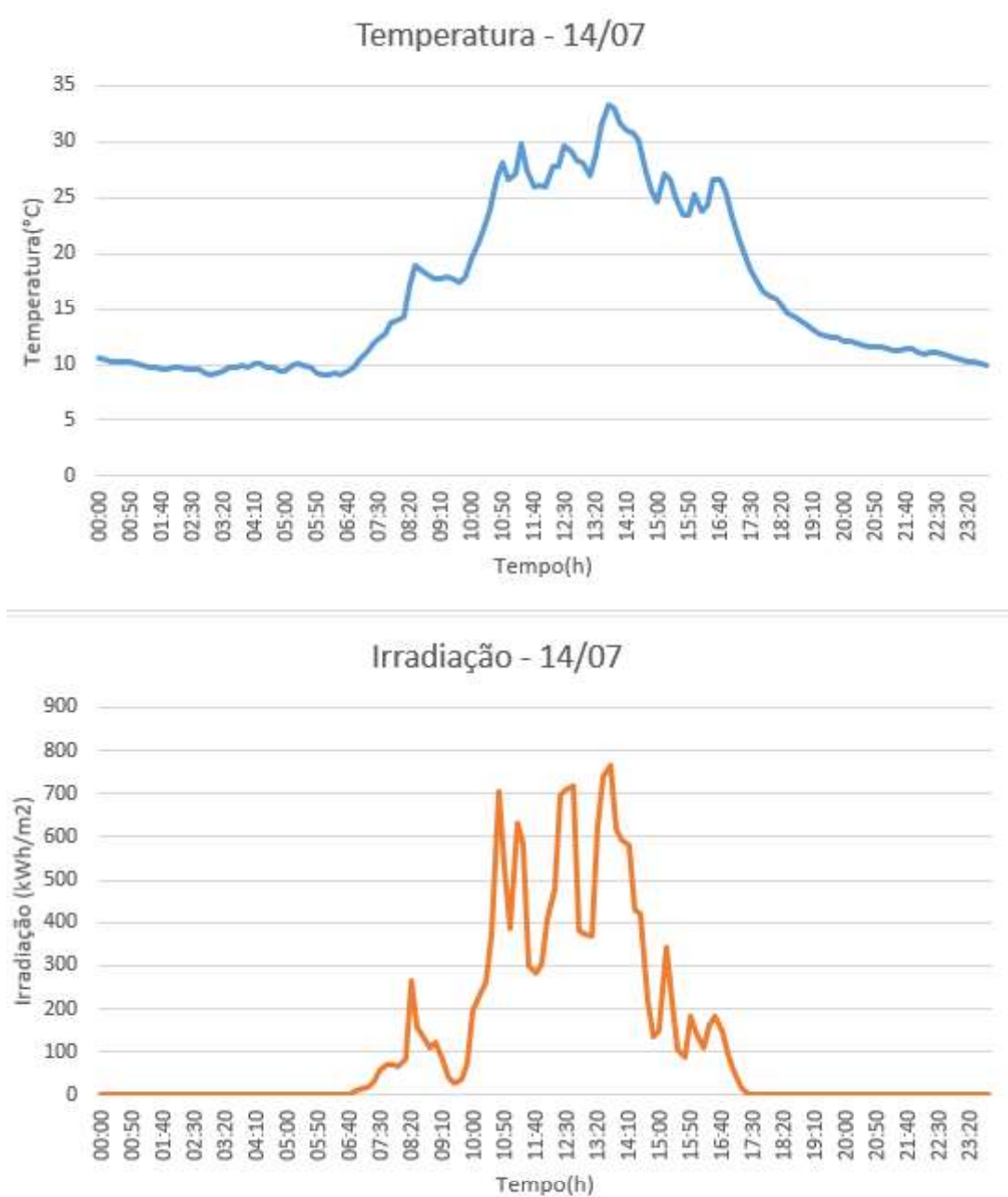
Figura A-1 Dados de irradiação e temperatura no dia 13/07



Fonte: O autor (2021).

A Figura A-2 apresenta os dados de irradiação e temperatura do dia 14/07.

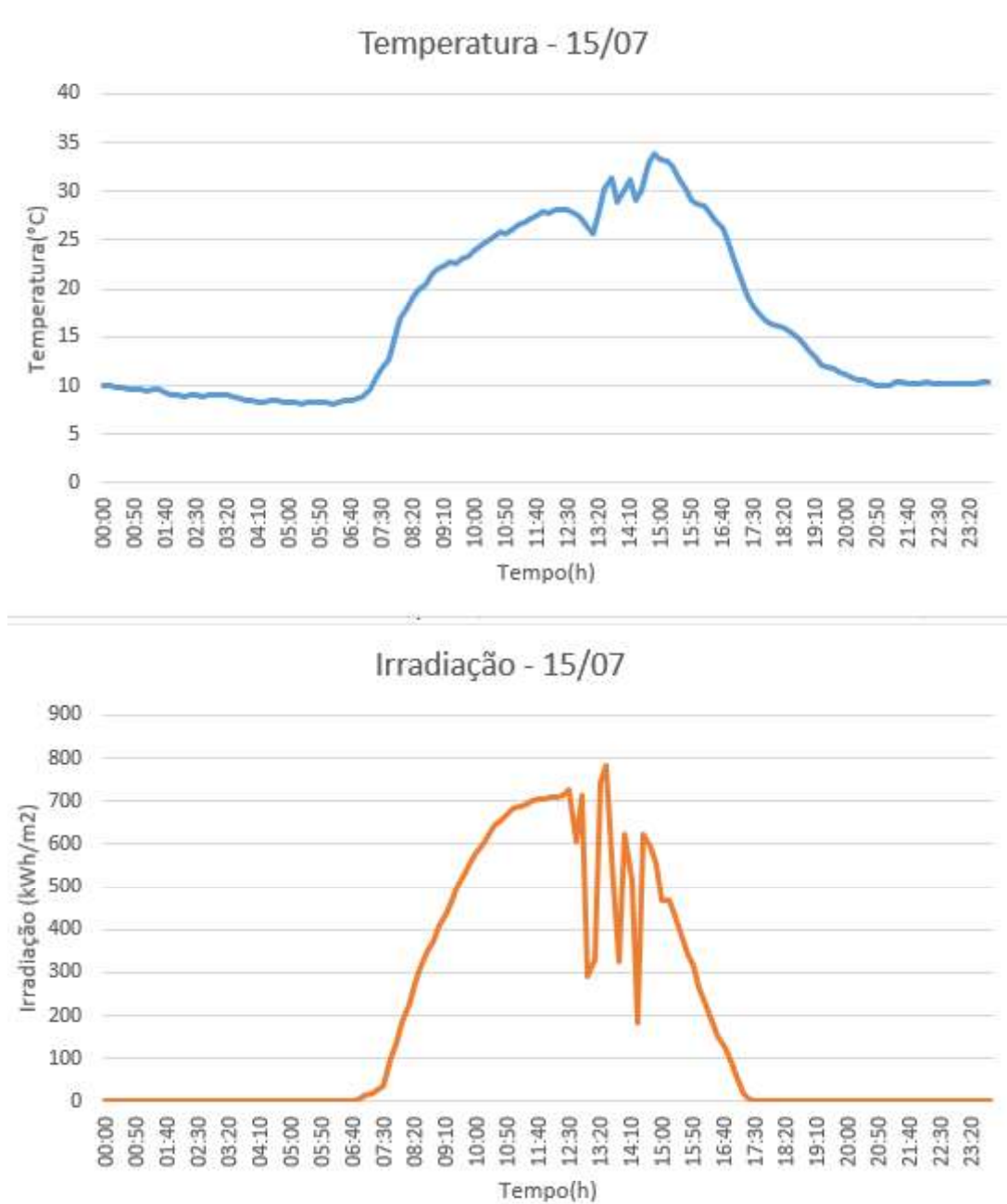
Figura A-2 Dados de irradiação e temperatura no dia 14/07



Fonte: O autor (2021).

A Figura A-3 apresenta os dados de irradiação e temperatura do dia 15/07.

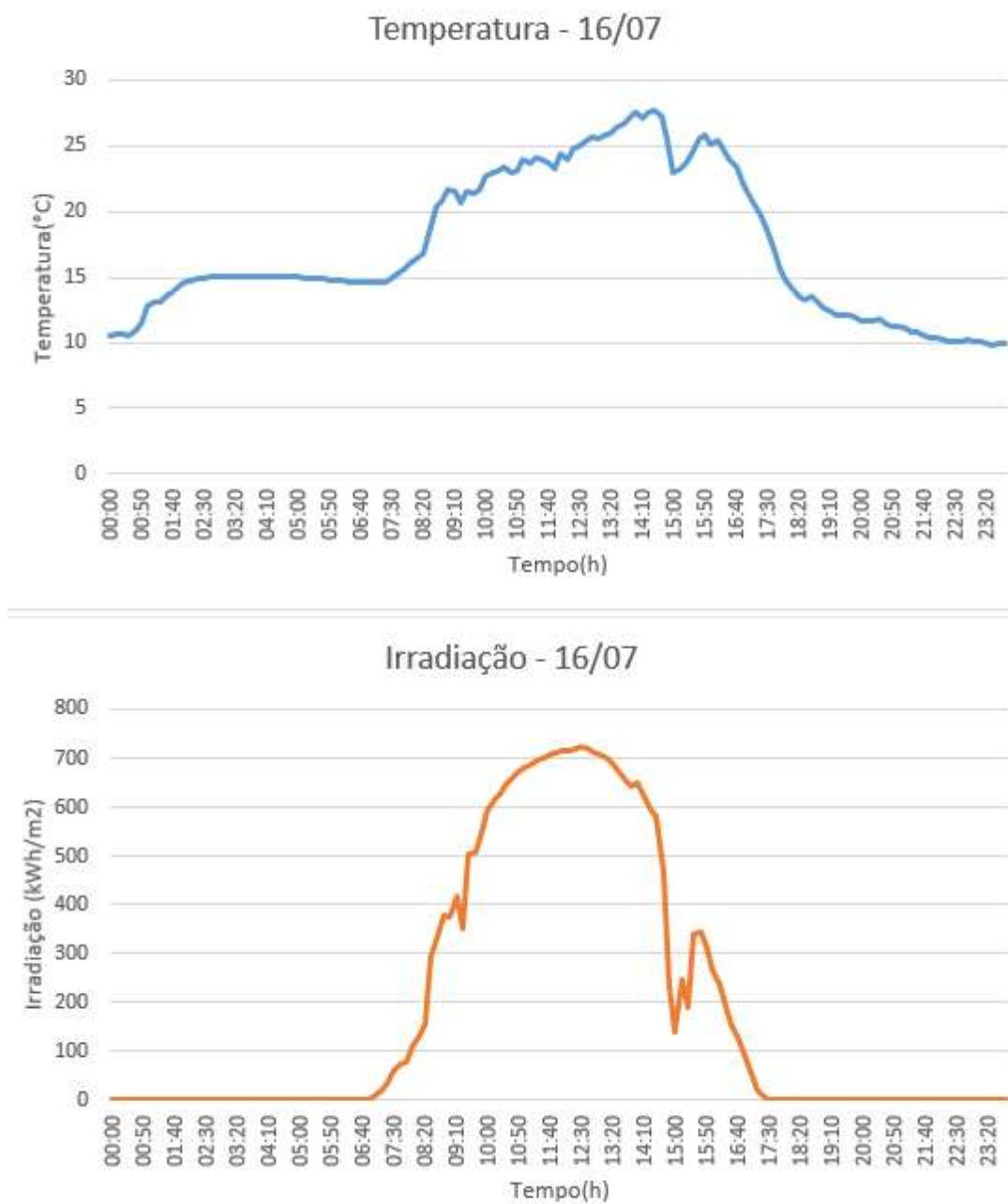
Figura A-3 Dados de irradiação e temperatura no dia 15/07



Fonte: O autor (2021).

A Figura A-4 apresenta os dados de irradiação e temperatura do dia 16/07.

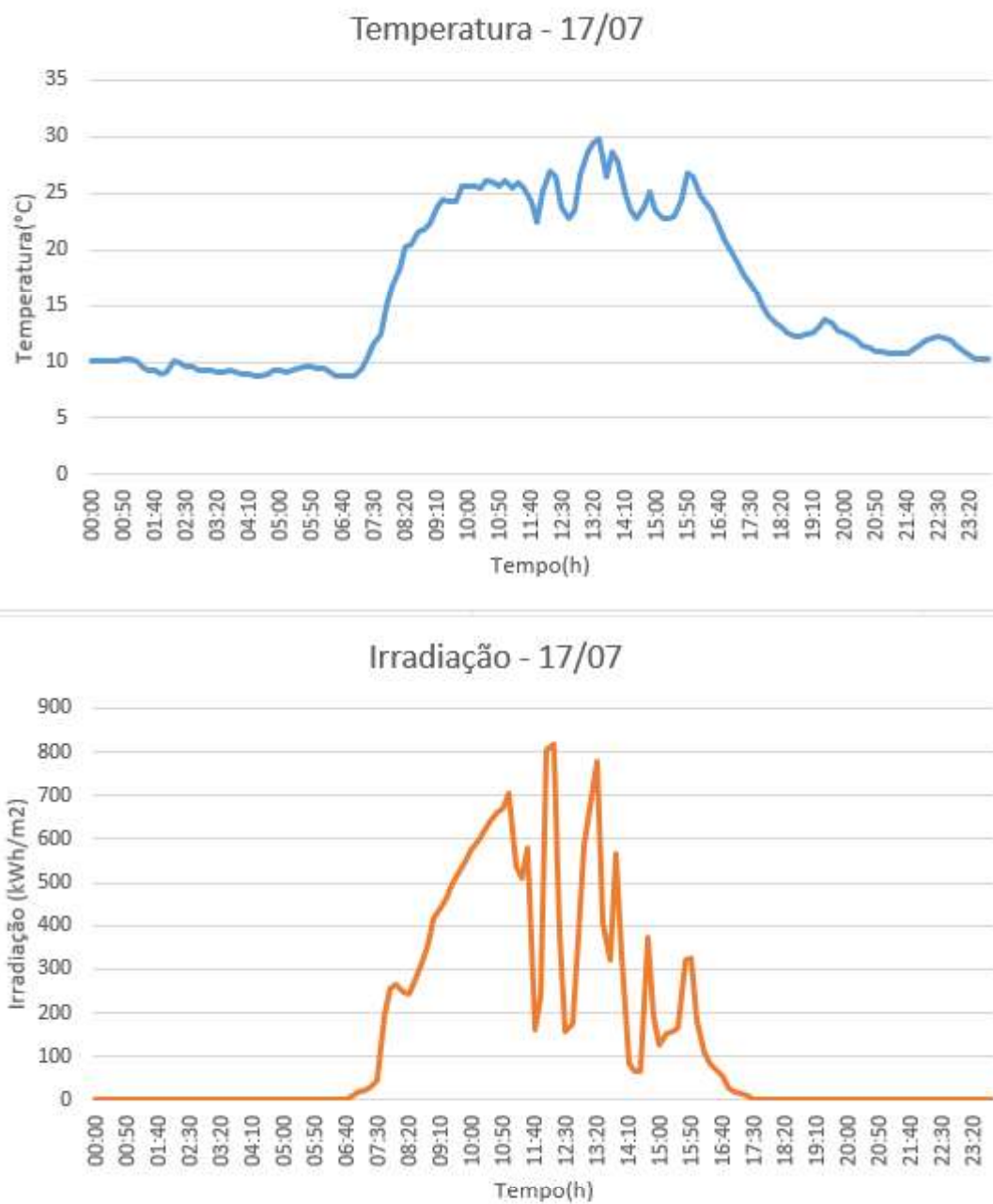
Figura A-4 Dados de irradiação e temperatura no dia 16/07



Fonte: O autor (2021).

A Figura A-5 apresenta os dados de irradiação e temperatura do dia 17/07.

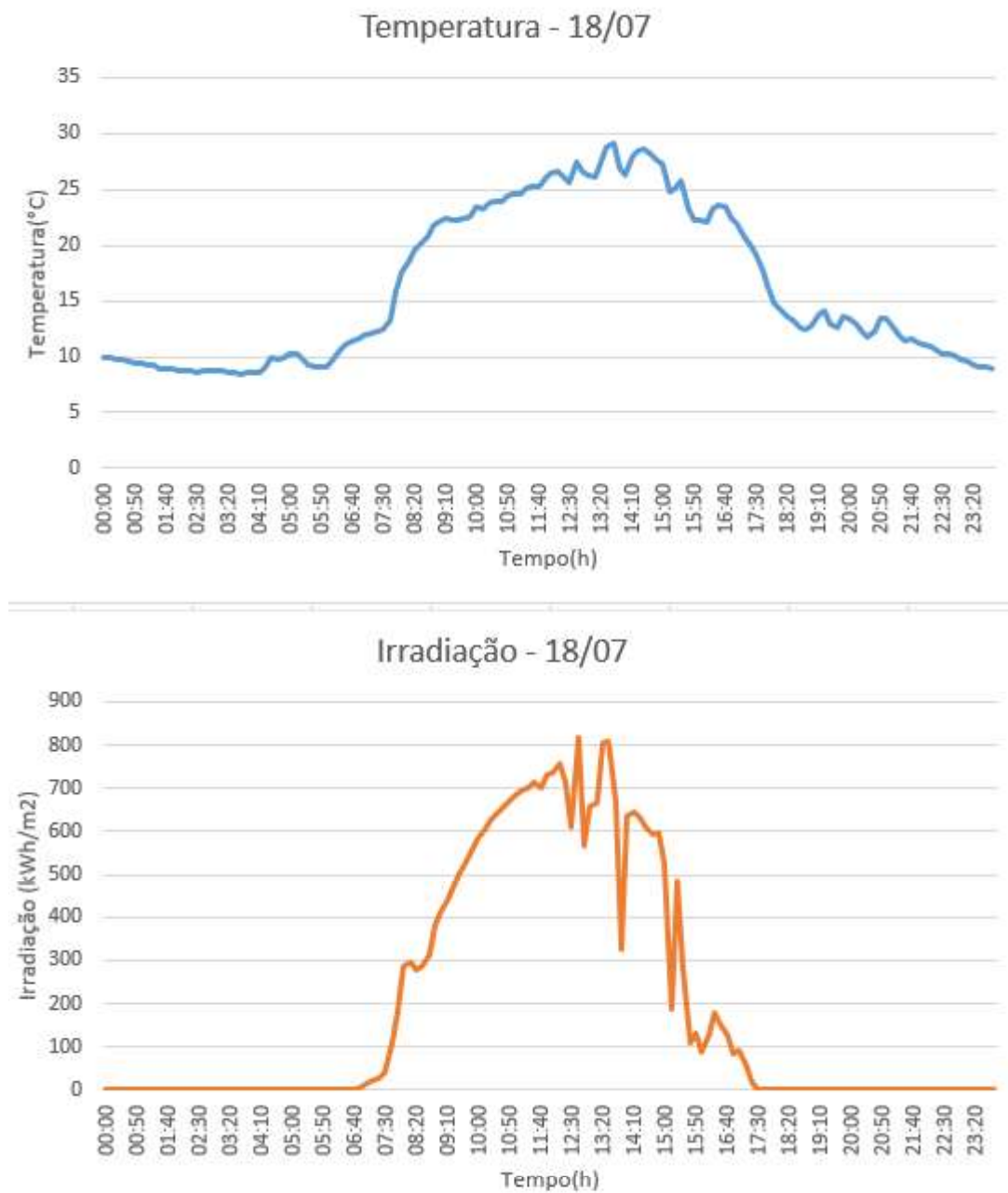
Figura A-5 Dados de irradiação e temperatura no dia 17/07



Fonte: O autor (2021).

A Figura A-6 apresenta os dados de irradiação e temperatura do dia 18/07.

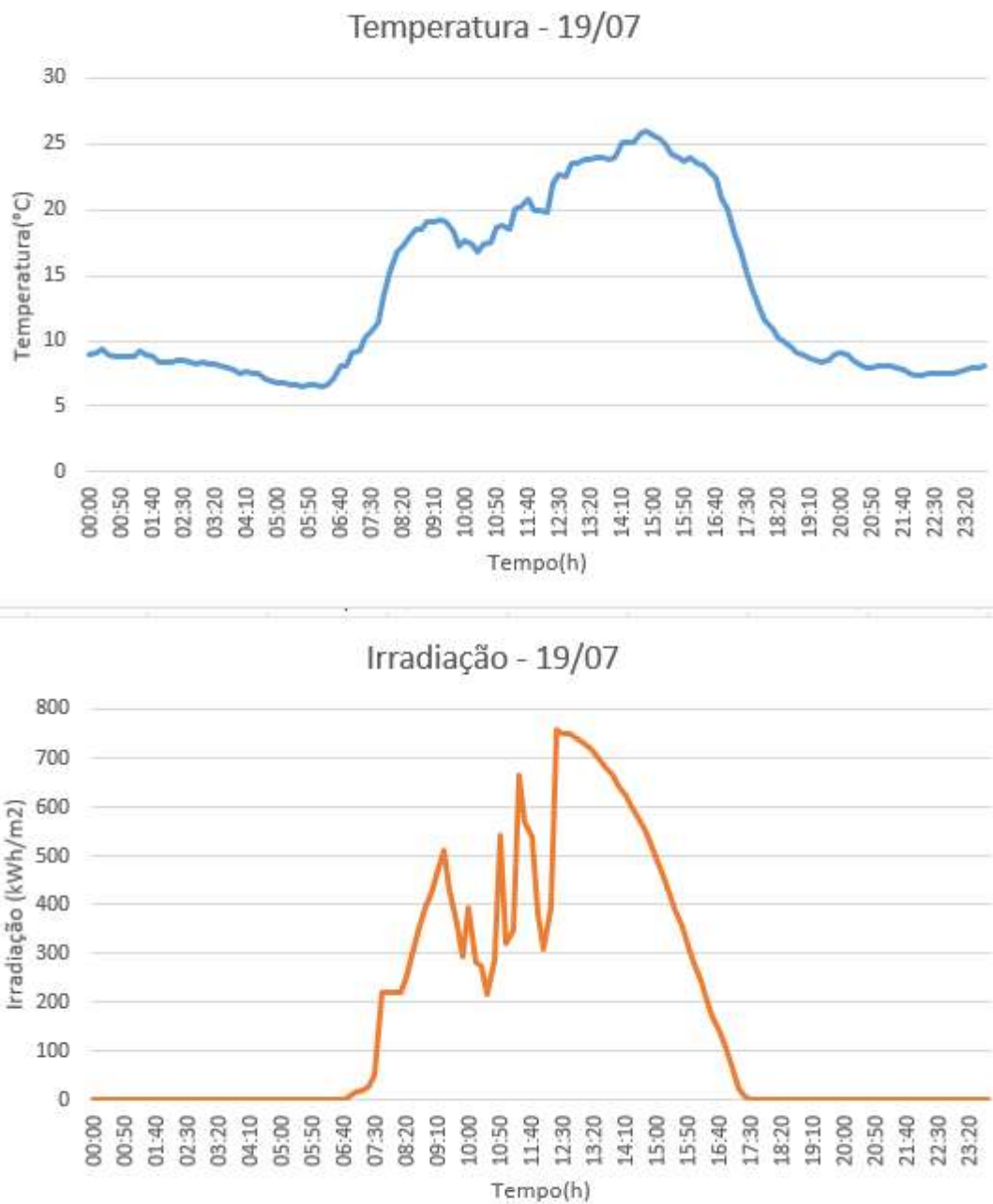
Figura A-6 Dados de irradiação e temperatura no dia 18/07



Fonte: O autor (2021).

A Figura A-7 apresenta os dados de irradiação e temperatura do dia 19/07.

Figura A-7 Dados de irradiação e temperatura no dia 19/07



Fonte: O autor (2021).